

# 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

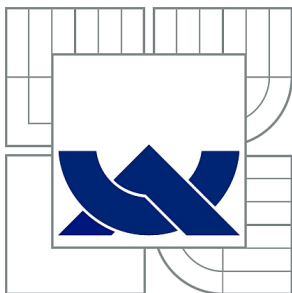
VZÁJEMNÁ KONVERZE OTDM A WDM

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

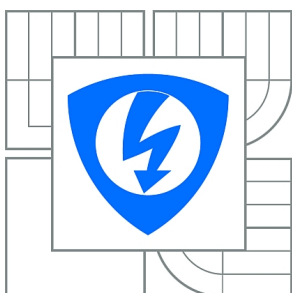
Bc. LUKÁŠ KUPČIHA

BRNO 2013



**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**

OTDM TO WDM CONVERSION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. LUKÁŠ KUPČIHA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.**

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Lukáš Kupčiha

**ID:** 20323

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2012/2013

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vzájemná konverze OTDM a WDM

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je teoreticky prostudovat možnosti přímé konverze mezi technologiemi OTDM a WDM v optických sítích. Student detailně popíše obě technologie multiplexace a provede jejich srovnání. Dále se zaměří na možnost vzájemné konverze mezi oběma metodami a navrhne vlastní model pro konverzi OTDM na WDM a opačně. Funkčnost navrženého modelu bude ověřena v softwaru OptSim 5.2.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] [2] 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.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 29.5.2013

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

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Kamil Vrba, 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 bylo seznámit se s možnostmi konverze mezi technologiemi OTDM a WDM. Vzhledem k rozsáhlé problematice byl nejprve popsán princip samotného optického přenosového systému. Samostatná kapitola byla věnována jevům ovlivňujícím optické přenosy. V rámci útlumu optických vláken byly zmíněny materiálové absorpce, lineární a nelineární rozptyly a ohybové ztráty. Následoval popis vidové, chromatické a polarizační vidové disperze optických vláken. Poslední část kapitoly představovaly nelineární jevy, mezi které patří vlastní fázová modulace, křížová modulace a čtyřvlonné směšování. Praktická práce byla již věnována problematice multiplexních přenosových systémů. Vysvětleny byly principy fungování frekvenčních, prostorových a hybridních multiplexních přenosových systémů. Detailně pak byly popsány a srovnány přenosové systémy časového a vlnového multiplexu. Pozornost byla věnována také jednotlivým prvkům přenosového řetězce multiplexu, jako jsou jednotlivé typy zdrojů záření, detektorů, modulátorů, optických zesilovačů, rozbočovačů, slučovačů, multiplexorů a demultiplexorů. Následující část práce měla za cíl vyústit v návrh modelu vzájemné konverze mezi systémy OTDM a WDM. Nejprve byly zhodnoceny doposud provedené experimenty týkající se konverze mezi OTDM a WDM. Poté byl navržen principiální model konverze OTDM/WDM/OTDM. Vysvětleny byly jeho jednotlivé části a jejich funkce. Součástí návrhu byla i obecná doporučení k případné praktické realizaci. Vzhledem k omezenému množství času vyhrazeného pro přístup k simulačnímu programu Optsim byly provedeny simulace pouze některých dílčích částí konverzního modelu. V závěru práce bylo provedeno zhodnocení navrženého modelu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

OTDM, WDM, FWM, XPM, komprese pulsů

## ABSTRACT

The aim of this thesis was introducing the options of conversion between OTDM and WDM technologies. Since this issue is rather extensive, first of all the principle of optical transmission system is described. One chapter presents the effects influencing the optical transmissions. Material absorption, linear and nonlinear scattering and bending losses are mentioned in terms of fiber losses, followed by description of waveguide, chromatic and polarization-mode dispersion of optical fibers. Last part of the chapter presents nonlinear effects, including self-phase modulation, cross-phase modulation and four-wave mixing. The practical part of the thesis deals with multichannel systems. The principles of frequency, space and hybrid multiplexing are explained. Multichannel systems with optical time domain multiplexing and waveguide multiplexing are described in detail and compared. The elements of the transmission chain of multiplex, such as different types of lasers, detectors, modulators, optical amplifiers, splitters, couplers, MUX and DEMUX are discussed. The next part of the thesis was aimed at suggesting the model of mutual conversion between OTDM and WDM systems. First of all, the previously performed experiments concerning the conversion between OTDM and WDM were evaluated. Then the model of OTDM/WDM/OTDM conversion was designed, with explanation of its parts and their function. The general recommendations for practical implementation were also included. Due to the limited amount of time reserved for access to the simulation program Optisim, the simulations were performed only for certain parts of the proposed conversion model. At the end of the thesis, the proposed model is evaluated.

## KEYWORDS

OTDM, WDM, FWM, XPM, pulse compression

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

KUPČIHA, L. *Vzájemná konverze OTDM a WDM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 59 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..

## PROHLÁŠENÍ

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

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 25.5.2013

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Miloslavu Filkovi, Csc. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 25.5.2013

podpis autora

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Úvod</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1 Optická vlákna</b>                                   | <b>2</b>  |
| 1.1 Jednovidová vlákna                                    | 3         |
| 1.2 Mnohovidová vlákna                                    | 4         |
| <b>2 Přenosové vlastnosti optických vláken</b>            | <b>5</b>  |
| 2.1 Útlum optického vlákna                                | 5         |
| 2.1.1 Materiálové absorpce                                | 5         |
| 2.1.2 Lineární rozptyly                                   | 7         |
| 2.1.3 Nelineární rozptyly                                 | 8         |
| 2.1.4 Ohybové ztráty                                      | 9         |
| 2.2 Disperze optických vláken                             | 9         |
| 2.2.1 Vidová disperze                                     | 9         |
| 2.2.2 Chromatická disperze                                | 10        |
| 2.2.3 Polarizační vidová disperze                         | 12        |
| 2.3 Nelineární jevy v optických vláknech                  | 12        |
| 2.3.1 Vlastní fázová modulace                             | 13        |
| 2.3.2 Křížová fázová modulace                             | 14        |
| 2.3.3 Čtyřvlonné směšování                                | 14        |
| <b>3 Multiplexní přenosové systémy</b>                    | <b>17</b> |
| 3.1 Frekvenční multiplex                                  | 18        |
| 3.2 Vlnový multiplex                                      | 18        |
| 3.2.1 Princip vlnového multiplexu                         | 19        |
| 3.2.2 Vývoj systémů vlnového multiplexu                   | 20        |
| 3.2.3 Široký vlnový multiplex                             | 20        |
| 3.2.4 Hustý vlnový multiplex                              | 20        |
| 3.2.5 Hrubý vlnový multiplex                              | 21        |
| 3.3 Časový multiplex                                      | 23        |
| 3.4 Prostorový multiplex                                  | 26        |
| 3.5 Hybridní multiplex                                    | 26        |
| <b>4 Základní prvky multiplexních přenosových systémů</b> | <b>27</b> |
| 4.1 Zdroje záření   | 27        |
| 4.1.1 Fabry-Perotovy laserové diody                       | 28        |
| 4.1.2 Plošně vyzářující lasery                            | 28        |
| 4.1.3 Laserové diody s rozloženou zpětnou vazbou          | 29        |
| 4.2 Detektory   | 30        |
| 4.3 Modulátory  | 31        |
| 4.3.1 LiNbO <sub>3</sub> modulátory                       | 31        |
| 4.3.2 Elektroabsorpční modulátory                         | 31        |
| 4.4 Optické zesilovače                                    | 32        |
| 4.4.1 Optické vláknové zesilovače                         | 32        |
| 4.4.2 Polovodičové optické zesilovače                     | 33        |
| 4.5 Multiplexery a demultiplexery                         | 33        |
| 4.6 Rozbočovače a slučovače                               | 34        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Konverze OTDM/WDM</b>                            | <b>35</b> |
| 5.1      | Základní princip konverze                           | 37        |
| 5.2      | Větev s hodinovými WDM signály                      | 38        |
| 5.2.1    | FWHM  | 39        |
| 5.2.2    | Zpoždění impulsů                                    | 40        |
| 5.2.3    | Komprimování impulsů pomocí Ramanovského zesilovače | 41        |
| 5.3      | Větev s datovým OTDM signálem                       | 45        |
| 5.4      | Parametrická konverze OTDM/WDM                      | 45        |
| 5.2.1    | Větev s hodinovými WDM signály                      | 32        |
| 5.2.2    | Větev s datovým OTDM signálem                       | 33        |
| 5.2.3    | Vzorkovací část systému                             | 35        |
| <b>6</b> | <b>Konverze WDM/OTDM</b>                            | <b>49</b> |
| 6.1      | Základní princip konverze                           | 49        |
| 6.2      | Větev s datovými WDM signály                        | 49        |
| 6.3      | Větev s hodinovým OTDM signálem                     | 49        |
| 6.4      | Konverze WDM/OTDM pomocí XPM                        | 50        |
| <b>7</b> | <b>Závěr</b>  | <b>53</b> |
|          | <b>Seznam použité literatury</b>                    | <b>54</b> |
|          | <b>Seznam použitých zkratk</b>                      | <b>56</b> |
|          | <b>Seznam příloh</b>                                |           |

# ÚVOD

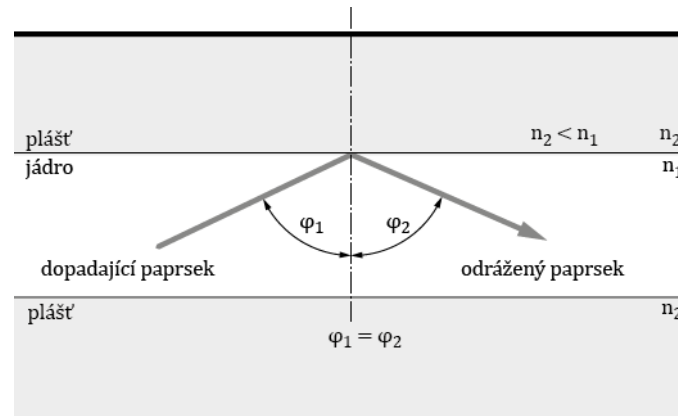
Elementární přenosový komunikační systém představují tři základní funkční bloky: vysílač, přijímač a přenosový kanál. Když byl v roce 1876 vynalezen telefon, na dlouhou dobu se stala hlavním přenosovým médiem metalická kabeláž využívající kroucený drát. Příchod počítačových sítí se stále rostoucím objemem datových přenosů a rozšiřujícím se portfoliem telefonních služeb brzy narazil na fyzikální limity metalické kabeláže. Hledání alternativního přenosového média ukončili v roce 1966 Kao a Hackman svým návrhem na použití optického vlákna. Při přenosu byl ve funkci vysílače použit Maimanův vynález z roku 1962, kvantový generátor optického záření neboli laser. Další výzkum v oblasti použitých materiálů a výrobních technologií vedl k tomu, že v roce 1970 bylo představeno optické vlákno s útlumem menším než 20 dB/km. O necelých osm let později byla ohlášena první komerční nasazení optického spoje. V dalších letech se daří neustále snižovat hodnotu útlumu až na dnešní necelý 1 dB/km pro oblast vyšších vlnových délek [5].

Velká část práce je věnována problematice optoelektronických multiplexních přenosových systémů. Probrány jsou jednotlivé metody multiplexace, jejich vlastnosti i používané prvky. Pozornost je vzhledem k zadání práce věnována především systémům hustého vlnového multiplexu a optického časového multiplexu. Je analyzován jejich současný stav jejich výhody a nevýhody.

Následující praktická část je věnována samotné přímé konverzi multiplexních systémů. Probrána jsou publikovaná experimentální řešení a navržen model možné přímé konverze.

# 1 OPTICKÁ VLÁKNA

Přenos optickým vláknem je založen na totálním odrazu na rozhraní dvou optických prostředí s rozdílným indexem lomu, viz obr. 1.1.



Obr. 1.1: Znázornění jevu totálního vnitřního odrazu za předpokladu splnění dvou podmínek: index lomu jádra ( $n_1$ ) je větší než index lomu pláště ( $n_2$ ) a úhly dopadajícího ( $\varphi_1$ ) a odraženého ( $\varphi_2$ ) paprsku jsou si rovny [24]

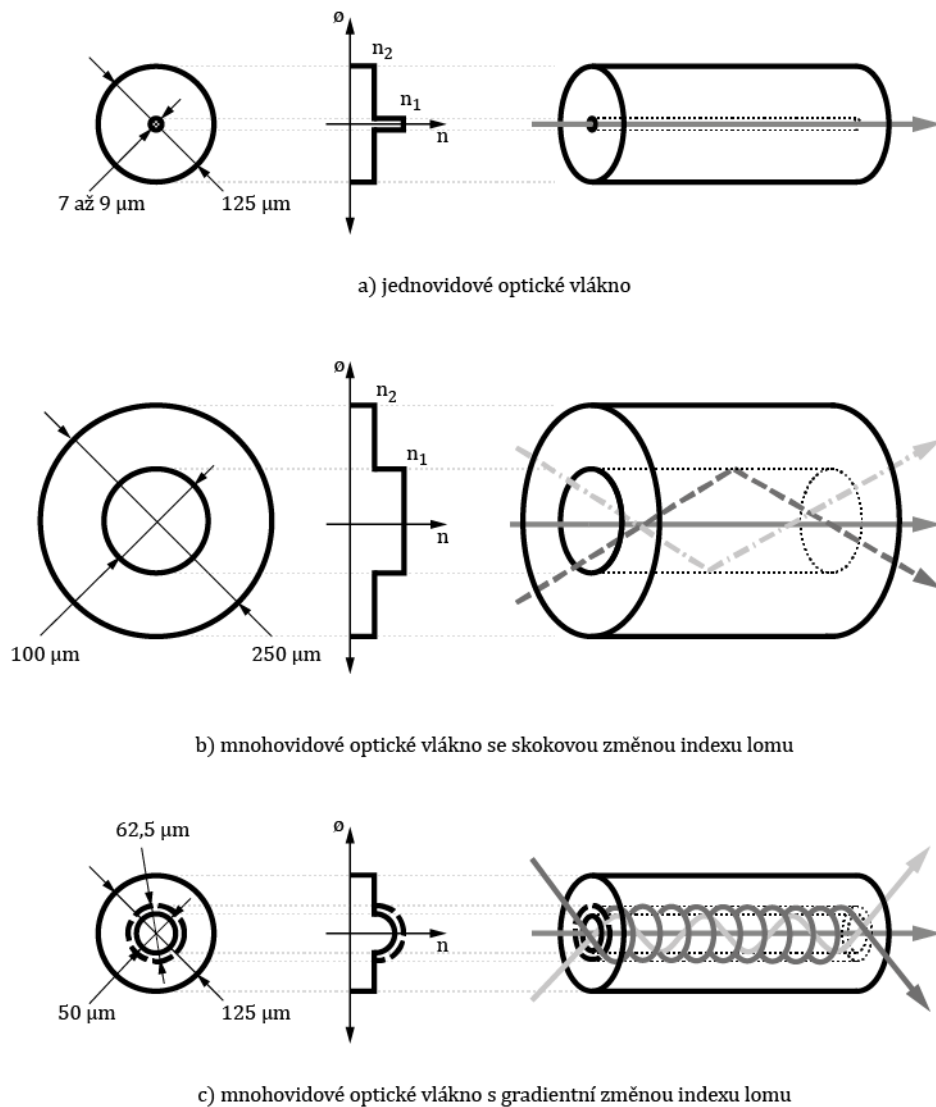
Výroba optického vlákna představuje technologicky velice náročnou operaci, která zásadním způsobem ovlivňuje budoucí přenosové vlastnosti vlákna.

Důležitým parametrem je také konstrukce vlákna. Optická vlákna můžeme rozlišit podle struktury:

- Vlákna se skokovou změnou indexu lomu.
- Vlákna s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna.

Další možné rozdělení je podle počtu přenášených vidů:

- Jednovidová vlákna SMF (Single-Mode Fiber).
- Mnohovidová vlákna MMF (Multi-Mode Fiber).



Obr. 1.2: Znázornění základních typů optických vláken (index lomu je označen  $n$ ) i s příslušným způsobem vedení světelného paprsku [24]

## 1.1 Jednovidová vlákna

Jednovidová vlákna dnes představují komerčně nejrozšířenější skupinu optických vláken. Jejich nízký útlum, malá disperze a vysoká přenosová kapacita je předurčuje pro všestranné využití v telekomunikacích, ať již jde o dálkové přenosy nebo např. metropolitní síť.

Konstrukce vlákna je přizpůsobena požadavku šířit pouze jeden vid. Průměr jádra se tak pohybuje v rozmezí 7  $\mu\text{m}$  až 9  $\mu\text{m}$ . Díky malým rozměrům jádra se určité množství záření šíří i pláštěm v podobě evanescentní vlny, a proto musí být průměr pláště u SM vláken minimálně desetkrát větší, než je průměr jádra. Typická hodnota průměru pláště je 125  $\mu\text{m}$ . Útlum vlákna pro oblast vyšších kmitočtových délek je pod hodnotou 0,2 dB/km.

Technologické pokroky ve výrobě jednovidových optických vláken umožnily postupně využití II., III., IV. a V. přenosového okna. ITU-T (International Telecommunication Union) zavedla i nové značení pásem, viz obr. 2.2. Rozsahy vlnových délek pro jednotlivá pásma jsou uvedeny v tab. 1.1.

Tab. 1.1: Rozsah vlnových délek pásem dle ITU-T [5]

| Název oblasti  | Rozsah [nm]  |
|--|--------------|
| O (Original). Původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm.                                     | 1260 až 1360 |
| E (Extended). Pásmo využitelné pouze s vlákny typu „Low Water Peak“ standardu ITU-T G.652.C. | 1360 až 1460 |
| S (Short). Pásmo kratších vlnových délek.  | 1460 až 1530 |
| C (Conventional).  | 1530 až 1565 |
| L (Long). Pásmo dlouhých vlnových délek.   | 1565 až 1625 |
| U (Ultralong). Pásmo velmi dlouhých vlnových délek.  | 1625 až 1675 |

Zároveň jsou pro tato nová pásma ITU-T skupinou G navrhovány a postupně standardizovány parametry jednovidových typů vláken [5]:

- G.652, standardní optické jednovidové vlákno s průměrem jádra a pláště 9 μm/125 μm.
- G.652.C, pracuje v celém rozsahu vlnových délek, využívá tak všechna dostupná pásma (včetně pásma E).
- G.652.D, vlákno typu All Wave, kompatibilní s vlákny H.652.
- G.653, někdy také označována jako vlákna DSF (Dispersion Shifted Fiber), vyvinuta se snahou potlačit chromatickou disperzi. Nevhodná pro systémy hustého vlnového multiplexu díky vytváření parazitních kanálů a přeslechům.
- G.654, díky optimalizaci pro co nejnižší vložný útlum na vlnové délce 1550 nm a posunuté mezní vlnové délce jsou používána výhradně k přenosům na velké vzdálenosti podmořskými kabely bez nutnosti začlenění zesilovačů na trase.
- G.655, označovaná jako vlákna s posunutou nenulovou disperzí NZ-DSF (Non Zero – Dispersion Shifted Fiber). Optimalizovaná pro vlnovou délku 1550 nm. Určená pro použití u vysokorychlostních přenosů a systémů hustého vlnového multiplexu.
- G.656, vlákna typu NZ-DSF optimalizovaná pro přenosy v pásmu 1460 nm až 1625 nm. Vlákna vhodná pro systémy hustého a hrubého vlnového multiplexu.
- G.657.A, vlákna určená pro přístupové sítě vykazující nízkou citlivost na ohyby.
- G.657.B, stejně jako G.657.A má totožné geometrické a mechanické parametry jako vlákna G.652.D. Chromatická ani polarizační vidová disperze nejsou pro toto vlákno definovány. Vlákna se využívají jen u opravdu krátkých spojů do stovek metrů.

## 1.2 Mnohovidová vlákna

Mnohovidová vlákna mají oproti jednovidovému vláknu řádově větší průměr jádra. Jednodušší výroba je vykoupena větším útlumem, disperzí a přenosovou kapacitou. V telekomunikacích se díky své nižší ceně využívají pro optické spoje na kratší vzdálenosti [5].

Vzhledem k zaměření práce na vysokorychlostní přenosové systémy bude v dalším textu rozuměno pod pojmem optické vlákno právě SM vlákno.

## 2 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN

Mechanismy v optických vláknech, které ovlivňují ty nejdůležitější přenosové parametry optického spoje, tvoří nejen útlum a disperze, ale současně i ty možná méně zřejmé jako jsou nelineární jevy.

### 2.1 Útlum optického vlákna

Útlum optického vlákna představuje jeden z nejdůležitějších faktorů určující možnost využití konkrétního vlákna v oblasti telekomunikací. Útlum signálu přenášeného optickým vláknem je stejně jako u metalických vodičů vyjádřen v logaritmických jednotkách decibelu (dB) jako poměr mezi vstupním (vysílaným) optickým výkonem a výstupním (přijímaným) optickým výkonem. V praxi se pak častěji používá vyjádření útlumu v decibelech na jednotku vzdálenosti (např. dB/km):

$$\alpha_{dB}L = 10 \log_{10} \frac{P_{vst}}{P_{výst}}, \quad (2.1)$$

kde  $\alpha_{dB}$  je útlum signálu v decibelech na jednotku vzdálenosti, označovaný často také jako útlum vlákna,  $L$  je délka optického vlákna,  $P_{vst}$  představuje vstupní výkon a  $P_{výst}$  výstupní výkon [18].

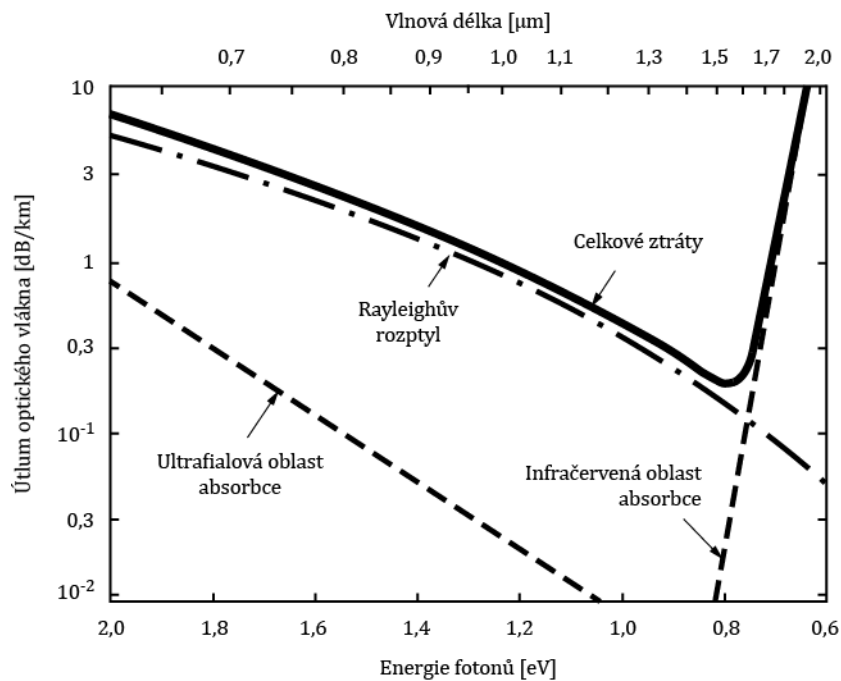
Jevy ovlivňující útlum optického vlákna lze rozdělit do těchto skupin:

- Materiálové absorpce.
- Materiálové rozptyly.
- Ztráty způsobené ohybem.

#### 2.1.1 Materiálové absorpce

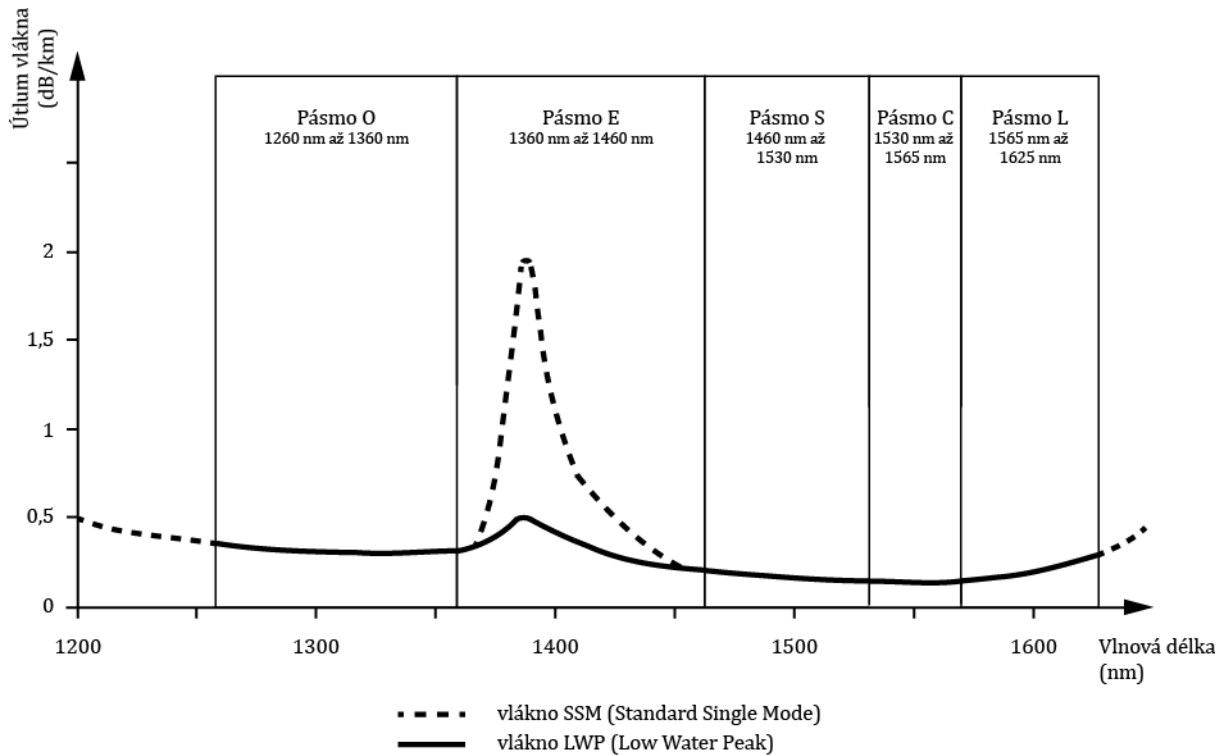
Ztráty způsobené materiálovou absorpcí souvisejí s technologickými procesy při výrobě a s použitým materiálem. Následkem materiálové absorpce je přeměna části vysílaného optického výkonu na teplo [10].

Vlastní materiálová absorpce je způsobena interakcí procházejícího světelného paprsku a základních stavebních atomů vlákna. Do této skupiny je řazena absorpce v infračervené oblasti, v ultrafialové oblasti a absorpce vlastním materiálem  $\text{SiO}_2$ . Charakteristika ztrát způsobených vlastní materiálovou absorpcí je znázorněna na obr. 2.1 [18, 5].



Obr. 2.1: Celkové ztráty způsobené vlastní materiálovou absorpcí [18]

Nevlastní materiálová absorpce je způsobena nečistotami (ionty kovů) při výrobě vlákna a vodními ionty OH. Účinky kovových nečistot lze eliminovat vhodně zvolenou technologií výroby. Jiná situace je v případě iontů OH. Tyto hydroxylové skupiny vázané ve struktuře skla vytváří mikrotrhliny, a proto jsou skleněná vlákna náchylná k praskání. Koncem 90. let minulého století byly technologické postupy eliminující příměsi OH při výrobě vláken zdokonaleny takovým způsobem, že lokální maximum útlumu na 1383 nm v podstatě zmizelo. Srovnání křivek útlumu standardního vlákna SSMF (Standard Single Mode Fiber) a vlákna LWPF (Low Water Peak Fiber) s potlačenými OH příměsemi je zobrazeno na obr. 2.2 [18].



Obr. 2.2: Srovnání útlumové křivky standardního jednovidového vlákna SSMF a vlákna LWPF [18]

LWPF vlákno umožňuje přenos optických signálů pro rozsah vlnových délek 1260 nm až 1675 nm se ztrátami pod 0,4 dB/km a umožňuje tak nasazení systémů vlnového multiplexu.

### 2.1.2 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. Charakteristika Rayleighova rozptylu je zobrazena na obr. 2.1. Charakteristickou vlastností těchto ztrát je všesměrovost a rychlý nárůst směrem k ultrafialové oblasti. Rayleighův rozptyl lze popsat koeficientem  $\gamma_R$ :

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_c k T_F, \quad (2.2)$$

kde  $p$  představuje fotoelastický koeficient a  $\beta_c$  isotermální stlačitelnost při teplotách  $T_F$ . Rayleighův rozptyl je tedy přímo úměrný osmé mocnině indexu lomu  $n$  a jeho účinnost klesá s převrácenou hodnotou čtvrté mocniny vlnové délky  $\lambda$ .

Rayleighův rozptyl nelze odstranit, lze jej pouze potlačit posunem pracovní frekvence k infračervené oblasti. V praxi je využíván při měřeních metodou OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) [18, 5].

Jsou-li nehomogenity srovnatelné s vlnovou délkou, jsou vznikající rozptylové ztráty označovány jako Mieho rozptyly. Příčinou těchto ztrát jsou nedokonalosti při výrobě vláken, jako je porušení geometrie, porušení tvaru, kolísání průměru jádra, mikroskopické trhlinky v materiálu jádra a další. Rozptyl se významně zvyšuje, pokud geometrické nepravidelnosti překročí desetinu vlnové délky. Mieho ztráty lze částečně eliminovat zdokonalením technologie výrobního procesu vlákna. U  $\text{SiO}_2$  vláken je minimum útlumu absorpcí a rozptylu situováno do oblasti 1500 nm [18, 5].

### 2.1.3 Nelineární rozptyly

Optické vlnovody nepředstavují vždy jen lineární přenosový kanál, kde množství výstupního optického výkonu je úměrné hustotě vstupního optického výkonu. S příchodem systémů vlnového multiplexu začaly být do přenosového řetězce začleňovány optické zesilovače, které několikanásobně zvyšují výkon ve vláknech. U systémů pracujících s několika desítkami kanálů s vysokými úrovněmi optického výkonu potom způsobují nelineární jevy nezanedbatelný útlum. Mezi nelineární rozptyly patří:

- Stimulovaný rozptyl.
- Brilluinův rozptyl.
- Ramanův rozptyl.

Při působení stimulovaného rozptylu dochází k rozptylu světelné vlny s kmitajícími atomy vlákna a to akusticky nebo tepelně. Působením rozptylu dochází k frekvenčnímu posuvu v dopředném směru (vlnové délky jsou posouvány směrem k vyšším hodnotám) [10, 5].

Brilluinův rozptyl SBS (Stimulated Brillouin Scattering) je způsobován interakcí akustických vln a teploty ve světlovodu se světelnou vlnou s vysokým (nadkritickým) výkonem. Působením rozptylu dochází k frekvenčnímu posuvu ve zpětném směru. Jev nabývá na významu především u signálů s úzkou spektrální šířkou a lze jej tedy poměrně účinně potlačit rozšířením spektra signálu [1, 18, 10].

Ramanův rozptyl SRS (Stimulated Raman Scattering) je způsobován interakcí světelných vln s kmitajícími molekulami světlovodného materiálu. Rozptýlená světelná vlna se šíří oběma směry. V praxi je tento jev využíván u jednovlákových vláken jako zesilující prvek [18, 10].

Kromě směru, kterým se šíří rozptýlená vlna, je další rozdíl mezi SRS a SBS v samotném posuvu frekvence emisního a excitačního maxima, v tzv. Stokesově posunutí (u SBS jde o 10 GHz, u SRS o 13 THz). SRS i SBS rozptyl lze využít v systémech, kde je zapotřebí zesílit signál optickou pumpou s vhodně zvolenou vlnovou délkou. Principu SRS využívá Ramanovský optický zesilovač [1, 18, 10].

#### 2.1.4 Ohybové ztráty

Ohybové ztráty jsou způsobené změnou úhlu šíření paprsku ve vlákne a tedy porušením podmínky totálního odrazu. Paprsek v takovém případě dopadá pod větším úhlem a láme se do pláště vlákna. Ohybové ztráty lze rozdělit do dvou skupin:

- Mikroohyby, u kterých je zakřivení menší než průměr jádra.
- Makroohyby.

Při zkoumání ohybových ztrát byl zaveden výraz kritický poloměr zakřivení, označující stoprocentní ztrátu energie. Kritický poloměr se u jednovidových vláken pohybuje kolem 10 mm, což je reálně dosažitelná hodnota, a proto se musí s tímto typem ztrát počítat při návrhu přenosových tras. Ohybové ztráty lze potlačit dvěma způsoby. Prvním je navržení optických tras s velkými poloměry zakřivení. V případě, že to není možné, lze zkrátit vlnovou délku. Zde ale vyvstávají problémy související s Rayleighovým rozptylem. V praxi se proto volí většinou kompromis mezi těmito dvěma metodami. Na druhou stranu lze ohybové ztráty využít pro potřeby měření [10].

## 2.2 Disperze optických vláken

Disperzní jevy jsou jedním z nejvíce limitujících faktorů při přenosech pomocí optických vláken. Nejedná se o ztráty v pravém slova smyslu. Disperze vln způsobuje zkreslení signálu, navázanou energii do vlákna rozprostírá v čase.

Obecně lze disperzní jevy rozdělit:

- Vidová disperze.
- Chromatická disperze.
- Polarizační vidová disperze.

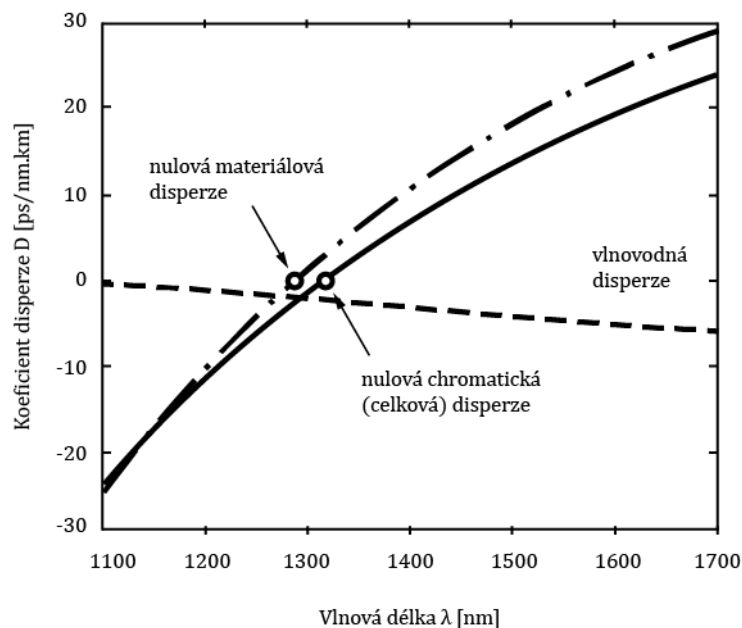
#### 2.2.1 Vidová disperze

Vidová disperze je způsobena různými časy šíření jednotlivých vidů různými optickými trasami, čímž dochází k rozšíření vstupního pulzu. Vidová disperze se vyskytuje pouze u MM vláken. U SM vláken je díky konstrukci jednovidových vláken odstraněna [18, 10].

## 2.2.2 Chromatická disperze

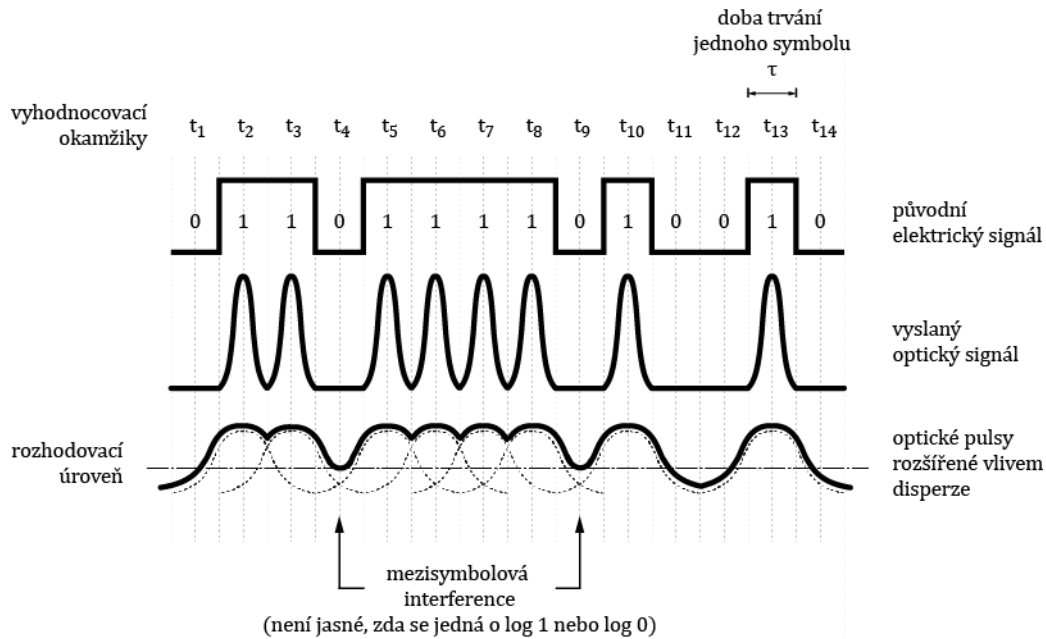
Chromatickou disperzi způsobuje materiál, z něhož je vlákno vyrobeno, a spektrální šířka použitého zdroje záření. Chromatická disperze se projevuje u všech typů vláken a je tvořena třemi složkami [10, 24]:

- Materiálová disperze, způsobená šířením paprsku složeného z mnoha vlnových délek, které se sklem šíří různou rychlostí. Na konci optického vlákna jsou potom jednotlivé složky spektra skládány s jiným časovým průběhem, než jaký měly na začátku.
- Profilová disperze, způsobená závislostí poměrného rozdílu indexu lomu jádra a pláště na vlnové délce. Profilová disperze nenabývá nijak významných hodnot a v praxi se většinou zanedbává.
- Vlnovodná disperze, způsobená tím, že světlo vedené jádrem zasahuje i do pláště SM vlákna. Vzhledem k tomu, že má plášť menší index lomu než jádro, šíří se impulsy v jádře jinou rychlostí než v plášti. Vlnovodná disperze má vždy zápornou charakteristiku (viz obr. 2.3). A protože je chromatická disperze součtem materiálové, vlnovodné a profilové disperze, umožňuje tak kompenzovat materiálovou disperzi.



Obr. 2.3: Celková disperze u jednovidových vláken [24]

Význam chromatické disperze a jejího měření vzrostl příchodem systémů hustého vlnového multiplexu. Signál při takovýchto přenosech obsahuje více spektrálních složek, z nichž se některé během přenosu optickým vláknem zpožďují. V takovém případě zdeformovaný (časově roztažený) impuls zasahuje do vedlejších bitových mezer a dochází ke zkreslení.



Obr. 2.4: Vliv disperze na optické pulsy (zmenšuje se jejich špičková velikost a zvětšuje se jejich šířka) [24]

Velikost chromatické disperze je definována tzv. koeficientem chromatické disperze:

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

kde  $\lambda$  značí vlnovou délku a  $t_g$  skupinové zpoždění signálu při průchodu vláknem. Spektrální oblast nad vlnovou délkou nulové chromatické disperze označujeme jako oblast s anomální chromatickou disperzí. Koeficient  $D(\lambda)$  je v tomto případě kladný, což znamená, že delší vlnové délky se ve vlákně zpožďují oproti kratším vlnovým délkám. Na druhou stranu je oblast se záporným koeficientem chromatické disperze označována jako oblast s normální chromatickou disperzí.

Potlačení chromatické disperze lze docílit vhodnou technologií výroby. Tato vlákna jsou označována jako vlákna s modifikovanou disperzní charakteristikou (dle ITU-T G.65x). Příkladem mohou být DS (Dispersion Shifted) vlákna s posunutou disperzí nebo vlákna DF (Dispersion Flattened) s rovnou disperzní charakteristikou.

Kompenzace chromatické disperze u starších, již položených vláken, je prováděna pomocí speciálních kompenzačních vláken DCF (Dispersion Compensation Fiber) nebo speciálních mnohovidových HOM (High Order Mode Fiber) vláken. Alternativu ke kompenzačním vláknům představuje u systémů vlnového multiplexu použití širokospektrálního kompenzátoru s Braggovskou mřížkou [5, 10].

### 2.2.3 Polarizačně-módová disperze

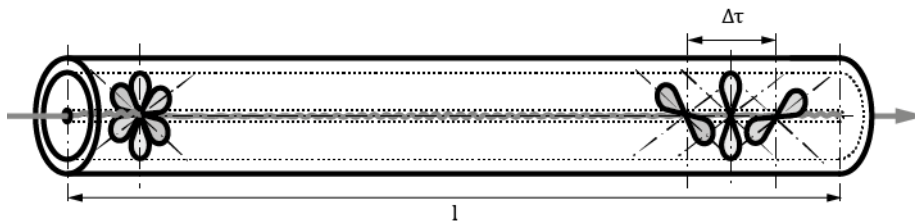
Polarizačně-módová disperze PMD (Polarization Mode Disperzion) vzniká jako náhodný jev vlivem anizotropie (rozdílný index lomu v osách  $x$  a  $y$  příčných ke směru šíření, viz obr. 2.5). Polarizačně-módová, někdy také označovaná jako polarizační vidová disperze, je vyjádřena pomocí koeficientu PMD. U kratších vzdáleností je PMD (ps/km) přibližně lineární a vypočítá se ze vztahu [5]:

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

kde  $\Delta\tau$  představuje zpoždění signálu a  $l$  délku trasy, viz obr. 2.5. U přenosů na větší vzdálenosti (nad 10 km) se PMD (ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ) nešíří lineárně, ale s odmocninou vzdálenosti [5]:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}} \quad (2.5)$$

Polarizační vidovou disperzi lze částečně potlačit, nelze ji však díky jejímu neustále měnícímu se charakteru odstranit [5, 10].



Obr. 2.5: Zpoždění  $\Delta\tau$  jednotlivých vidových složek způsobené vlivem polarizačně-módové (vidové) disperze optického vlákna [24]

## 2.3 Nelineární jevy v optických vláknech

Nelineární jevy v optických vláknech hrají důležitou roli při výzkumu vysokokapacitních a vysokorychlostních optických systémů.

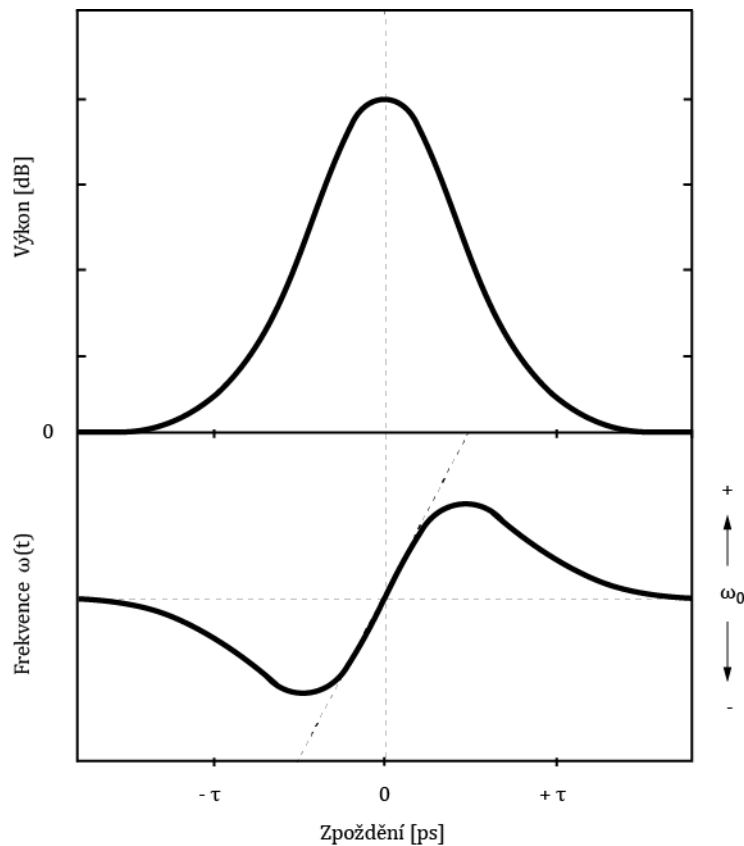
Na jednu stranu se velice brzy po tom, co byly nelineární jevy experimentálně dokázány, konstatuje, že mohou nepříznivě ovlivňovat přenosové parametry optických vláken. Zpočátku jsou sice považovány za irelevantní, nástupem systému vlnového multiplexu ale jejich význam roste. Včleňování optických zesilovačů a nasazení většího množství laserů sebou nese nezanedbatelný nárůst produkovaného výkonu do optických vláken. Nelineární jevy se tak stávají jedním z hlavních zdrojů zkreslení přenášeného signálu.

Na druhou stranu se role nelineárních jevů zásadně mění v oblasti optického zpracování signálů. Zde jsou naopak hledána taková vlákna, která účinky nelineárních jevů naopak podporují (tzv. vysoce nelineární).

Některé typy nelineárních jevů (stimulovaný rozptyl, Brilluinův rozptyl a Ramanův rozptyl) již byly popsány dříve [10, 5].

### 2.3.1 Vlastní fázová modulace

Vlastní fázová modulace SPM (Self Phase Modulation) popisuje změny frekvence způsobené změnou výkonu v jednom přenosovém kanálu. Při zvětšujícím se výkonu dochází k nárůstu frekvence. Naopak při poklesu výkonu dochází k poklesu frekvence. Vzhledem k binární povaze signálu, skládajícího se z maximálního a minimálního výkonu, dochází k tzv. frekvenčnímu chirpu. Na obr. 2.6 je znázorněna závislost frekvenčního chirpu na výstupním výkonu, času a tvaru pulsu.



Obr. 2.6: Závislost frekvenčního chirpu na výstupním výkonu, času a tvaru pulsu [26]

Frekvenční chirp naindukovaný SPM ovlivňuje pomocí GVD tvar pulsu, což vede k jeho rozšíření. Takovéto spektrální rozšíření zvyšuje šířku přenosového pásma a značně omezuje výkon. Obecně je snaha vliv SPM potlačit, na druhou stranu je jev využíván při solitonových přenosech, kdy jsou použity speciálně tvarované impulsy, které se díky SPM samy tvarují [10].

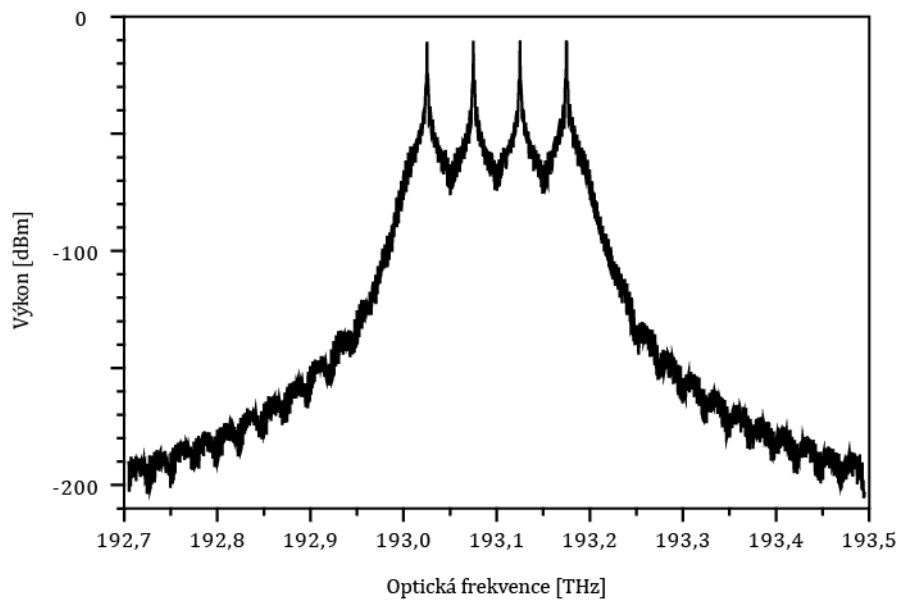
### 2.3.2 Křížová fázová modulace

Křížová fázová modulace XPM (Cross Phase Modulation) popisuje změny frekvence způsobené změnou výkonu v jiném přenosovém kanálu. Signál jedné vlnové délky je fázově modulován signálem jiné vlnové délky. Na rozdíl od SPM se vyskytuje pouze u vícekanalových systémů. Výsledné fázové změny jsou u XPM horší a rostou s počtem kanálů. Je tedy nutné v jednotlivých kanálech výkon regulovat. Například pro systém s 10 kanály by neměl výkon překročit hodnotu 1 mW, u systému se 100 kanály by neměl výkon překročit 0,1 mW [5, 10].

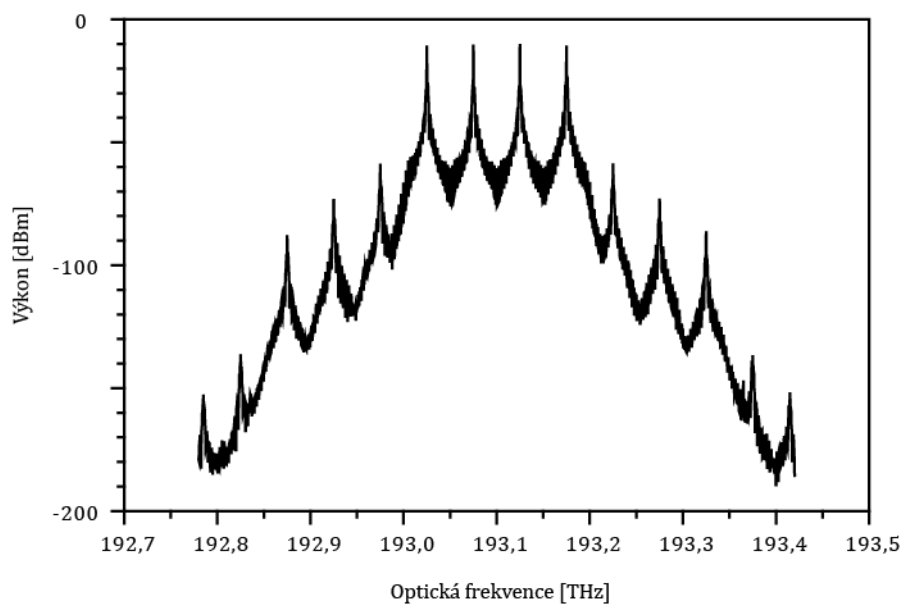
### 2.3.3 Čtyřvlnné směšování

Čtyřvlnné směšování FWM (Four Wave Mixing) řadíme mezi parametrické jevy. Jako parametrické označujeme takové nelineární jevy, které ke svému vzniku vyžadují úpravu určitých parametrů (index lomu a fázové sladění).

Negativně se FWM projevuje u systémů vlnového multiplexu. Jestliže jsou navázána tři dostatečně silná optická záření s různou optickou frekvencí, může dojít ke vzniku dalšího záření, viz obr. 2.7. Pokud leží frekvence takto generovaných záření blízko původních frekvencí, vznikají přeslechy a dochází k migrování výkonu z několika kanálů do jiného kanálu. Následkem toho se snižuje odstup signálu od šumu SNR (Signal to Noise Ratio) a roste bitová chybovost BER (Bit Error Ratio). Parametr FWM je velice důležitý u dnešních systémů hustého vlnového multiplexu a jeho význam roste úměrně s narůstajícím počtem kanálů a zmenšujícími se rozestupy mezi nimi [10].



a) Spektrum záření v optickém vlákně před FWM



b) Spektrum záření v optickém vlákně po FWM

Obr. 2.7: Simulace čtyřvlnného směšování interakcí čtyř vln v programu OptSim

Obecně je jako čtyřvlonné směřování označována interakce čtyř a více optických vln. Pro zjednodušení ale předpokládejme dvě optické vlny o různých frekvencích, obvykle nazývané signálová větev a čerpací větev, které vygenerují třetí vlnu označovanou jako idler. Výkon generované vlny lze vyjádřit pomocí rovnice [27]:

$$P_3(L) = (\gamma P_1(0) L_{eff})^2 P_2(0) \exp(-\alpha L) \eta, \quad (2.6)$$

kde  $L$  je délka vlákna,  $L_{eff}$  je efektivní délka,  $\alpha$  je útlum vlákna,  $P_1$  je výkon čerpací větve,  $P_2$  je výkon signálové větve a  $\eta$  je účinnost FWM. Účinnost čtyřvloného směřování je dána vztahem [25]:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left( 1 + \frac{4 \exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - \exp(-\alpha L))^2} \right), \quad (2.7)$$

kde  $\Delta\beta$  představuje podmínku fázového sladění. Účinnost FWM je závislá také na polarizaci čerpací a signálové větve (při ortogonální polarizaci větví je účinnost přibližně osmkrát menší). Optická frekvence vlny idler je ovlivněna frekvencemi čerpací a signálové vlny a lze ji vyjádřit [25]:

$$\omega_i = 2\omega_p - \omega_s, \quad (2.8)$$

kde jsou symboly  $\omega_i$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_s$  označeny frekvence idler, čerpací (pump) a signálové vlny.

### 3 MULTIPLEXNÍ PŘENOSOVÉ SYSTÉMY

Neustále rostoucí požadavky na přenosové kapacity telekomunikačních systémů vedou ke snaze co nejefektivněji využít možnosti přenosového média. Jednu z metod, jak maximálně využít nabízenou přenosovou kapacitu, představuje multiplexování signálů.

Multiplexování signálů umožňuje sdružit několik různých signálů tak, aby mohly být přenášeny společnou přenosovou cestou. Zařízení provádějící multiplexování se nazývá multiplexer (MUX) a zařízení pro převod signálu zpět na jednotlivé příspěvkové signály se nazývá demultiplexer (DEMUX).

Multiplexní přenosové systémy běžně klasifikujeme podle toho, jakým způsobem byly kanály pro přenos realizovány:

- Frekvenční multiplex.
- Vlnový multiplex.
- Časový multiplex.
- Prostorový multiplex.
- Hybridní multiplex.

Další kritérium představuje podoba signálů, kterou mají v procesu sdružování:

- Elektrické multiplexování založené na elektrickém zpracování signálů ESP (Electrical Signal Processing).
- Optické multiplexování založené na optickém zpracování signálů OSP (Optical Signal Processing).

Obecně musí multiplexní přenosové systémy splňovat podmínku ortogonality. Ta zajišťuje, aby při demultiplexování byly signály od sebe vždy správně odděleny. Pro libovolné dva signály  $f_m(t)$  a  $f_n(t)$  z množiny ortogonálních signálů tak musí platit:

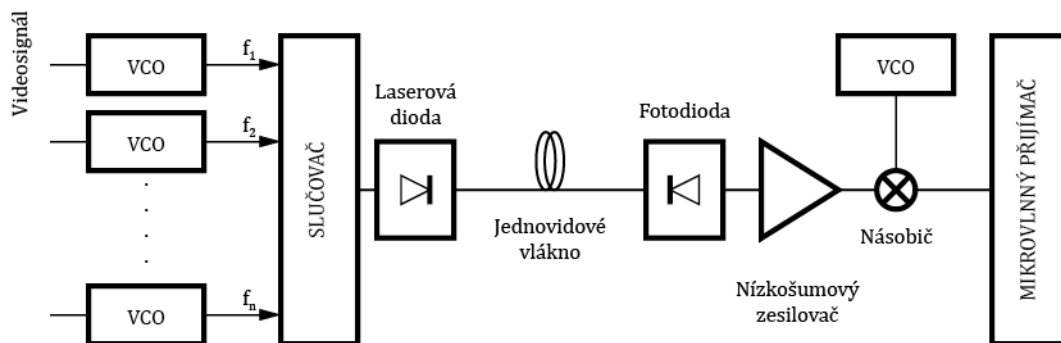
$$\int_0^T f_m(t) \cdot f_n(t) dt = \begin{cases} 0 & \text{pro } m \neq n \\ 1 & \text{pro } m = n \end{cases} \quad (3.1)$$

Systémy založené na frekvenčním multiplexování využívají ortogonality harmonických nosných signálů s různými kmitočty, systémy časového multiplexu ortogonality kanálových hradlovacích funkcí.

Důležitým parametrem pro zhodnocení kvality multiplexního přenosového systému je mezikanálová interference. Jde o míru přeslechů mezi jednotlivými optickými kanály. Obecně je tento parametr charakterizován relativním odstupem výkonu užitečného signálu od výkonu signálu rušivého. U jednotlivých typů sdružování signálu se přidávají i další specifická zkreslení. Zde platí, že přípustné hodnoty přeslechů jsou mnohem nižší u analogových signálů než u signálů číslicových.

### 3.1 Frekvenční multiplex

Systémy s frekvenčním multiplexem FDM (Frequency Division Multiplex) nejdříve jednotlivé signály namodulují na elektronické subnosné s rozdílnými kmitočty (tzv. Subcarrier Multiplexing, SCM), z nichž vytvoří skupiny, kterými je pak intenzitně modulován společný optický zdroj záření. Možnosti systému frekvenčního multiplexu limitují parametry zdrojů světelného záření. Technologie je využívána především pro přenos analogového i digitálního videosignálu (např. mnohokanálová TV). Obecné schéma přenosového systému je zobrazeno na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Obecné schéma SCM systému pro přenos videosignálu [23]

### 3.2 Vlnový multiplex

Technologie vlnového multiplexování je založena na schopnosti optického vlákna přenášet současně více vlnových délek. V tomto ohledu je koherentní k systému frekvenčního multiplexu. Každá vlnová délka představuje samostatný spektrální přenosový kanál.

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

$$C = \sum_{k=1}^N v_k, \quad (3.2)$$

kde  $v_k$  je přenosová rychlost  $k$ -tého kanálu a  $N$  je celkový počet kanálů. V případě, že mají všechny kanály stejnou přenosovou rychlost, je kapacita  $C$  rovna:

$$C = N \cdot v. \quad (3.3)$$

Spektrální účinnost  $\eta$  (b/s/Hz) systému vlnového multiplexu je rovna:

$$\eta = \frac{C}{\sum_{k=1}^N \Delta B_k}, \quad (3.4)$$

kde  $C$  je celková přenosová kapacita,  $N$  je celkový počet kanálů a  $\Delta B_k$  je vyhrazená šířka pásma  $k$ -tého kanálu (bez ohledu na to, zda kanál celé toto pásmo zaplní, či ne).

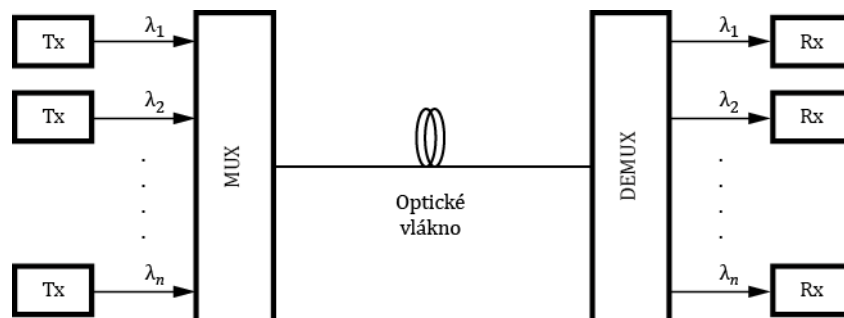
Technologie vlnového sdružování poskytuje oproti jiným přenosovým systémům několik výhod:

- Umožňuje navyšování kapacity existujících sítí bez potřeby finančně náročného přidávání nebo dokonce kompletní výměny optických kabelů.
- Umožňuje volit počet přenosových kanálů podle potřeby.
- Díky plně transparentnímu přenosu je protokolově nezávislá.
- Poskytuje vynikající poměr ceny a výkonu.

Tyto faktory umožnily vlnovému multiplexu poměrně rychlý komerční úspěch a velký počet implementací ve stávajících sítích. Kromě dálkových přenosů v rámci páteřních přenosových sítí mezinárodních operátorů se technologie vlnových multiplexů dnes již běžně objevují v metropolitních a v přístupových sítích [7, 5, 19].

### 3.2.1 Princip vlnového multiplexu

Obecný model optického spoje vlnového multiplexu je tvořen  $n$  vysílači a  $n$  modulátory o různých vlnových délkách napojených do multiplexeru. Na druhé straně optického spoje pak bude připojen demultiplexer vydělující jednotlivé vlnové délky pro příslušných  $n$  přijímačů. Princip vlnového multiplexu je zobrazen na obr. 3.2, kde je pro zjednodušení znázorněn pouze jeden směr přenosu. Optické vlny představující jednotlivé kanály jsou označeny řeckým písmenem  $\lambda$ .



Obr. 3.2: Obecné schéma vlnového multiplexu [5]

Jejich počet a umístění v jednotlivých oblastech okna je dán technologickými možnostmi jak samotného vlákna (útlum, disperze), tak jednotlivých prvků optického přenosového systému:

- Šířkou spektra emitovaného záření  $\Delta\lambda$  při použití laserových diod jako zdroje záření.
- Přesností a stálostí střední hodnoty vlnové délky emitovaného záření  $\lambda_{stř}$  při použití laserových diod jako zdrojů záření.
- Vlnovou selektivitou optických filtrů v multiplexeru a demultiplexeru [5].

Důležitým parametrem je i jejich vzájemný odstup  $\Delta\lambda$  (nm), který je definován jako rozdíl dvou blízkých vlnových délek optického záření:

$$\Delta\lambda = \lambda_{j+1} - \lambda_j. \quad (3.5)$$

Hodnotu odstupů  $\Delta\lambda$  ovlivňují použité zdroje záření a konstrukční řešení optických multiplexerů a demultiplexerů [5].

### 3.2.2 Vývoj systémů vlnového multiplexu

Původní vlnový multiplex bývá také někdy označován jako Simple nebo Sparse WDM. Pro přenos využívá dvě, případně tři vlnové délky. Při nasazení na vícevidovém MM vlákne jsou využívány vlnové délky 850 nm a 1300 nm, u jednovidových SM vláken to jsou vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Technologie se často využívá při požadavku na duplexní režim přenosu, jak je zobrazeno na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Duplexní režim provozu realizován technologií WDM [5]

Dále je nasazována například při distribuci videosignálu v systémech PON (Passive Optical Network). Zde se ale využívají tři vlnové délky: 1310 nm a 1490 nm pro přenos dat a 1550 nm pro přenos videosignálu [5, 23, 3].

### 3.2.3 Široký vlnový multiplex

Technologie širokého vlnového multiplexu WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex) představuje další variantu vlnového sdružování. Nejčastěji se používají čtyři vlnové délky v oblasti 1310 nm, s vícevidovými vlákny je možné ještě využít oblast 850 nm. Typická hodnota odstupů  $\Delta\lambda$  mezi jednotlivými vlnovými délkami je 25 nm. Technologie nachází uplatnění v gigabitových a desetigigabitových ethernetových sítích. [5, 19].

### 3.2.4 Hustý vlnový multiplex

Technologie hustého vlnového multiplexu DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) dnes představuje nejvyspělejší variantu WDM. Komerční DWDM systémy dnes umožňují přenášet až 80 kanálů, z nichž každý je schopen dosáhnout přenosovou rychlost 40 Gb/s. Takový systém svou celkovou kapacitou převyšuje 3 Tb/s na vlákno a je schopen překlenout vzdálenost přesahující 2000 km. Dosáhnutí těchto přenosových kapacit umožnily nové lasery s extrémně úzkou spektrální čarou, erbiem dopované vláknové zesilovače a vysoce selektivní filtry [19, 12].

Zpočátku představovaly oblast implementace DWDM především páteřní sítě na překlenutí dlouhých vzdáleností. Zde se kromě erbiem dopovaných vláknových zesilovačů používaly pro extrémně dlouhé trasy i Ramanovské zesilovače.

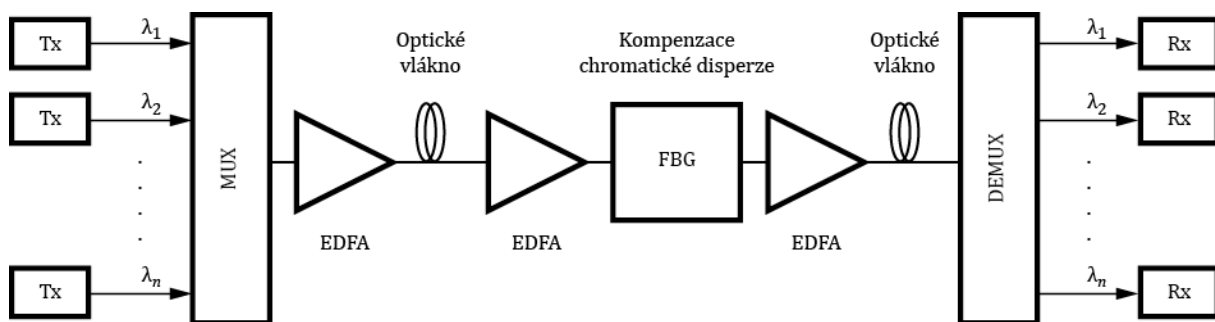
V posledních letech se zájem výrobců i operátorů zaměřuje na nasazení DWDM v metropolitních a přístupových sítích. Zde lze najít dva rozdílné technologické přístupy k implementaci. První představuje modifikovanou variantu DWDM využívaných u páteřních sítí. Vlnový multiplex slouží především ke zvyšování přenosové kapacity přidáváním kanálů. Druhý konstrukční přístup integruje do technologie DWDM další funkce, kterými posouvá přenosovou technologii směrem k vyšším vrstvám OSI modelu (např. IPoDWDM). Dalším trendem je možnost selektivního začlenění spektrálního kanálu mezi jednotlivými síťovými prvky, odpadá tak potřeba přidávat transpondéry do každého síťového prvku v rámci DWDM sítě. Pro nasazení

DWDM v metropolitních sítích je výhodné využít oblasti 1530 nm až 1565 nm pásma C z důvodu dostatečné nabídky cenově dostupných komponent (SFP a XFP provedení výměnných transceiverů, vláknových zesilovačů pro pásmo C) [5, 19, 12, 22].

ITU-T vydala pro technologii DWDM doporučení G.694.1 – Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, kde jsou specifikovány hodnoty minimálního odstupu  $\Delta\lambda$  mezi jednotlivými vlnovými délkami (0,8 nm, 0,4 nm, 0,2 nm, 0,1 nm). V doporučeních ITU-T jsou kromě hodnot nominálních vlnových délek uváděny i odpovídající frekvence. Vzájemný vztah odstupu vlnových délek a frekvencí je dán rovnicí:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda \cdot \Delta f}{f}, \quad (3.6)$$

kde  $\Delta\lambda$  je hodnota odstupu vlnových délek,  $\Delta f$  je hodnota odstupu frekvencí,  $\lambda$  a  $f$  jsou hodnoty jednotlivých vlnových délek a frekvencí. Směrnice specifikuje přenosové kanály v rozsahu vlnových délek od 1490 nm do 1620 nm v pásmech S, C a L. Příklad multiplexního systému DWDM je zobrazen na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Příklad multiplexního systému DWDM s kompenzací disperze pomocí vláknové mřížky FBG [18]

### 3.2.5 Hrubý vlnový multiplex

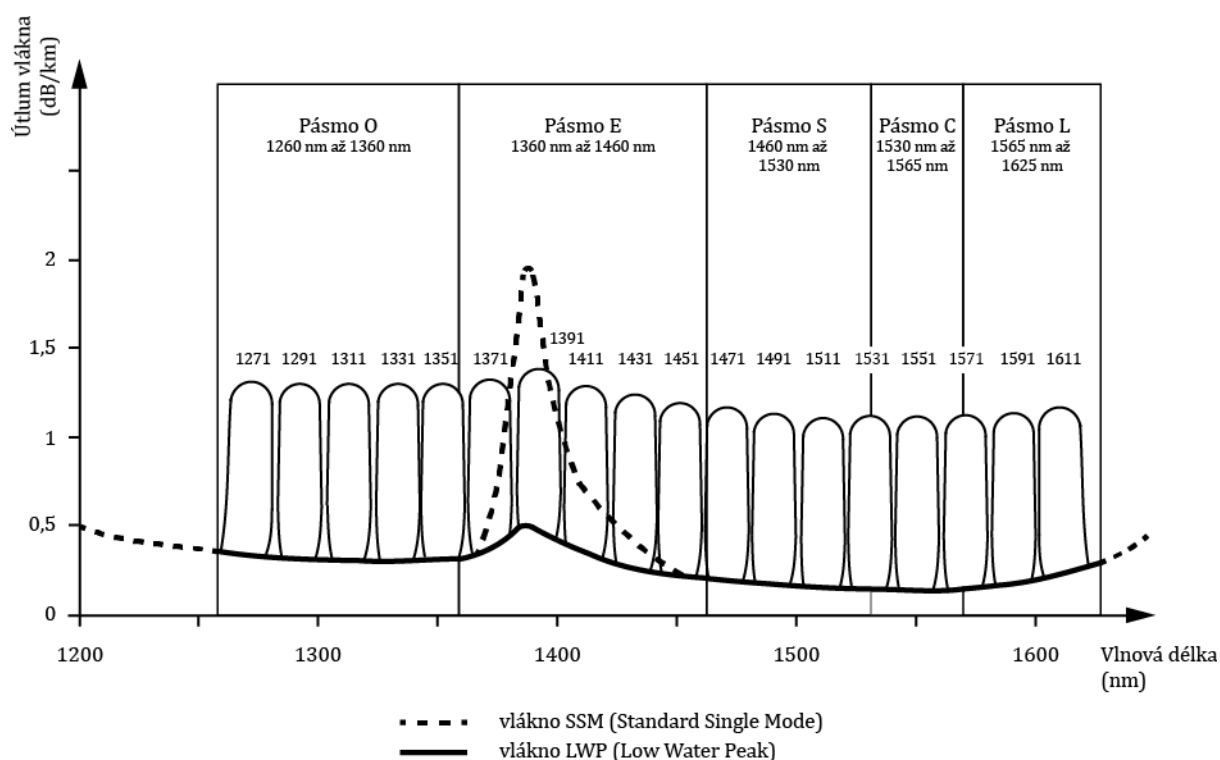
Technologie CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) představuje levnější variantu DWDM. To je dáno větší hodnotou odstupu mezi jednotlivými přenosovými kanály a v návaznosti na to i mírnější požadavky na jednotlivé prvky přenosového systému. Technologie například umožňuje využít jako zdroje záření laserové diody bez nutnosti chlazení.

ITU-T vydala pro technologii CWDM doporučení G.694.2 – Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid, kde jsou pevně specifikovány hodnoty jednotlivých vlnových délek v rozsahu od 1270 nm do 1610 nm s minimální hodnotou odstupu  $\Delta\lambda = 20$  nm, viz tab. 3.1. Vlnové délky byly voleny s ohledem na kompatibilitu s používanými vlnovými délkami 1310 nm a 1550 nm [19, 21].

V praxi optický multiplexer pracuje s vlnovou délkou posunutou o 1 nm oproti nominální vlnové délce laseru. Příčinou jsou teplotní posuny laserových zdrojů záření. S těmito posunutými hodnotami  $\lambda_{stř}$  vlnových délek (obr. 3.5) je nutné také počítat při praktickém návrhu kombinace systémů CWDM a DWDM.

Tab. 3.1: Tabulka vlnových délek CWDM podle doporučení ITU-T G.694.2 [19, 21]

| Kód kanálu CWDM | Nominální vlnová délka [nm] | Rozdělení spektra jednovidového vlákna 9/125 $\mu\text{m}$  |
|-----------------|-----------------------------|---|
| 27              | 1270                        | O (Original), 1260 nm až 1360 nm.<br>Původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm.                                     |
| 29              | 1290                        |   |
| 31              | 1310                        |   |
| 33              | 1330                        |   |
| 35              | 1350                        |   |
| 37              | 1370                        | E (Extended), 1360 nm až 1460 nm.<br>Pásmo využitelné pouze s vlákny typu „Low Water Peak“ standardu ITU-T G.652.C. |
| 39              | 1390                        |   |
| 41              | 1410                        |   |
| 43              | 1430                        |   |
| 45              | 1450                        |   |
| 47              | 1470                        | S (Short), 1460 nm až 1530 nm.<br>Pásmo kratších vlnových délek, obvykle využíváno CWDM.                            |
| 49              | 1490                        |   |
| 51              | 1510                        |   |
| 53              | 1530                        |   |
| 55              | 1550                        |   |
| 57              | 1570                        | C (Conventional), 1530 nm až 1565 nm.<br>L (Long), 1565 nm až 1625 nm.<br>Pásmo dlouhých vlnových délek.            |
| 59              | 1590                        |   |
| 61              | 1610                        |   |



Obr. 3.5: Vlnové délky jednotlivých CWDM posunutě o 1 nm oproti nominálním hodnotám v doporučení ITU-T G.694.2 [18]

Uplatnění nachází CWDM v metropolitních sítích ať již samostatně nebo v kombinaci s hustým vlnovým multiplexem [19, 21]. Srovnání vybraných parametrů technologií CWDM a DWDM je uvedeno v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Srovnání vybraných parametrů komerčních implementací CWDM a DWDM [15]

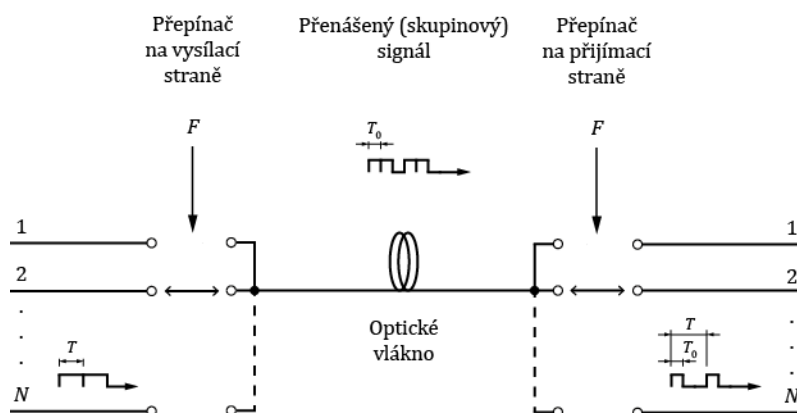
| Parametr           | CWDM<br>(metropolitní síť) | DWDM<br>(metropolitní síť) | DWDM (páteřní<br>transportní síť) |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Počet kanálů       | 4 až 16                    | 32 až 80                   | 80 až 160                         |
| Kapacita kanálu    | 1,5 Gb/s                   | 10 Gb/s                    | 40 Gb/s                           |
| Odstup mezi kanály | 20 nm                      | 0,8 nm                     | 0,4 nm                            |
| Využitelná pásma   | O, E, S, C, L              | C, L                       | C, L, S                           |
| Kapacita vlákna    | Desítky Gb/s               | Stovky až tisíce Gb/s      | Jednotky Tb/s                     |
| Dosah              | Desítky kilometrů          | Stovky kilometrů           | Tisíce kilometrů                  |
| Typ laseru         | Nechlazený DFB             | Chlazený DFB               | Chlazený DFB                      |
| Optický zesilovač  | Žádný                      | EDFA                       | EDFA, Ramanovský<br>zesilovač     |

### 3.3 Časový multiplex

Technika optického časového sdružování signálů OTDM (Optical Time Division Multiplexing) je principiálně stejná jako u elektrického TDM (Time Division Multiplexing). Nejjednodušší případ synchronního časového sdružování je zobrazen na obr. 3.6, kdy taktovací kmitočty všech sdružovaných signálů jsou stejné, tj.

$$F_j = F \text{ pro } j = 1, 2, \dots, N. \quad (3.7)$$

Sdružování je realizováno pomocí jednoduchého přepínače představujícího multiplexer. 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  $F$  [20].



Obr. 3.6: Princip přenosového systému TDM [20]

Během jednoho přepínacího cyklu je vytvořen skupinový (přenášený) signál s taktovacím kmitočtem

$$F_{sk} = N \cdot F, \quad (3.8)$$

přičemž je jednotlivým kanálům během přepínacího cyklu vyhrazen časový interval  $T_0$ . Tento časový interval se pro každý sdružovaný signál opakuje  $F$  krát za sekundu:

$$T_0 = \frac{1}{N \cdot F} = \frac{1}{F_{sk}}. \quad (3.9)$$

Popsaná technika multiplexování, kdy je v časovém intervalu přenášen jeden symbol sdružovaného signálu, se nazývá sdružování bit po bitu [20].

V případě potřeby zachování určité vnitřní struktury sdružovaných signálů je možné sdružovat do vytvářeného signálu celé skupiny  $n$  bitů jako celky. Přenášený signál potom bude mít taktovací kmitočtet:

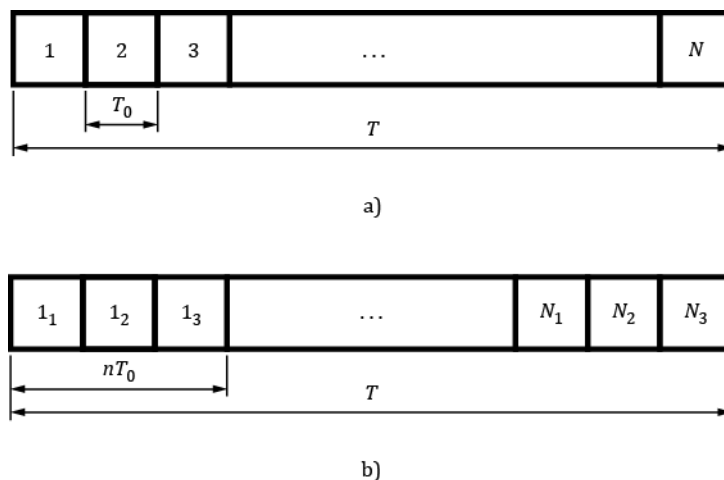
$$F_{sk} = n \cdot N \cdot F, \quad (3.10)$$

kde  $n$  je počet bitů, které se sdružují jako celek. Doba trvání  $T_0$  jednoho symbolového místa přenášeného signálu je:

$$T_0 = \frac{1}{n \cdot N \cdot F} = \frac{1}{F_{sk}}. \quad (3.11)$$

Takový způsob multiplexování se nazývá sdružování po blocích (sdružování po kódových skupinách) [20].

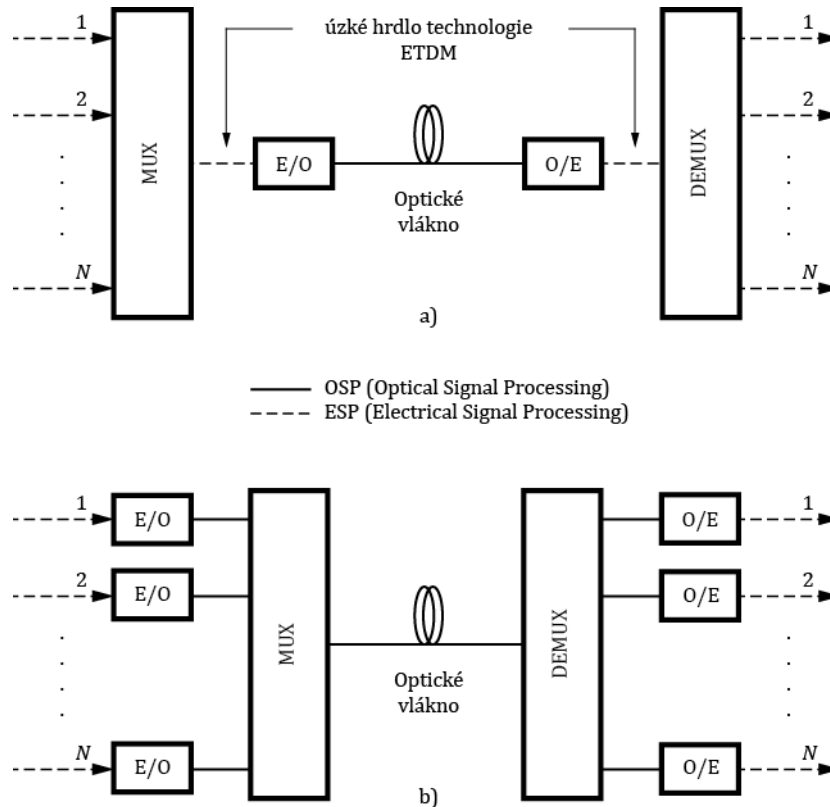
Jeden přepínací cyklus rozdělený na časové intervaly je označován jako časový rámeček multiplexního signálu. Na obr. 3.7 jsou vyobrazeny časové rámečky pro sdružování bit po bitu (a) a sdružování po blocích (b).



Obr. 3.7: Časové rámečky pro sdružování a) bit po bitu nebo b) po blocích [20]

Základním principem časového sdužování je tedy synchronně alokovat jednotlivé datové toky do časových rámců v přenášeném signálu. Jak již bylo řečeno, multiplexer sdužuje signály o nižší přenosové rychlosti do jednoho vysokorychlostního signálu. Na druhé straně přenosového spoje tyto signály demultiplexer vyděluje zpět.

Rozdíl ve zpracování signálů mezi oběma technologiemi je zobrazen na obr. 3.8.



Obr. 3.8: Rozdílné přístupy ke zpracování signálů u technologií a) ETDM a b) OTDM

U elektrického časového multiplexu ETDM probíhá sdužování signálů v elektrické doméně ESP před převodníkem E/O (převádí elektrický signál na optický). Na opačném konci spoje je prováděno demultiplexování až za převodníkem O/E (převádí optické impulsy na elektrické). Právě tyto části systému (mezi MUX a E/O a mezi O/E a DEMUX) vytvářejí úzká hrdla. ESP zpracování se zde musí vyrovnávat s požadovanými vysokými přenosovými rychlostmi přenášeného signálu a je limitováno:

- Rychlostí použitých integrovaných obvodů.
- Rychlostí výkonných nízkošumových lineárních zesilovačů používaných zdroji záření a modulátory v E/O a O/E převodnících.
- Modulační šířkou pásma laserů a modulátorů.
- Citlivostí detektorů.

Experimenty dokazují, že elektronické systémy jsou schopny dosahovat maximální přenosové rychlosti do 10 Gb/s.

U optického časového multiplexu byla úzká hrdla ETDM odstraněna posunutím převodníků směrem k vysílačům a přijímačům. Signál je sdružován až za E/O převodníkem a vydělován před O/E převodníkem. Multiplexování a demultiplexování tak kompletně probíhá v optické doméně OSP (Optical Signal Processing). ESP tak zpracovává elektrické impulsy s nižšími přenosovými rychlostmi jednotlivých sdružovaných signálů.

Další důležitý rozdíl mezi systémy ETDM a OTDM je v přenášeném signálu. V systému elektrického časového multiplexu je po multiplexování signál v převodnících zesílen a přenášený signál není ovlivněn sdružováním. V přijímací části ETDM je přenesený signál 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.

### 3.4 Prostorový multiplex

Další metodu představuje prostorový multiplex SDM (Space Division Multiplex). Jde o triviální metodu, kdy pro každý multiplexovaný kanál je vyhrazeno jiné médium. U optoelektronických přenosových systémů je každý kanál přenášen vlastním optickým vláknem [5].

### 3.5 Hybridní multiplex

Hybridní multiplex je název pro kombinaci dvou a více multiplexních systémů. Hybridní multiplexní systém může vzájemně kombinovat elektrické ESP a optické OSP multiplexy. Nejběžnějším příkladem hybridního sdružování jsou kombinace WDM s OTDM, OCDM nebo SCM. Časté jsou také kombinace jednotlivých variant vlnového multiplexu, např. DWDM a CWDM [18].

## 4 ZÁKLADNÍ PRVKY MULTIPLEXNÍ PŘENOSOVÝCH SYSTÉMŮ

Současný vývoj v oblasti integrované optiky vede k architektuře vysílače jako jednoho integrovaného zařízení s funkcemi zdroje záření, modulátoru, zesilovače a případně i multiplexeru. Na přijímací straně představuje integrovaný přijímač funkce demultiplexeru a detektoru. Nicméně i přes tuto integraci si zachovávají jednotlivé prvky svoje charakteristické přenosové vlastnosti. Nejobecnější rozdělení prvků multiplexních přenosových systémů je na dvě skupiny podle toho, jak dalece jsou schopny ovlivnit záření:

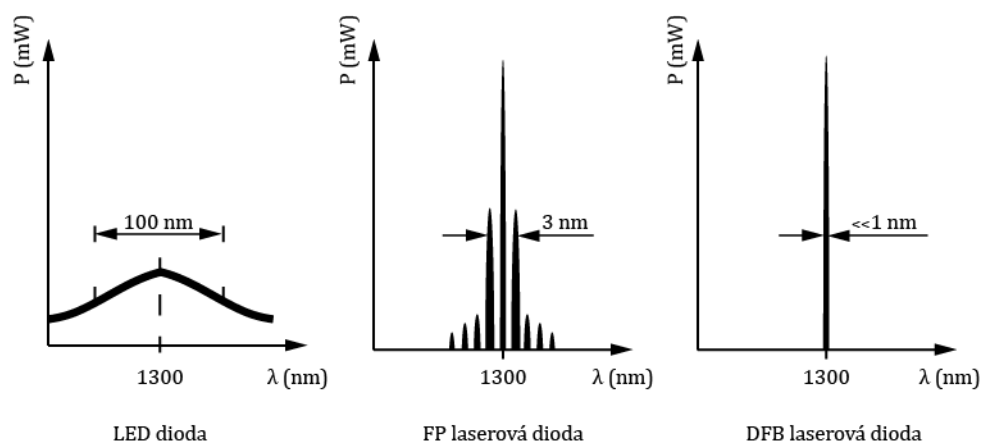
- Aktivní prvky (zdroje záření, modulátory, detektory, optické zesilovače).
- Pasivní prvky (multiplexery, rozbočovače, optické cirkulátory aj.).

### 4.1 Zdroje záření

Základní funkcí zdroje záření v optoelektronice je převod signálu nesoucího informaci z elektrické formy do optické (fotonický měnič). K požadavkům na zdroje záření patří:

- Dostatečný a konstantní generovaný optický výkon.
- Frekvenční teplotní a proudová stabilita.
- Přeladitelnost.
- Úzká spektrální čára.
- Co nejmenší podíl spontánní emise záření.

Dva základní typy zdrojů záření používaných v telekomunikacích představují diody LED (Light Emitting Diode) a laserové diody LD (Laser Diode). LED jsou používány jako zdroje záření pro optoelektronické přenosové systémy s nižšími přenosovými rychlostmi (do 200 Mb/s) a na kratší vzdálenosti v řádech stovek metrů. Laserové diody nacházejí využití u systémů s vyššími rychlostmi a na mnohem delší vzdálenosti. Srovnání spekter jednotlivých typů zdrojů záření je zobrazeno na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Spektra jednotlivých zdrojů záření [5]

Mezi nejčastěji používané typy laserových diod u vysílačů systémů vlnového multiplexu patří:

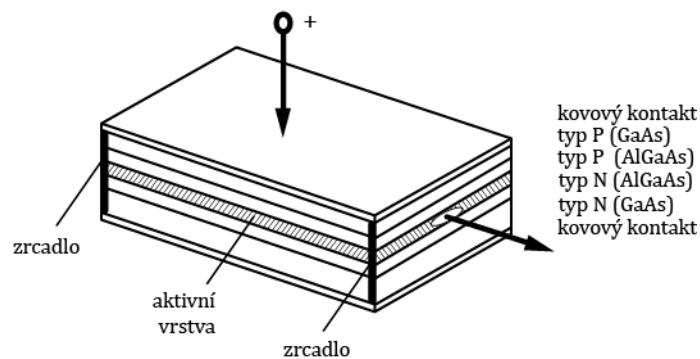
- Fabry-Perotovy laserové diody.
- Laserové diody s rozloženou zpětnou vazbou.

- Plošně vyzařující lasery.

Sporadicky se lze setkat i s některými dalšími typy laserů jako např. laser s vláknovou Braggovou optickou mřížkou FGL (Fibre Bragg Grating Laser), EA-EML (Electro Absorption-Based Externally Modulated Laser) a vláknovými lasery (např. erbiem dopované) [2, 6].

#### 4.1.1 Fabry-Perotovy laserové diody

Fabry-Perotův laser patří mezi nejjednodušší zdroje záření používané u optických komunikačních systémů. Struktura FP laseru je zobrazena na obr. 4.2.

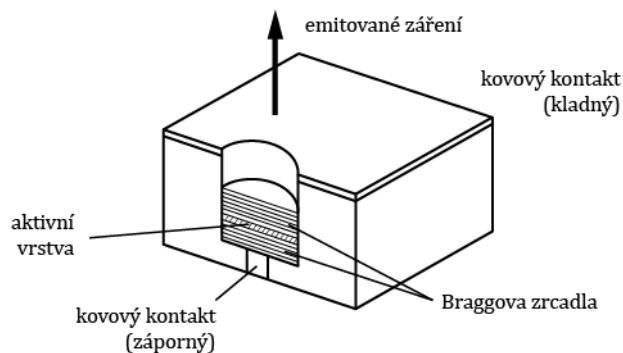


Obr. 4.2: Struktura Fabry-Perotova laseru [11]

FP laser patří do skupiny MLM (Multi Longitudinal Mode) laserů. Při vyzařování vzniká několik podélných módů (viz obr. 4.1) a výsledná spektrální šířka je přibližně 2 nm až 3 nm. Při dosažení prahového proudu 10 mA je vyzářen výkon 5 mW až 10 mW. Při zvyšování napájecího proudu dochází také k nárůstu počtu módů, což vede k dalšímu rozšiřování spektrální šířky. Vzhledem k jednoduché konstrukci bez optického izolátoru na výstupu jsou FP lasery méně citlivé na odrazy. Laser je bez teplotní stabilizace, hodnota střední vlnové délky se při změně provozní teploty o 1° C posune o 0,4 nm směrem k delším vlnovým délkám. Použití FP laseru v rámci technologie WDM je tak díky této velké teplotní závislosti poněkud omezené. V praxi se v podstatě uplatňují pouze u jednovláknových spojů na kratší vzdálenosti. Nicméně nízká disperzní tolerance umožňující provoz v blízkosti disperzního minima optického vlákna (např. 1310 nm u standardního jednovláknového vlákna) dovoluje nasazení laseru například v klientských rozhraních CWDM systému, kde je primárním parametrem cena [5, 8, 11].

#### 4.1.2 Plošně vyzařující lasery

Laser VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) patří mezi ty zdroje záření, které emitují záření z plochy součástky rovnoběžné s rovinou přechodu, viz obr. 4.3.



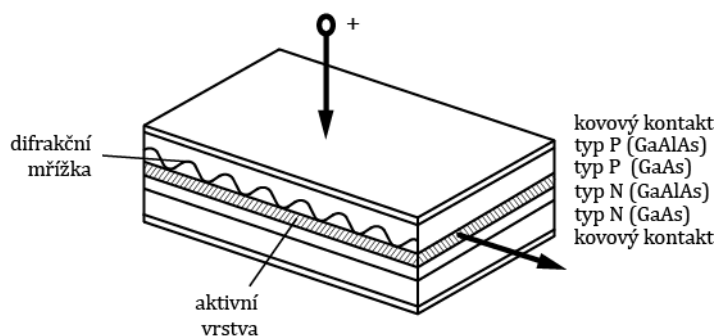
Obr. 4.3: Struktura VCSEL laseru [11]

Emitované záření může být pohlceno substrátem a ztraceno, nebo je odraženo od kovového kontaktu. Tento způsob emitování dosahuje při vyzařování do optického vlákna účinnost až 80% a je účinnější než u hranově emitujících laserových diod. Jednokroková epitaxní technologie výroby je velmi dobře zvládnutá a podepsala se i na výsledné ceně laserů. Bez teplotní stabilizace je schopen pracovat až do 90°C [8, 11].

Navzdory pokrokům ve výrobní technologii a experimentálním přenosům s rychlostí 10 Gb/s zůstává nasazení laseru u systému WDM problematické, neboť lasery jsou dostupné pouze pro oblasti vlnových délek kolem 850 nm, 1310 nm a 1550 nm. Lasery VCSEL zatím tedy představují spíše vhodnou náhradu za FP lasery (za srovnatelnou cenu vyšší výkon) ve vysílačích pro přístupové sítě [5, 8, 11].

#### 4.1.3 Laserové diody s rozloženou zpětnou vazbou

Dnešním požadavkům systémů vlnového multiplexu nejlépe vyhovují laserové diody typu DFB (Distributed FeedBack), tedy laserové diody s rozloženou zpětnou vazbou. V rámci systémů WDM pokrývají všechny oblasti implementací od CWDM (bez chlazení) po WWDM (s chlazením). Schéma DFB laseru je zobrazeno na obr. 4.4 [7, 11].



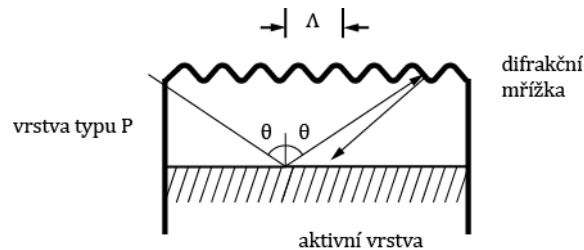
Obr. 4.4: Schéma DFB laseru [5, 11]

U DFB laseru je rezonátorem tzv. difrakční mřížka naleptaná na povrch aktivní vrstvy. Princip fungování je založen na opakované změně indexu lomu ve směru šíření. Difrakční (Braggova) mřížka funguje jako zrcadlo, které selektivně odráží pouze jednu vlnovou délku  $\lambda_B$ . Tu lze určit pomocí následující rovnice:

$$\lambda_B = 2\Lambda \cdot n \cdot \sin \theta, \quad (4.1)$$

kde  $\Lambda$  je perioda mřížky a  $n$  představuje index lomu [11].

Zpětná vazba pak vzniká Braggovským rozptylem vlny do opačného směru. Princip činnosti rozložené zpětné vazby je znázorněn na obr. 4.5 [5, 11].



Obr. 4.5: Princip činnosti rozložené zpětné vazby [11]

Pod označením rozložená zpětná vazba se skrývá návrat odražených stimulovaných fotonů difrakční mřížkou směrem k aktivní vrstvě. Vlnitá struktura mřížky zabezpečuje za předpokladu platnosti rovnice 4.1, že většina světelných paprsků se odrazí zpět. Slovo rozložená (Distributed) znamená, že odraz nenastává tak jako u Fabry-Perotova laseru v jednom místě (v zrcadle), ale rozptýleně na mnoha místech podél celé aktivní oblasti. Výsledkem tohoto uspořádání je, že  $\lambda_B$  laser vyzařuje pouze jednu vlnovou délku rovnající se  $\lambda_B$ . Ta je vyzařována v jednomódovém režimu SML (Single Mode Longitudinal) s velmi úzkou spektrální šířkou, viz zobrazené spektrum DFB laseru na obr. 4.1.

Laserové diody DFB byly navrženy již na počátku 60. let minulého století, komerčního úspěchu se však dočkaly až o dvacet let později. Dnešní typy dosahují velmi úzké spektrální čáry (menší než 1 nm) a poskytovaná šířka pásma se pohybuje v řádech jednotek až desítek gigahertzů. Díky komplikovanější konstrukci jsou DFB v porovnání s FP a VCSEL lasery dražší. Cena však odpovídá mnohem vyšším výkonům.

DFB lasery jsou běžně používány pro vlnové délky pásma C v oblasti 1530 nm až 1565 nm a v oblasti 1310 nm pro starší přenosové systémy. Jejich použitelnost ale sahá až do pásma L. Pro nasazení v páteřních sítích s přenosy na velké vzdálenosti a s požadavkem na velmi vysoký optický výkon jsou uspořádány desítky až stovky DFB laserových diod do tzv. polí (LD Arrays, LD Bars) s celkovými výkony v řádech stovek wattů. Lasery jsou nepřímo modulovány externími modulátory. U systémů určených pro metropolitní síť s kratším dosahem je použita technika přímé modulace řídicím proudem [11, 2].

Modifikaci myšlenky použití difrakčních mřížek přinesly laserové diody DBR (Distributed Bragg Reflector). U těchto laserů je aktivní vrstva umístěna mezi dvěma difrakčními mřížkami.

## 4.2 Detektory

Základní funkcí detektoru je převod optického signálu na elektrický. PIN diody a lavinové fotodiody APD (Avalanche PhotoDiode) jsou dva nejběžnější detektory používané v optických komunikačních systémech. Fotodetektory si lze v podstatě představit jako proudové zdroje s lineární závislostí mezi množstvím přijímaného optického záření a výstupním proudem. Tato

závislost mezi vstupním optickým zářením a výstupním proudem má u APD nelineární charakter. Díky tomu mají APD detektory vyšší citlivost [5].

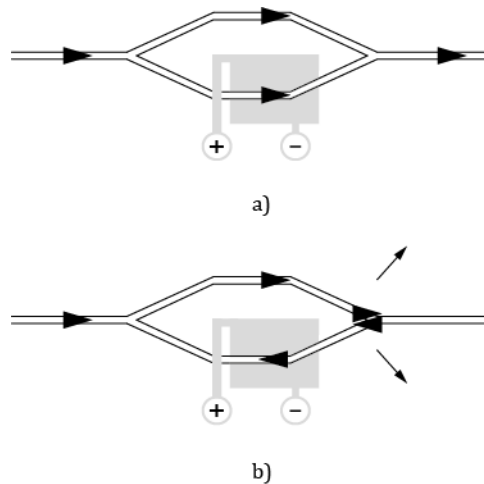
## 4.3 Modulátory

V multiplexních přenosových systémech se nejčastěji používají dva typy modulátorů:

- $\text{LiNbO}_3$  modulátory.
- EAM modulátory (ElectroAbsorption Modulator) [6].

### 4.3.1 $\text{LiNbO}_3$ modulátory

$\text{LiNbO}_3$  modulátory jsou využívány jak přenosovými systémy optického časového multiplexu, tak systémy vlnového multiplexu. Pro proces modulace je u těchto elektrooptických vlnovodných modulátorů využito faktu, že je možné působením elektrického pole ovlivňovat index lomu monokrystalu  $\text{LiNbO}_3$ . Připojením napětí tedy dochází ke změně indexu lomu a k opačnému fázovému posuvu.  $\text{LiNbO}_3$  modulátory jsou složeny ze substrátu monokrystalů niobičnanu lithného  $\text{LiNbO}_3$ , vlnovodu, tlumící vrstvy a elektrody. Pro modulátory se používají dva typy  $\text{LiNbO}_3$  krystalu, typ X a Z. V případě typu Z jsou vlnovody formovány pod elektrodou. U typu X jsou umístěny mezi centrálním vodičem a uzemňovacími elektrodami. Optický vlnovod je formován vysokoteplotní difúzí titanu nebo nízkoteplotním procesem, tzv. protonovou výměnou. Pokud je vlnovodem přímá čára, jedná se o fázový modulátor. Pokud je optický vlnovod Mach-Zehnderova typu, jde o intenzitní modulátor. V tom případě je tvořen dvěma jednovodnými vlnovodnými rozvětvenými spojeními Y spojenými dvojicí vlnovodů, viz obr. 4.6 [5, 6].



Obr. 4.6: Konstrukce a princip Mach-Zehnderova modulátoru a) pokud nepůsobí elektrické pole, je přivedeno na výstup záření, b) pokud je připojeno specifické napětí, na výstupu není nic

### 4.3.2 Elektroabsorpční modulátory

Elektroabsorpční modulátory jsou díky svým malým rozměrům a nízkému modulačnímu napětí vhodné pro monolitickou integraci. Fungují na principu Franz-Keldyshova efektu [5].

## 4.4 Optické zesilovače

Vzdálenost, na kterou jsou optické systémy schopny spolehlivě uskutečňovat přenosy, je limitována ztrátami optických vláken. U přenosů na velmi dlouhé vzdálenosti byly ztráty kompenzovány začleněním optoelektronických opakovačů, ve kterých byl optický signál převeden na elektrický a poté regenerován. S příchodem systémů vlnového multiplexu se staly takovéto opakovače složitými a drahými zařízeními. V multiplexních systémech proto začaly být nahrazovány optickými zesilovači. Ty umožňují na rozdíl od dříve používaných opakovačů obnovení světelného toku v rámci optické domény OSP. První typy optických zesilovačů byly vyvíjeny během 80. let minulého století. O deset let později už byly v optických přenosových systémech běžně rozšířeny a v roce 1996 byly optické zesilovače začleněny i do podmorských optických kabelů v Atlantickém a Tichém oceánu. Právě podle začlenění v rámci optické trasy jsou tyto zesilovače rozdělovány na následující tři typy:

- Booster, zesilovač je umístěn těsně za optický vysílač.
- In-line, zesilovač je začleněn na trase optického vlákna.
- Předzesilovač, zesilovač je umístěn před optický přijímač.

Dále lze používané optické zesilovače rozdělit do dvou skupin dle konstrukce na:

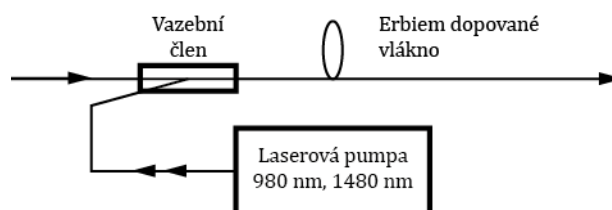
- Optické vláknové zesilovače OFA (Optical Fiber Amplifier).
- Polovodičové optické zesilovače SOA (Semiconductor Optical Amplifier).

Optické zesilovače se dnes uplatňují především jako průběžné zesilovače pro kompenzaci ztrát v optickém vlákne. SOA zesilovače mohou sloužit také jako optický prepínač a ke konverzi vlnových délek. V porovnání s optickými zesilovači mají SOA zesilovače menší maximální zesílení, větší vložný útlum a vyšší šumové číslo [5, 4].

### 4.4.1 Optické vláknové zesilovače

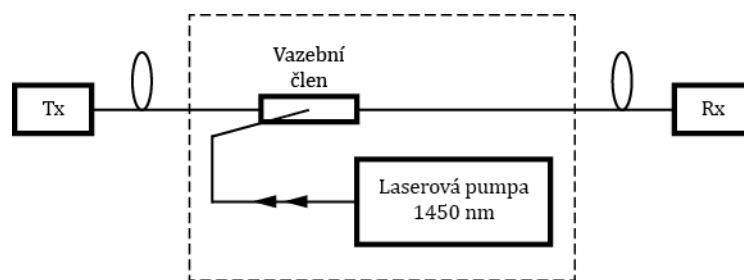
K nejčastěji používaným typům optických zesilovačů u multiplexních systémů patří zesilovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplification) a Ramanovské zesilovače.

EDFA zesilovač tvoří tzv. laserová pumpa a speciální optické vlákno EDF (Erbium Doped Filter) dopované prvkem vzácných zemin, erbiem. Záření z laserové pumpy je navázáno do EDF vlákna, kde dochází k excitaci dopovaného prvku na vyšší energetické hladiny. Dočasně je tak uchována energie ze záření laserové pumpy a k uvolnění dochází ve chvíli, kdy se objeví přenášený signál, jehož energie způsobuje stimulovanou emisi záření se shodnou vlnovou délkou a fází, jakou má přenášený signál. EDFA zesilovače umožňují zesílení úrovně signálu až o 50 dB v rámci jednoho kanálu pásma C. Zjednodušené schéma zapojení je zobrazeno na obr. 4.7 [5, 4].



Obr. 4.7: Princip optického zesilovače EDFA [5]

Ramanovský zesilovač je v podstatě laserový zdroj záření začleněný do optické trasy. K zesilování využívá Ramanovského rozptylu na částicích materiálu vlnovodu, při kterém kromě jiného dochází k přesunu energie z nižších vlnových délek směrem k vyšším vlnovým délkám. Nižší vlnové délky v tomto případě představuje záření Ramanovské pumpy a vyšší vlnové délky vlnová délka přenášeného signálu, čímž dochází tak k zesílení signálu. Zjednodušené zapojení zesilovače je zobrazeno na obr. 4.8. U Ramanovského zesilovače tak k zesilování dochází přímo ve vlastním vlákně přenosové trasy. Lze tak použít jakékoliv dostupné optické vlákno určené pro telekomunikace, na druhou stranu zesílení signálu (o 15 dB až 20 dB) nedosahuje takových hodnot jako je tomu u EDFA zesilovačů [5, 4].



Obr. 4.8: Princip Ramanovského optického zesilovače [5]

#### 4.4.2 Polovodičové optické zesilovače

Na rozdíl od vláknových zesilovačů s optickým zdrojem je polovodičový optický zesilovač SOA řízen elektrickým proudem. Vstupní signál je v aktivní oblasti zesílen vlivem stimulované emise. Šířka aktivní oblasti (přibližně 80 nm) umožňuje úpravou složení materiálu pokrýt oblast vlnových délek v rozsahu od 1200 nm až do 1600 nm [5, 4].

### 4.5 Multiplexery a demultiplexery

Multiplexer v systémech WDM sdružuje světelné svazky jednotlivých zdrojů do jediného světlovodu a na opačném konci zajišťuje demultiplexer jejich zpětné vydělení.

Vydělení jednotlivých svazků ze světlovodu v demultiplexeru probíhá pomocí vlnově selektivních členů, tzv. optických filtrů. V případě použití DWDM systému je optickými filtry vybaven i multiplexer. Důvodem jsou malé rozestupy kanálů, kdy lze pomocí optických filtrů účinně potlačit vnitrokanálové interference. Běžně používané optické filtry jsou reciproční, což znamená, že pouhou záměnou vstupů a výstupů je lze využít jak při demultiplexování, tak i při multiplexování. Optické filtry můžeme rozdělit na dvě skupiny:

- Selektivní interferenční členy, které využívají interferenčních filtrů, od nichž se v závislosti na vlnové délce světelné vlny odrazí, nebo jimi projdou.
- Disperzní filtry, využívající rozkladu světla např. hranolem nebo optickými mřížkami [5].

V praxi se nejčastěji uplatňují MULDEXY s optickými mřížkami, případně interferenčními filtry.

V systémech OTDM je funkce multiplexerů a demultiplexerů principiálně stejná. Základním úkolem je sdružit a vyčlenit jednotlivé příspěvkové toky základních přenosových

rychlostí. V multiplexeru jsou generované impulsy přivedeny na paralelně zapojená zpoždovací optická vlákna a po zpoždění jsou následně sériově začleněny do jednoho vysokorychlostního datového toku. Demultiplexer systému OTDM je obecně tvořen dvěma prvky, tzv. optickou bránou (rychlý přepínač) a zařízením pro obnovu synchronizačního signálu. K realizaci procesu demultiplexování je využíváno nelineárních jevů jako FWM nebo XPM. Příkladem optické brány může být např. SOA v Zenderově interferometru (SOA-MZI), SOA v polarizačně selektivním přepínači nebo SOA v Sagnacově interferometru [5, 6, 8].

## 4.6 Rozbočovače a slučovače

Optické rozbočovače (Splitter) a slučovače (Coupler) jsou pasivní prvky schopné rozbočit nebo sloučit optický signál bez jakýchkoliv úprav. Pracovat mohou v celé šířce přenosového pásma nebo pouze v jeho určité části. Podle použité technologie při výrobě lze optické rozbočovače rozdělit:

- FBT (Fused Bionic Taper).
- PLC (Planar Lightwave Circuit).

FBT rozbočovače jsou založeny na technologii spojování optických vláken. Rozbočovač tvoří svazek 2 až 4 vláken, které se následně kaskádovitě řadí za sebou pro dosažení požadovaného počtu výstupních portů. FBT rozbočovače jsou využívány především v případech, kdy stačí menší počet výstupních portů [5].

U PLC rozbočovačů je při výrobě využita planární technologie, kdy je na křemíkovém substrátu vytvářena požadovaná struktura. PLC rozbočovače disponují vyšším počtem výstupních portů [5].

## 5 KONVERZE OTDM/WDM

Nejnovější výzkumné úsilí v oblasti vysokorychlostních optických sítí je poháněno vidinou standardizace 100 Gb/s a 1 Tb/s Ethernetu. Pro dosažení takových přenosových rychlostí a navýšení přenosové kapacity zaměřily výzkumné týmy pozornost především na spektrální účinnost optického spojů ať již u systémů WDM nebo OTDM. Zatímco experimentálních přenosů s rychlostmi okolo 1 Tb/s na kanál bylo dosaženo u obou systémů, stále ještě zbývá prozkoumat, jak mohou oba systémy pracovat společně. Kombinace obou systémů by tak představovala 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 k prosazení tohoto konceptu je právě zvládnutí konverze mezi těmito systémy [13].

Konverze jednopříspěvkového OTDM na jednokanálové WDM byla implementována několika různými technikami založenými na nelineárních jevech jako např. pomocí NOLM (Nonlinear Optical Loop Mirror), SOA v Mach-Zenderově interferometru, vysoce nelineární optických vláken HNLF (Highly Non-Linear Fiber) nebo fotonických čipů. Zdálo by se, že konverzi vícepříspěvkového OTDM na vícekanálové WDM lze dosáhnout pouhou paralelizací techniky jednokanálové konverze. Problém ale nastává se synchronizací a modularitou této paralelní architektury.

Během posledních pěti let bylo uveřejněno několik úspěšných experimentů s konverzí vícepříspěvkových OTDM/WDM systémů. Převážnou část experimentů 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 vlastností jevů jako XPM, FWM nebo např. SHG DFG (Second Harmonic Generation and Difference Frequency Generation). Lineární chirpované pulsy mají stejnou rychlost opakování jako jednotlivé příspěvkové signály OTDM a společně s vhodnou šířkou pulsu umožňují provést demultiplexování všech příspěvkových kanálů OTDM. Doposud není u této techniky uspokojivě vyřešeno generování lineárních chirpovaných pulsu, spektrální rozšíření (tzv. superkontinuum) a generování obdélníkových pulsu. Výzvu představují především obdélníkové pulsy, jejichž realizace je v praxi velmi obtížná. Pomalé náběhy neideálních obdélníkových pulsu u čerpacího signálu způsobují velké kvalitativní rozdíly a mezikanálové přeslechy u vyčleněných WDM kanálů. Nicméně i přesto výzkum OFT pokračuje a jsou uveřejňovány další konverze stále rychlejších OTDM datových toků (640 Gb/s) i za cenu výsledného omezeného počtu vyčleněných WDM kanálů. Dalším problémem zůstává modularita OFT konverze vzhledem k plánované dynamické povaze systémů WDM.

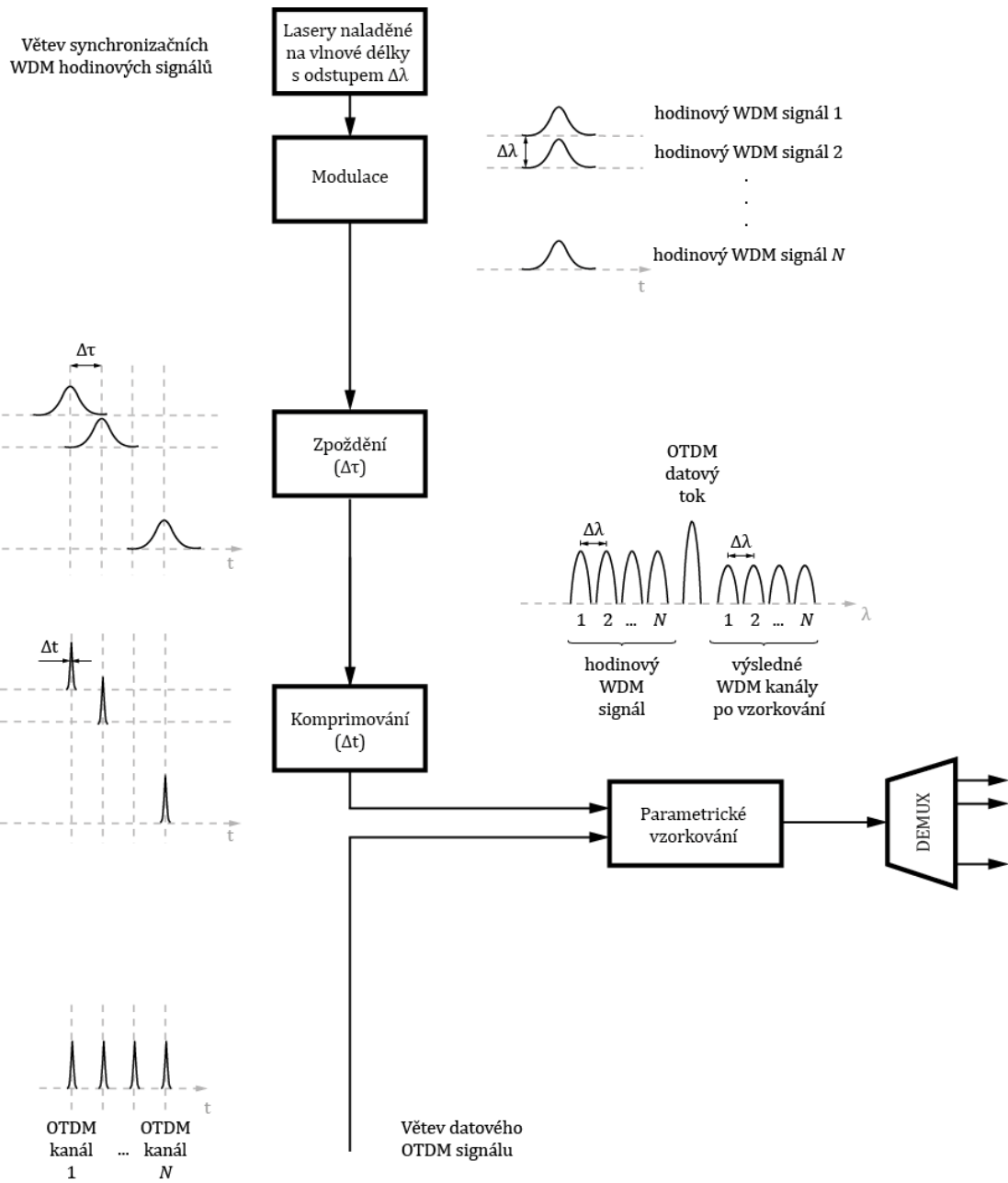
Navrhovaný konvertor by měl splňovat následující požadavky:

- 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.

Právě na tyto požadavky se snaží reagovat navrhovaná technika konverze založená na parametrickém 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.

## 5.1 Základní princip konverze

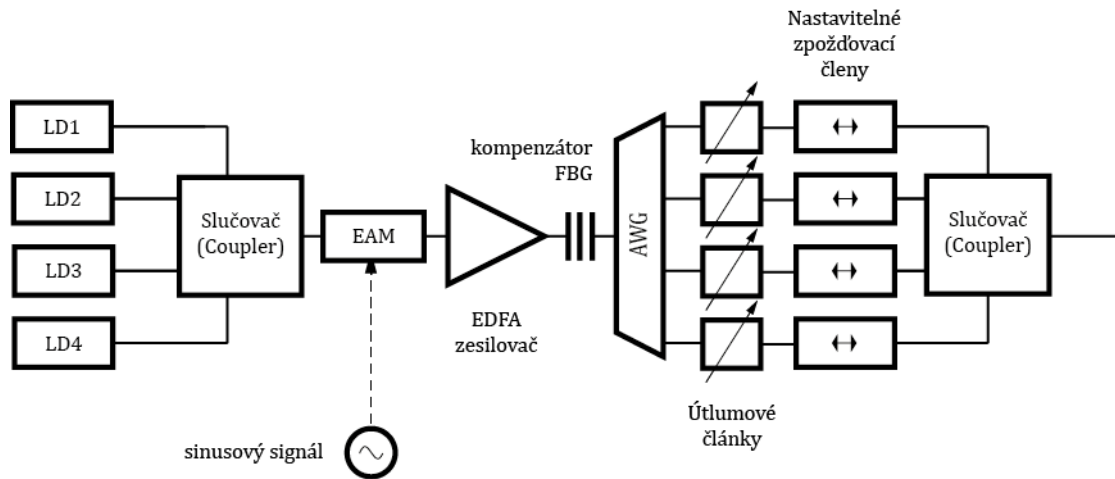
Pro návrh konverzního modelu byla vybrána technika využívající vysoce nelineárního vlákna. Principiální schéma konverze OTDM/WDM je zobrazeno na obr. 5.1. Koncept konverze je založen na využití dvou větví sloučených a přivedených do vysoce nelineárního vlákna. První, tzv. WDM větev, slouží ke generování hodinových WDM signálů s požadovanými rozestupy vlnových délek dle doporučení ITU-T. Druhá, OTDM větev, je určena ke generování vysokorychlostního datového OTDM signálu. Jejich vzájemnou interakcí dochází ke konverzi datového OTDM signálu na datové WDM.



Obr. 5.1: Principiální schéma konverze OTDM/WDM založené na parametrickém vzorkování [13]

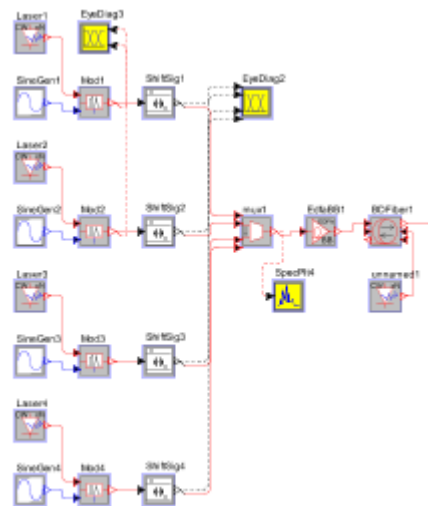
## 5.2 Větev s hodinovými WDM signály

Větev hodinových WDM signálů je složena z jednotlivých příspěvkových signálů. Blokové schéma možného provedení je zobrazeno na obr. 5.2.



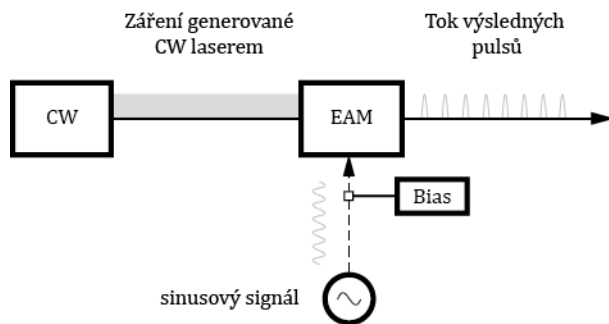
Obr. 5.2: Realizace větve s hodinovými WDM signály [13]

Realizace hodinové WDM větve v simulačním programu OptSim je zobrazena na obr. 5.3. Zdrojem záření jsou lasery v CW režimu naladěné na požadované vlnové délky s konstantním rozestupem.



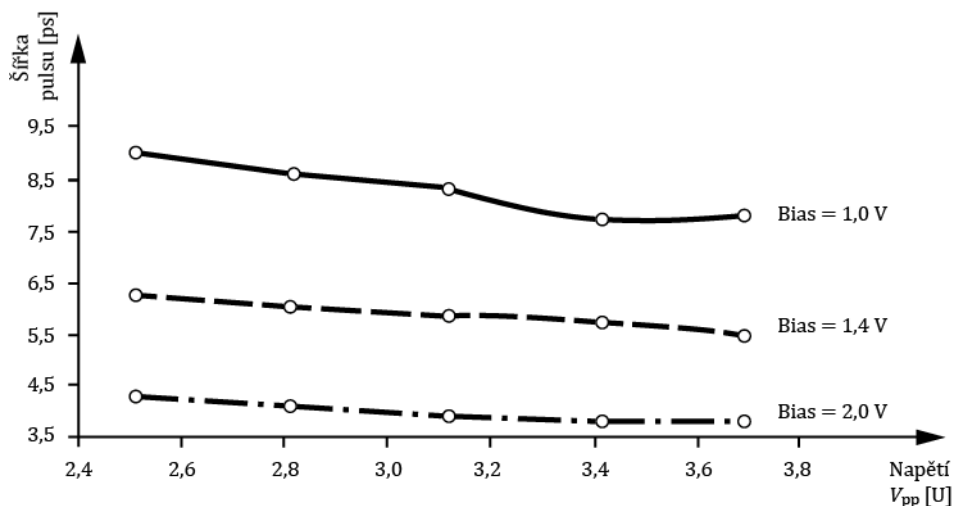
Obr. 5.3: Realizace větve s hodinovými WDM signály v programu OptSim

Záření z DFB laseru v režimu CW (Continuous Wave) je modulováno v elektroabsorpčním modulátoru, viz obr. 5.4. Použitý InP EAM modulátor představuje běžně komerčně dostupný prvek pracující v C-pásmu [17, 9].



Obr. 5.4: Zapojení CW laseru a modulátoru EAM [17]

Modulátor je řízen sinusovým signálem s požadovanou frekvencí a špičkovým napětím  $V_{pp}$ . Z prováděných měření [9] vyplývá, že s rostoucí hodnotou  $V_{pp}$  napětí se zkracuje šířka pulsu. Závislost šířky pulsu a špičkového napájecího napětí znázorňuje graf, viz obr. 5.5.

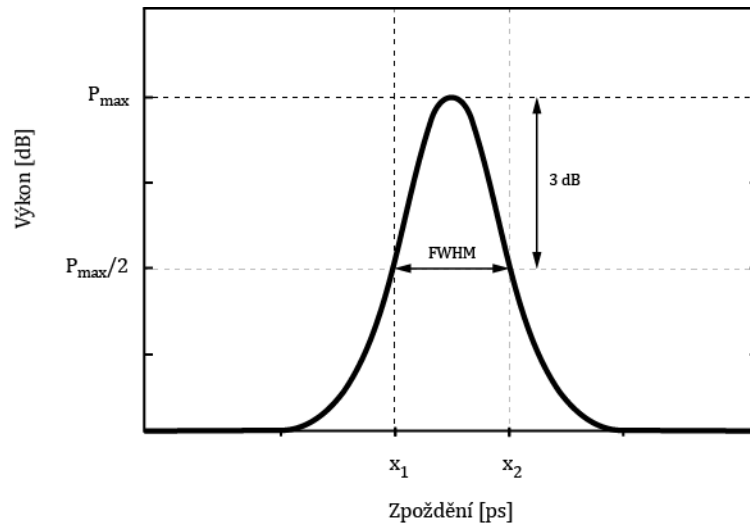


Obr. 5.5: Graf závislosti šířky pulsu na napětí  $V_{pp}$  [21]

Při případné praktické implementaci by bylo vhodné optické pulsy na výstupu EAM modulátoru následně zesílit optickým EDFA zesilovačem kompenzujícím vložný útlum modulátoru. Pro potlačení případného záporného chirpu je možné na výstup optického zesilovače připojit ještě kompenzátor FBG.

### 5.2.1 FWHM

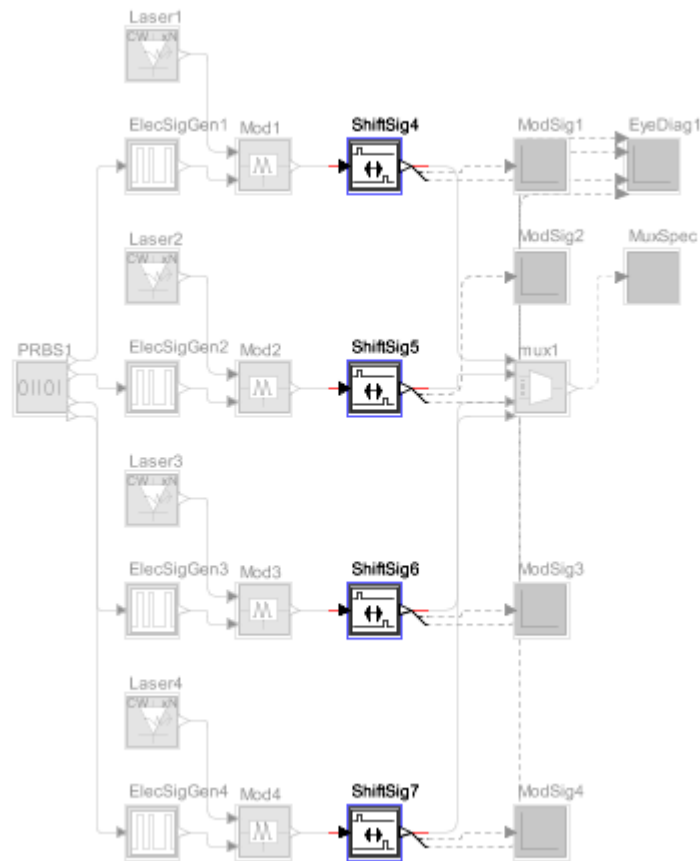
V dalším textu se bude velice často kromě pojmu šířka pulsu vyskytovat i tzv. hodnota FWHM (Full Width at Half Maximum), viz obr. 5.6. FWHM představuje rozdíl mezi časovými okamžiky, kdy je impulsní výkon roven polovině maximální hodnoty.



Obr. 5.6: Grafické znázornění hodnoty šířky pulsu FWHM

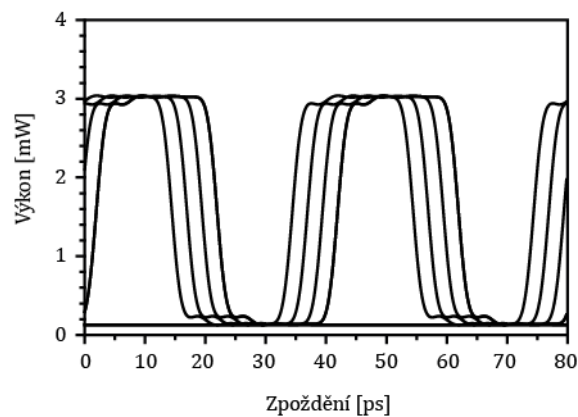
### 5.2.2 Zpoždění impulsů

V následující části bylo potřeba správně načasovat pulsy hodinových WDM signálů tak, aby se synchronizovaly s pulsy datové OTDM větve. Schéma zapojení časového zpoždění signálu v simulačním programu OptSim je uvedeno na obr. 5.7. Jako zpožďovací člen byl využit prvek s názvem „Shift Signal“. Na tyto zpožďovací prvky byly přivedeny jednotlivé WDM signály z modulátoru. Doba zpoždění byla nastavena na stejnou hodnotu, jakou mají zpožďovací členy během multiplexování v OTDM větvi. Po zpoždění jsou jednotlivé signály sloučeny pomocí prvku „Optical MUX“.



Obr. 5.7: Zpožd'ovací členy realizované v simulačním programu OptSim

Vzájemné zpoždění signálů bylo pro tuto ukázkovou simulaci nastaveno pro názornost na hodnotu 25 ps. Výsledné posunutí signálů vůči sobě je patrné z obr. 5.8 pomocí diagramu oka připojeného na výstupy všech čtyř zpožd'ovacích prvků.



Obr. 5.8: Diagram oka čtyř vzájemně zpožděných signálů v simulačním programu OptSim

Při praktické realizaci je potřeba jednotlivé WDM signály výkonově přizpůsobit, k tomu lze použít běžně dostupná dopovaná útlumová vlákna, tzv. VOA (Variable Optical Attenuator),

poskytující útlum v rozsahu 1 dB až 20 dB. Zpoždování signálů lze provést v nastavitelných optických zpoždovacích linkách VODL (Variable Optical Delay Line). Dostupné VODL jsou schopné nastavit zpoždění až do hodnoty 600 ps.

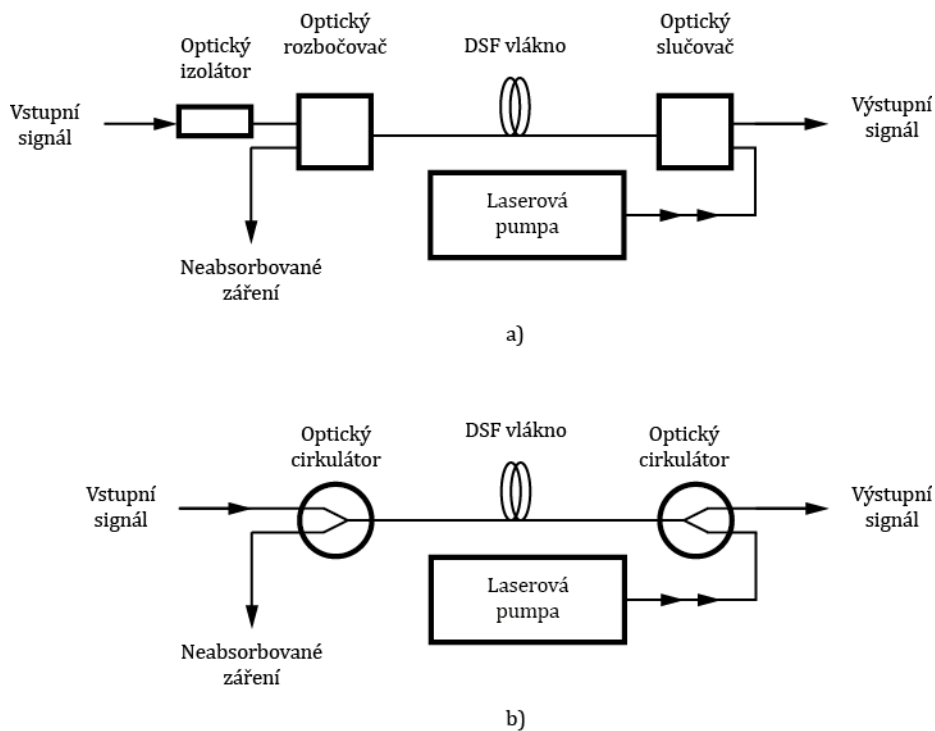
### 5.2.3 Komprimování impulsů pomocí Ramanovského zesilovače

Ramanovský adiabatický kompresor byl zvolen proto, že na rozdíl od vláknových adiabatických kompresorů je schopen produkovat impulsy, jejichž vlnovou délku a dobu trvání lze v rámci možností měnit. Původně byl Ramanovský zesilovač navržen firmou Hasegawa pro kompenzaci ztrát při solitonových přenosech. Během experimentálního ověřování bylo zjištěno, že při zesílení dochází ke kompresi zesilovaných impulsů. Vyžadovaný průměrný výkon  $P_{av}$  na vstupu ke správné kompresi  $\text{sech}^2$  impulsů je dán rovnicí:

$$P_{av} = R \frac{2}{1,763} \cdot \frac{3,11|\beta_2|}{\gamma \cdot T_{FWHM}^2} \cdot T_{FWHM}, \quad (5.1)$$

kde  $R$  je rychlost opakování,  $\beta_2$  je parametr GVD (Group Velocity Dispersion),  $\gamma$  je nelineární koeficient a  $T_{FWHM}$  je doba trvání impulsu [16].

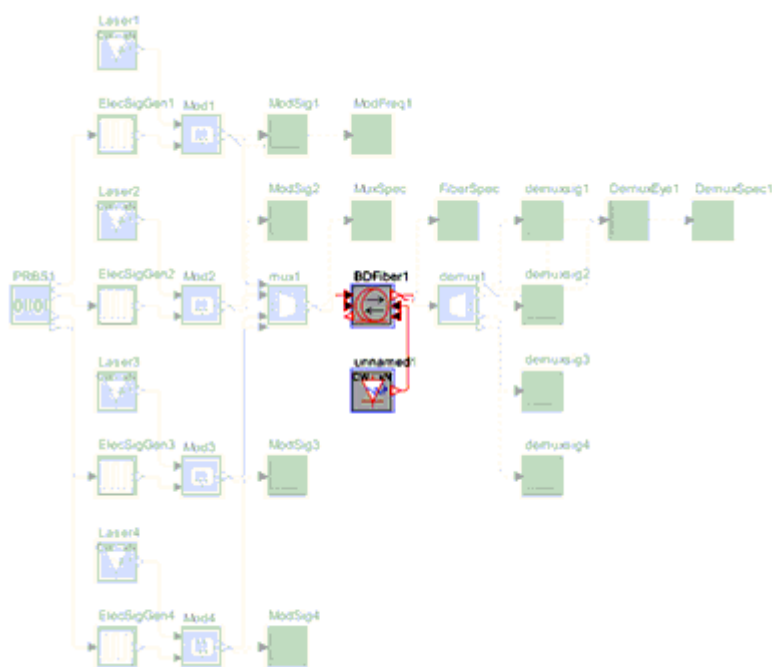
Kompresor využívající Ramanovské zesílení je tvořen vláknem s posunutou disperzí DSF a čerpacím Ramanovským laserem. Ten je k vláknu připojen pomocí vlnově selektivního vazebního členu proti směru šíření nebo pomocí dvou optických cirkulátorů. Jeden cirkulátor slouží k připojení laserové pumpy proti směru šíření a druhý pro odvod neabsorbovaného záření. Obě varianty jsou zobrazeny na obr. 5.9.



Obr. 5.9: Varianty realizace Ramanovského kompresoru a) pomocí rozbočovačů/slučovačů b) pomocí cirkulátorů

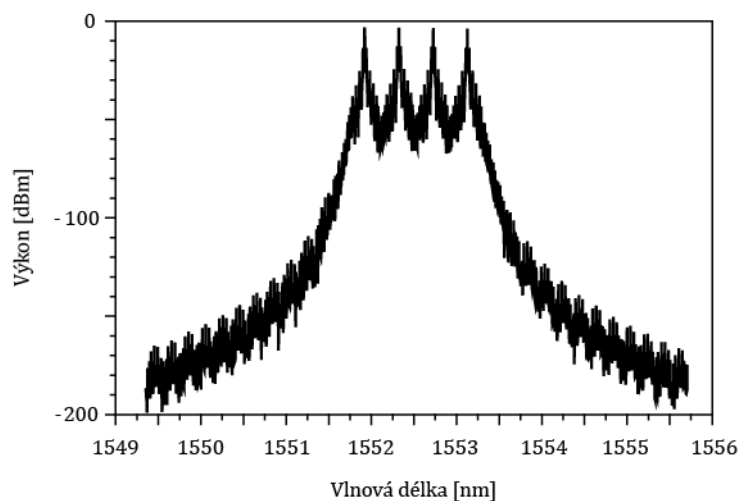
Simulace Ramanovského kompresoru byla provedena v simulačním programu OptSim. OptSim ve zvoleném blokovém módu neobsahuje prvek cirkulátor ani slučovač umožňující připojit čerpací laser vyzařující proti směru šíření. Náhradní schéma zapojení je uvedeno na obr. 5.10. Kompresor je tvořen obousměrným nelineárním vláknem představující DSF vlákno s anomální disperzí. Pokud mají na vstupu vlákna pulsy kladný chirp, nižší frekvenční složky se při průchodu vláknem zpožďují více než vidy s vyšší frekvencí. Vyšší frekvenční složky na určitém úseku dohoní nižší frekvenční složky a díky tomu dojde k časové kompresi pulsu (fázová modulace pulsu v tomto okamžiku zanikne). Disperze DSF vlákna je  $3,8 \text{ ps/nm/km}$  a disperzní sklon  $0,059 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$  na vlnové délce  $1552 \text{ nm}$

Použité obousměrné vlákno umožňuje připojit dvě čerpací pumpy proti nebo po směru šíření. V tomto případě je k jednomu vstupu směřujícímu proti směru šíření připojena laserová pumpa tvořená laserem v režimu CW režimu.

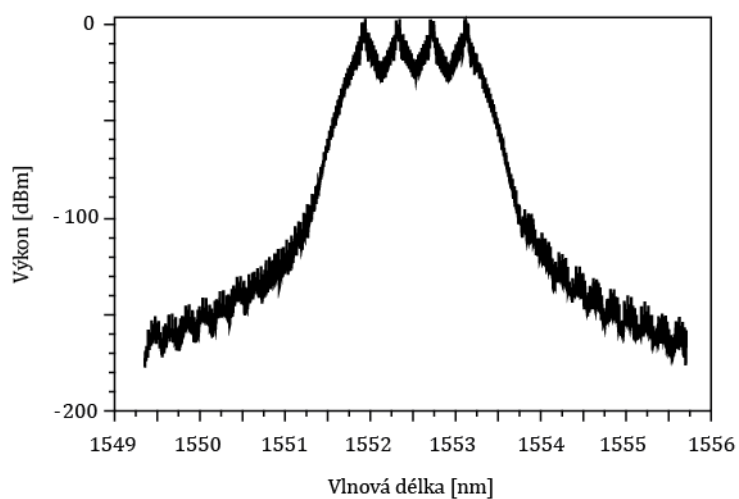


Obr. 5.10: Schématické zobrazení Ramanovského kompresoru při simulaci v programu OptSim

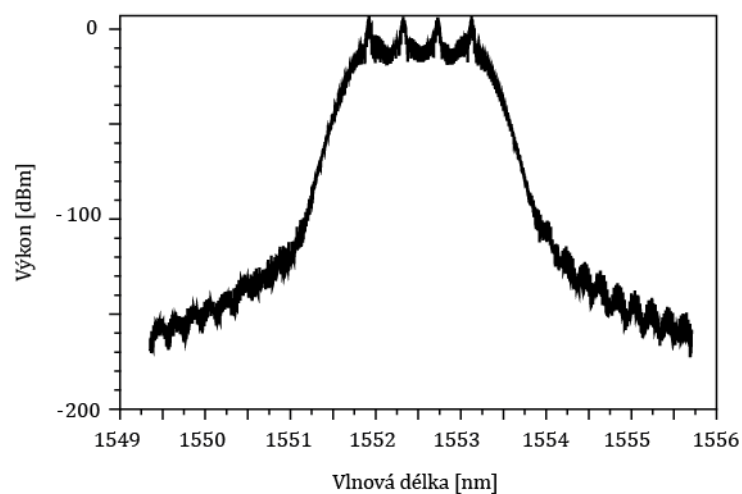
Laserová pumpa umožňuje změnou vyzařovacího výkonu ovlivňovat kompresní poměr kompresoru a tedy požadovanou šířku pulsu. Během simulace byla prováděna různá nastavení vyzařovacího výkonu. Spektrum výsledného komprimovaného signálu pro výkon  $0 \text{ W}$  znázorňuje graf na obr. 5.11a. Při zvýšení výkonu vyzařovaného čerpacím laserem na  $0,85 \text{ W}$  (obr. 5.11b) a následně  $1,15 \text{ W}$  (obr. 5.11c) lze pozorovat měnící se spektrum výsledného signálu. Výsledná šířka pulsu by měla přibližně odpovídat šířce pulsu OTDM signálu. V případě nedostatečného kompresního poměru, lze připojit i druhou čerpací pumpu pro zvýšení výkonu Ramanovského kompresoru.



a) spektrum signálu při výkonu laserové pumpy 0.00 W



b) spektrum signálu při výkonu laserové pumpy 0.85 W

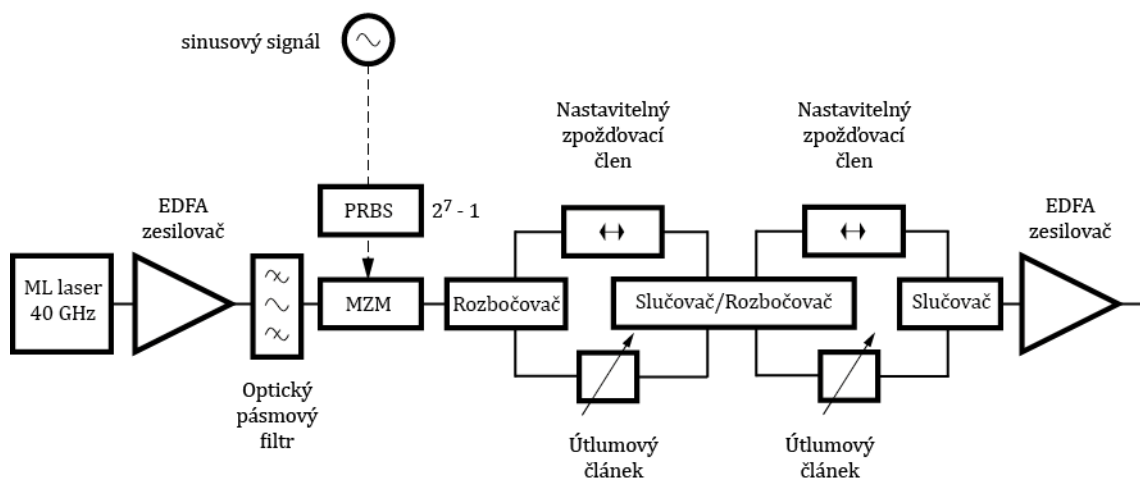


c) spektrum signálu při výkonu laserové pumpy 1.15 W

Obr. 5.11: Změny ve spektrech výsledných komprimovaných signálů při různých nastaveních laserové pumpy

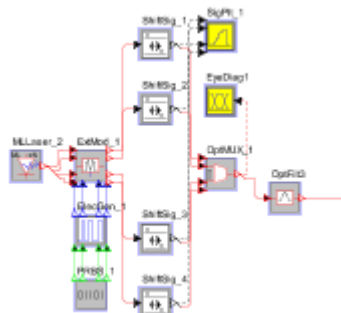
### 5.3 Větev s datovým OTDM signálem

Větev s datovým OTDM signálem v podstatě představuje vysílací část přenosového systému OTDM. Na obr. 5.12 je uvedeno blokové schéma navržené OTDM větve. Záření je generováno erbiem dopovaným ML (Mode-Locked) laserem. Výstup laseru je zesílen zesilovačem EDFA. Pomocí optického pásmového filtrů BPF (BandPass Filter) je redukován šum ASE. Pulzní tok je následně modulován v Mach-Zehnderově modulátoru s pseudonáhodnou binární posloupností  $2^7 - 1$ . Výsledné pulsy jsou následně zpracovány v multiplexeru 4:1 na jehož výstupu je výsledný datový OTDM tok. Poté je signál zesílen v EDFA zesilovači a přes pásmový filtr BPF směřován do vzorkovací části.



Obr. 5.11: Realizace datové OTDM větve

Realizace OTDM větve v programu OptSim je uvedena na obr. 5.13. Záření je generováno ML laserem a modulováno v Mach-Zehnderově modulátoru s pseudonáhodnou posloupností. Výsledné pulsy jsou vzájemně zpožděny a následně sloučeny pomocí prvku „Optical MUX“ do výsledného datového toku.



5.13: Realizace datové větve OTDM signálu v programu OptSim

## 5.4 Parametrická konverze OTDM/WDM

Parametrické procesy představují zvláštní skupinu nelineárních jevů, u nichž je při frekvenčním směšování (neboli směšování fotonů jednotlivých kmitočtů) striktně dodržován zákon o zachování energie a hybnosti. Šíří-li se nelineárním médiem alespoň dvě vlny, jsou generovány nové frekvence. Účinnost tohoto směšování je kromě nelineárních parametrů média ovlivněna i disperzí. Jak původní tak i nově generované frekvence totiž musí být přenášeny synchronně.

Konverze systému OTDM/WDM probíhá v bloku založeném na parametrické interakci mezi příchozím OTDM signálem a komprimovanými hodinovými WDM pulsy. Konverze datového toku OTDM s přenosovou rychlostí  $B = N \cdot R$  ( $N$  je počet příspěvkových signálů o rychlostech  $R$ ) požaduje  $N$  WDM synchronních signálů s frekvencí  $R$ .

Proces parametrické interakce je v tomto případě založen na využití čtyřvlnného směšování u vysoce nelineárních vláken. Ke vzniku signifikantního FWM je zapotřebí splnit podmínku fázové synchronizace  $\kappa = 0$ . Pro splnění podmínky vycházíme ze vztahu:

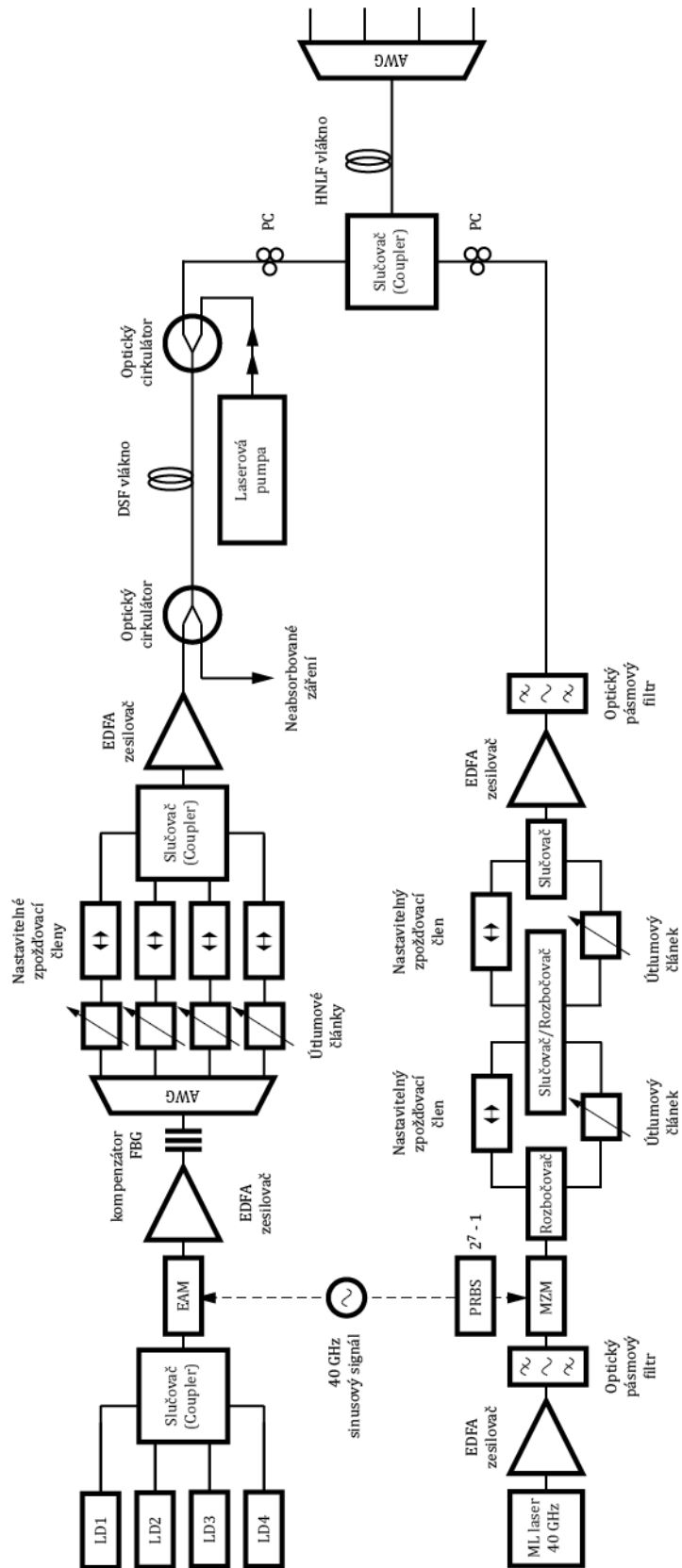
$$\kappa = \Delta k_M + \Delta k_W + \Delta k_{NL} = 0, \quad (5.2)$$

kde  $\Delta k_M$ ,  $\Delta k_W$ ,  $\Delta k_{NL}$  představují výsledek nesouladu materiálové disperze, vlnovodné disperze a případně účinky nelineárních jevů. K dosažení fázové synchronizace je nutné, aby alespoň jeden ze tří uvedených parametrů dosahoval záporných hodnot. V našem případě lze počítat s  $\Delta k_W = 0$ , protože u použitých jednovlnových vláken je hodnota vlnovodné disperze velmi malá oproti hodnotám materiálové disperze  $\Delta k_M$  (s výjimkou okolí vlnové délky s nulovou chromatickou disperzí, viz obr. 2.3). Splnění podmínky fázové synchronizace je tak možné dosáhnout těmito způsoby:

- Zredukováním vlivu  $\Delta k_M$  a  $\Delta k_{NL}$  (např. malým výkonem čerpací větve).
- Pohybem v okolí vlnové délky s nulovou disperzí.
- Prací v anomální oblasti s kladným disperzním koeficientem ( $\Delta k_M$  tak může být kompenzováno  $\Delta k_W$  a  $\Delta k_{NL}$ ).

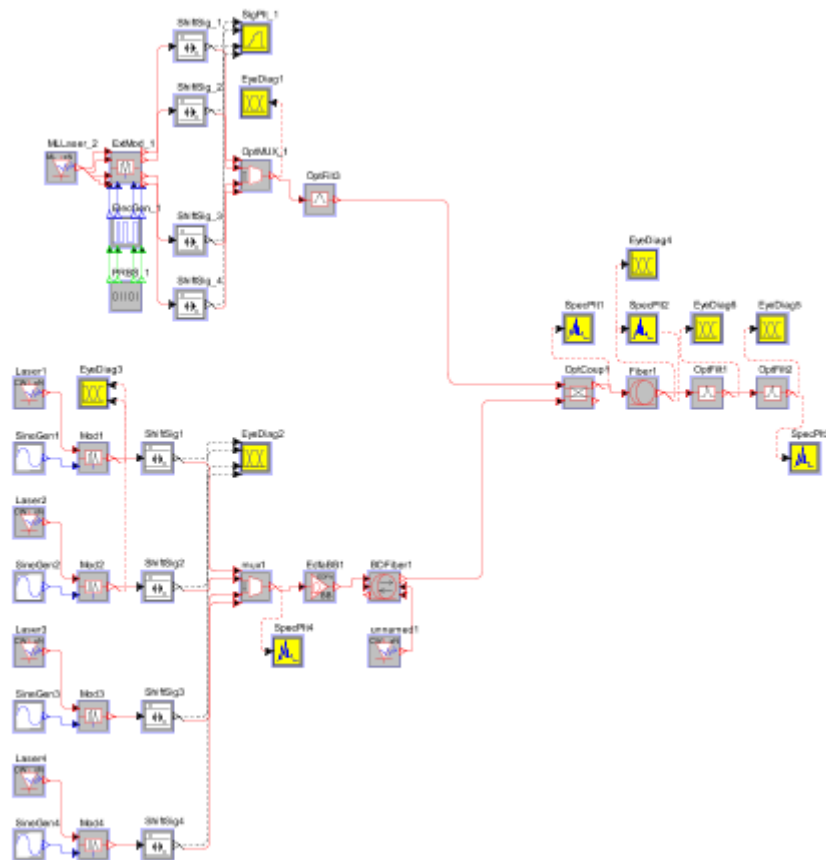
Konverze je dokončena, jakmile je každý příspěvkový signál OTDM toku navzorkován odpovídajícím synchronním hodinovým signálem.

Možný návrh kompletního konverzního modelu OTDM/WDM je uveden na obr. 5.12. Při realizaci jsou nejprve obě větve pomocí PC (Polarization Controller) sfázovány, ve slučovači sloučeny a připojeny k vysoce nelineárnímu HNLF vlákně. Díky vyššímu nelineárnímu koeficientu je FWM efektivnější a HNLF nepotřebuje tak vysoký čerpací větve jak by tomu bylo v případě použití standardního SM vlákna [13].



Obr. 5.12: Realizace konverzního modelu OTDM/WDM

V simulačním programu byla provedena simulace konverzního modelu OTDM/WDM za použití ideálních prvků. Schéma konverze je uvedeno na obr. 5.13.



Obr. 5.13: Blokové schéma konverzního modelu OTDM/WDM v OptSimu

Na obr. 5.13 je nahoře zobrazena datová OTDM větev a spodní větev generující hodinové WDM signály. Obě větve jsou sloučeny a přivedeny do HNLF vlákna, kde probíhá samotná konverze.

## 6 KONVERZE WDM/OTDM

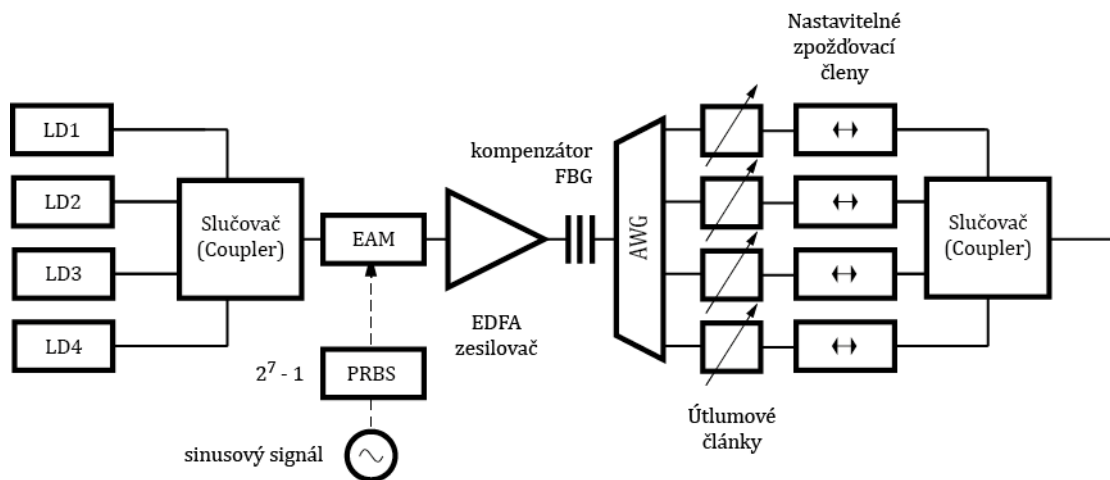
K realizaci celo-optického přenosového systému založeného na časovém a vlnovém multiplexu je nutné nejen prozkoumat možnost konverze mezi OTDM/WDM ale i konverzi WDM signálů na signál OTDM.

### 6.1 Základní princip konverze

Model konverze WDM/OTDM vychází z podobného principu jako konverze OTDM/WDM. Opět jsou vytvořeny dvě větve. V tomto případě jde o hodinovou OTDM větev a datovou WDM větev. Interakcí mezi těmito dvěma větvemi dochází k samotné konverzi, tentokrát je využíváno nelineárního jevu křížové fázové modulace XPM.

### 6.2 Větev s datovými WDM signály

Větev s datovými WDM signály tvoří jednotlivé WDM signály. Navrhované blokové schéma (na obr. 6.1) je v podstatě totožné s WDM hodinovou větví použitou u předchozího typu konverze.

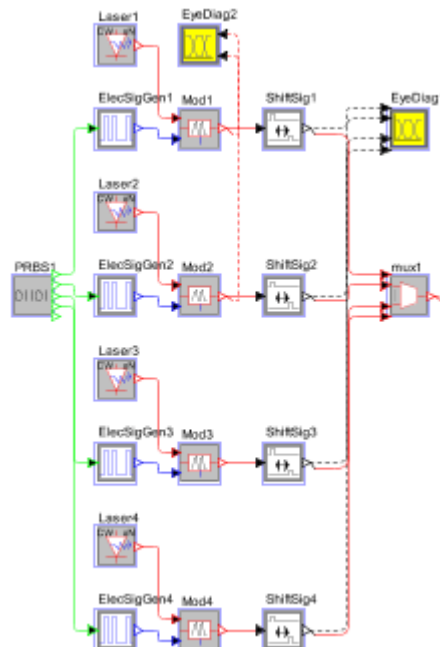


Obr. 6.1: Realizace datové WDM větve

Realizace datové větve WDM signálů v programu OptSim je rovněž velmi podobná WDM větví z předchozí konverze. Blokové schéma je zobrazeno na obr. 6.2. Zdroje záření představují DBF lasery v CW režimu s vlnovými délkami odpovídajícími doporučení ITU-T. Záření jednotlivých laserů je přivedeno do modulátoru. Zde jsou modulovány s pseudonáhodnou posloupností  $2^7 - 1$ . Následně jsou jednotlivé signály vůči sobě načasovány. Praktické realizaci se blíží původní návrh datové WDM větve. Ke kompenzaci ztrát způsobených modulací je signál nejprve přiveden do EDFA zesilovače. Následně je v kompenzátoru FBG kompenzován případný

negativní frekvenční chirp. Poté je možné signál pomocí AWG rozdělit na odpovídající vlnové délky, výkonově přizpůsobit a teprve tehdy vůči sobě načasovat.

Po sloučení je výsledný datový tok zesílen v EDFA zesilovači a přiveden do Ramanovského kompresoru. Zde jsou pulsy komprimovány na velikost umožňující následnou konverzi na OTDM datový signál.

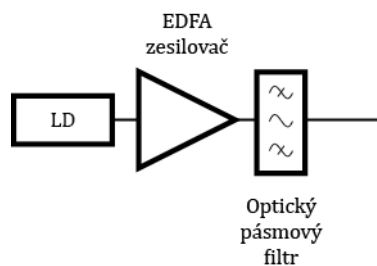


Obr. 6.2: Realizace datových WDM signálů v programu OptSim

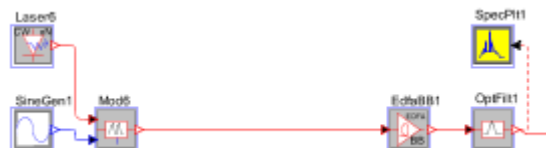
### 6.3 Větev s hodinovým OTDM signálem

Větev s hodinovým OTDM signálem v podstatě představuje čerpací pumpu. Realizace v programu OptSim je uvedena na obr. 6.3., blokové schéma je zobrazeno na obr. 6.2.

Realizována je DFB laserem v režimu CW. Signál je zesílen EDFA zesilovačem a BPF filtrem redukován ASE šum. Úkolem hodinové OTDM větve je generovat dostatečný výkon k následné konverzi WDM/OTDM. Blokové schéma je uvedeno na obr. 6.2.



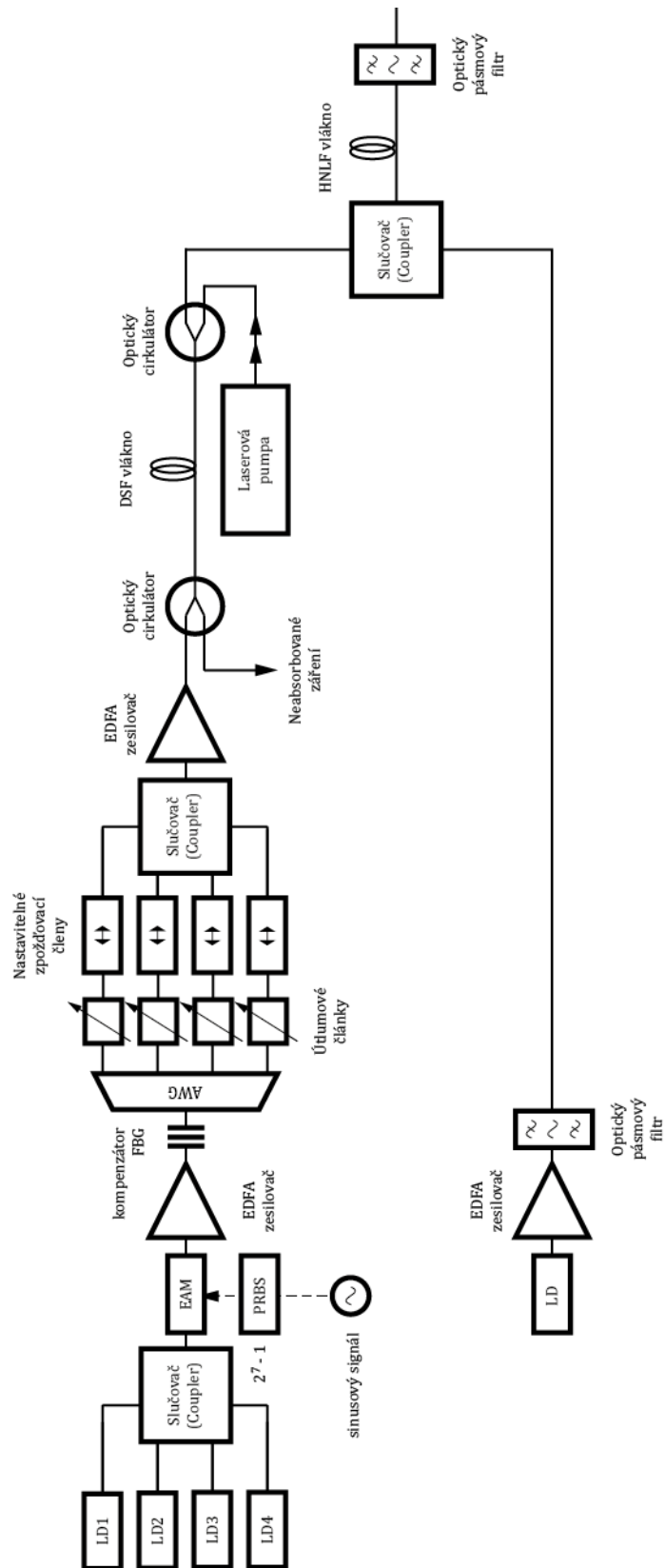
Obr. 6.2: Navržený model čerpací větve s hodinovým OTDM signálem



Obr. 6.3: Realizace větve s hodinovým OTDM signálem v programu OptSim

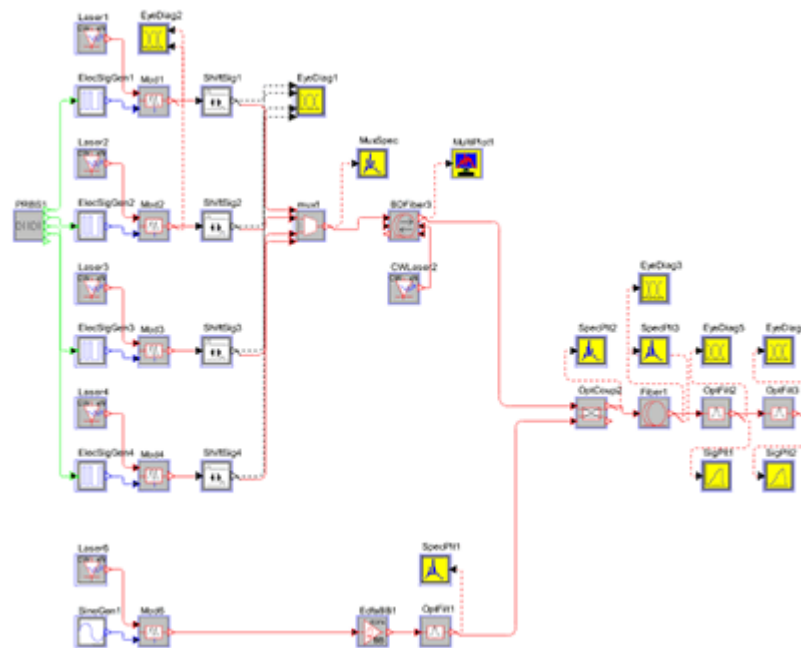
## 6.4 Konverze WDM/OTDM pomocí XPM

Komprimované WDM hodinové signály jsou společně s hodinovým OTDM signálem přivedeny do slučovače a připojeného HNLF vlákna. Parametry vlákna jsou totožné jako u konverze OTDM/WDM. Opět je důležitá hodnota nelineárního koeficientu a dostatečný přiváděný výkon z obou větví. Samotná konverze využívá nelineárního jevu fázové modulace XPM. Křížová fázová modulace vytváří k záření laseru v CW režimu postranní pásma, která jsou konvertována na amplitudovou modulaci pomocí optických pásmových filtrů spektrálním potlačením původního CW záření. Jeden z možných způsobů realizace konverze WDM/OTDM je uvedena na obr. 6.3.



Obr. 6.3: Možná realizace modelu konverze WDM/OTDM

Realizace ideálního modelu konverze WDM/OTDM je zobrazena na obr. 6.3.



Obr. 6.4: Blokové schéma konverzního modelu WDM/OTDM v simulačním programu OptSim

Datové WDM signály představuje na obr. 6.4 horní větev, která je společně se spodní čerpací větví sloučena a přivedena do HNLF vlákna. Zde díky křížové fázové modulaci dojde ke konverzi WDM signálů na OTDM datový tok.

## 7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo teoreticky prostudovat možnosti přímé konverze mezi technologiemi OTDM a WDM, popsat obě technologie multiplexace a provést jejich srovnání. Dále měla být prozkoumána možnost vzájemné konverze mezi oběma metodami a navržen model pro konverzi OTDM na WDM a WDM na OTDM. Navržený model měl být realizován v simulačním softwaru OptSim.

Práce byla rozdělena na šest kapitol. V prvních dvou kapitolách byl popsán základní princip optického přenosu a jevů, které tento přenos ovlivňují.

Ve třetí kapitole byly detailně popsány technologie multiplexace a jejich srovnání. Vzhledem k zaměření práce jsou podrobně rozebrány především systémy časového a vlnového multiplexu. Text byl koncipován tak, aby byly uvedeny nejdůležitější parametry umožňující porovnat vlastnosti obou multiplexů.

Čtvrtá kapitola byla věnována nejdůležitějším prvkům multiplexních přenosových systémů se zaměřením na ty, které budou později využity při návrhu.

Pátá a šestá kapitola práce byla věnována již samotné konverzi mezi technologiemi OTDM a WDM. Na základě doposud publikovaných experimentů a jejich výsledků byla jako nejvhodnější varianta zvolena konverze s využitím komprese pulsů. Hlavní předností této konverze je její flexibilita při implementaci. Jediné omezení představuje generování ultrakrátkých pulsů u WDM signálů, tak aby byly schopny následné synchronizace s vysokorychlostním OTDM datovým tokem. V práci je simulována varianta Ramanovského kompresoru pulsů s jednou čerpací pumpou.

Posledním požadavkem na diplomovou práci bylo ověřit funkčnost navržené konverze v simulačním programu OptSim. Vzhledem k využívání nelineárních jevů a množství provázaných parametrů je velice náročné v OptSimu správně navrhnout a odladit konverzi tak komplexních přenosových systémů jako jsou OTDM a WDM, což vyžaduje především dostatek času. Vzhledem k časové náročnosti odladění simulace, nakonec došlo pouze k simulaci jednotlivých dílčích částí konverzního modelu. V příloze na DVD lze tak najít simulaci vzájemného zpoždění signálů, realizaci Ramanovského kompresoru a vliv nelineárního vlákna na přenášený signál.

Vzhledem k neustálému navyšování přenosových rychlostí skrývá v sobě problematika konverze OTDM/WDM a vůbec celo-optických přenosových systémů obrovský potenciál.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AGRAWAL, Govind. *Applications of Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, 2001. 473 s. ISBN: 0-12-045144-1.
- [2] AGRAWAL, K. D. KULAT a M.B. DAIGAVANE. High Performance WDM Using Semiconductor Tunable Laser. *International journal of computer information systems and industrial management applications* [online]. 2010, Vol. 2 [cit. 2012-11-08]. ISSN 2150-7988. Dostupné z: [http://www.mirlabs.org/ijcisim/regular\\_papers\\_2009/IJCISIM\\_Vol\\_2\\_Paper\\_22.pdf](http://www.mirlabs.org/ijcisim/regular_papers_2009/IJCISIM_Vol_2_Paper_22.pdf)
- [3] DUTTON, Harry. *Understanding Optical Communications*. IBM, 1998. 637 s.
- [4] FILKA, Miloslav, Vladimír TEJKAL, Petr MÜNSTER a Radim ŠIFTA. *Trendy optických přenosů*. Sdělovací technika. 2012, roč. 2012, č. 4, s. 5.
- [5] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [6] GAŠIAK, Peter. *Viackanálove optické systémy - siete OTDM*. Žilina, 2010. Bakalárska práca. Žilinská univerzita v Žiline, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Ing. Jozef Dubovan, PhD.
- [7] GIRARD, André. *Guide To WDM Technology And Testing* [CD]. 2nd Edition. Quebec: EXFO, 2000 [cit. 2012-11-02]. ISBN 1553420012.
- [8] JEŘÁBEK, Vítězslav. *Integrované prvky pro systémy WDM a OTDM*. 2009. Dostupné z: [http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34FOT/prednasky/Integrované\\_prvky\\_pro\\_WDM\\_a\\_OTDM\\_systemy\\_09.pdf](http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34FOT/prednasky/Integrované_prvky_pro_WDM_a_OTDM_systemy_09.pdf)
- [27] JUNG, S., J. Y. LEE a D. Y. KIM. *Novel phase-matching condition for a four wave mixing experiment in an optical fiber*. 2005. Opt. Express, Vol. 14, s. 35-45.
- [9] MAHER, R, P. M. ANANDARAJAH a L. P. BARRY. Generation and Characterisation of 40 GHz Picosecond Optical Pulses Generated Using an EAM. In: *ICTON 2006*. 201 - 204. DOI: 1-4244-0236-0/06.
- [10] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna*. Ostrava, 2006. Technická univerzita Ostrava. 167 s.
- [11] MYNBAEV, Djafar K a Lowell L SCHEINER. *Fiber-optic communications technology*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2001. 750 s. ISBN 01-396-2069-9.
- [12] NĚMEČEK, Ivo. *Architektury a technologie v moderních optických DWDM sítích 1/2*. [online]. 2010 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.netguru.cz/odborne-clanky/architektury-a-technologie-v-modernich-optickych-dwdm-sitich-12.html>
- [13] NGUYEN-THE, Quang, Motoharu MATSUURA a Naoto KISHI. Reconfigurable All-Optical OTDM-to-WDM Conversion Using a Multiwavelength Ultrashort Pulse Source Based on Raman Compression. *Journal of Lightwave Technology*. 2012, roč. 30, č. 6, s. 853-863. ISSN 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2011.2182497.
- [14] Optický telegraf. In: *Napoleonika* [online]. [cit. 2012-11-09]. Dostupné z: <http://napoleonika.cz/content/view/99/10/lang.cz/>
- [24] PRAVDA, Ivan. *Optické přenosové prostředky a systémy WDM*. Praha. ČVUT Praha.
- [15] PUŽMANOVÁ, Rita. WDM v optických metro a přístupových sítích. In: [online]. [cit. 2012-11-07]. Dostupné z: <http://www.lupa.cz/clanky/wdm-v-optickych-metro-a-pristupovych-sitich/>
- [16] REEVES-HALL, P. A. CHAMPERT, S. V. POPOV a J. R. TAYLOR. Visible, duration-bandwidth tuneable source based on adiabatic Raman compression and frequency upconversion in PPKTP. *Optics communications*. Amsterdam: Elsevier, 2001, č. 193, s. 283-288. ISSN 0030-4018.
- [17] *Semiconductor Mode-Locked Laser for High-Speed OTDM Transmission*. Berlin, 2006. Diplomová práce. TU Berlin. Vedoucí práce Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. H. Boche.
- [18] SENIOR, John. *Optical Fiber Communications*. Third Edition. Essex: Pearson, 2009. 1127 s. ISBN 978-0-13-032681-2.
- [25] SUPE, A., J. PORINS a G. IVANOV. *Optical Fiber Nonlinear Coefficient Measurements Using*

- FWM*. In: *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*. Taipei, 2013, s. 339-341.
- [19] ŠIFTA, Radim. *DWDM v přístupových sítích*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [28] TA'EED, V. G., L. FU a M. ROCHETTE. *XPM Wavelength Conversion in Highly Nonlinear Singlemode AS<sub>2</sub>SE<sub>3</sub> Fiber*. Sydney, 2006. Optical Society of America.
- [20] TTC Marconi. *Digitální komunikační technika I*. Třetí vydání. Praha, 1996. 212 s.
- [21] WDM SYSTEMS. *Technologie CWDM* [online]. 2010 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.wdmsummit.cz/nabidka/wdm-technologie/technologie-cwdm.htm>
- [22] WDM SYSTEMS. *Technologie DWDM* [online]. 2010 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.wdmsummit.cz/nabidka/wdm-technologie/technologie-dwdm.htm>
- [23] WDM SYSTEMS. *Technologie WDM* [online]. 2010 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.wdmsummit.cz/nabidka/wdm-technologie/technologie-wdm.htm>
- [26] YIN CHEUNG. *Applications of Photonic Parametric Processors in Optical Communications Systems*. Hong Kong, 2007. Diplomová práce. University of Hong Kong. Vedoucí práce Kenneth K. Y. Wong.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

|                    |   |
|--------------------|---|
| APD                | Avalanche PhotoDiode                                  |
| ASE                | Amplified Spontaneous Emission                        |
| AWG                | Arrayed-Waveguide Grating                             |
| BER                | Bit Error Ratio                                       |
| BPF                | BandPass Filter                                       |
| C                  | Conventional  |
| CW                 | Continuous Wave                                       |
| CWDM               | Coarse Wavelength Division Multiplexing               |
| DBR                | Distributed Bragg Reflector                           |
| DCF                | Dispersion Compansation Fiber                         |
| DEMUX              | Demultiplexer   |
| DFB                | Distributed FeedBack                                  |
| DSF                | Dispersion Shifted Fiber                              |
| DWDM               | Dense Wavelength Division Multiplexing                |
| E                  | Extended  |
| E/O                | Electrical/Optical                                    |
| EA-EML             | Electro Absorption – Based Externally Modulated Laser |
| EAM                | Electro Absorption Modulator                          |
| EDF                | Erbium Doped Fiber                                    |
| EDFA               | Erbium Doped Fiber Amplifier                          |
| ESP                | Electrical Signal Processing                          |
| ETDM               | Electrical Time Division Multiplexing                 |
| FBG                | Fiber Bragg Grating                                   |
| FBT                | Fused Bionic Taper                                    |
| FDM                | Frequency Division Multiplexing                       |
| FGL                | Fibre Bragg Grating Laser                             |
| FP                 | Fabry-Perot   |
| FWHM               | Full Width at Half Maximum                            |
| FWM                | Four Wave Mixing                                      |
| GVD                | Group Velocity Dispersion                             |
| HNLF               | Highly Non-Linear Fiber                               |
| HOM                | High Order Mode Fiber                                 |
| InP                | Fosfor inditý   |
| IPoDWDM            | IP over DWDM  |
| ISI                | Inter Symbol Interference                             |
| ITU                | International Telecommunication Union                 |
| L                  | Long  |
| LD                 | Laser Diode   |
| LED                | Light Emitting Diode                                  |
| LiNbO <sub>3</sub> | Lithium Niobate                                       |
| LWPF               | Low Water Peak Fiber                                  |
| ML                 | Mode-Locked   |
| MLM                | Multi Longitudinal Mode                               |
| MMF                | Multi-Mode Fiber                                      |
| MUX                | Multiplexer   |
| MZM                | Mach-Zehnder Modulator                                |
| NOLM               | Nonlinear Optical Loop Mirror                         |
| NZ-DSF             | Non Zero – Dispersion Shifted Fiber                   |
| O                  | Original  |
| O/E                | Optical/Electrical                                    |
| OFA                | Optical Fiber Amplifier                               |

|                  |  |
|------------------|--|
| OFT              | Optical Fourier Transformation                                 |
| OH               | Hydroxid   |
| OOK              | On-Off Keying  |
| OSP              | Optical Signal Processing                                      |
| OTDM             | Optical Time Division Multiplexing                             |
| PLC              | Planar Lightwave Circuit                                       |
| PMD              | Polarization Mode Disperzion                                   |
| PON              | Passive Optical Network  |
| PRBS             | PseudoRandom Binary Sequence                                   |
| RZ               | Return to Zero   |
| S                | Short  |
| SBS              | Stimulated Brillouin Scattering                                |
| SCM              | Subcarrier Multiplexing  |
| SDM              | Space Division Multiplexing                                    |
| SFP              | Small Form-Factor Pluggable                                    |
| SHG DFG          | Second Harmonic Generation and Difference Frequency Generation |
| SiO <sub>2</sub> | Oxid křemičitý   |
| SMF              | Single Mode Fiber  |
| SML              | Single Longitudinal Mode                                       |
| SNR              | Signal to Noise Ratio  |
| SOA              | Semiconductor Optical Amplifier                                |
| SOA-MZI          | Semiconductor Optical Amplifier-Mach Zehnder Interferometer    |
| SOA-UNI          | Semiconductor Optical Amplifier-                               |
| SPM              | Self Phase Modulation  |
| SRS              | Stimulated Raman Scattering                                    |
| SSMF             | Standard Single Mode Fiber                                     |
| TDM              | Time Division Multiplexing                                     |
| U                | Ultralong  |
| VCO              | Voltage Controlled Oscillator                                  |
| VCSEL            | Vertical Cavity Surface Emitting Laser                         |
| VLSI             | Very Large Scale Integrated                                    |
| VOA              | Variable Optical Attenuator                                    |
| VODL             | Variable Optical Delay Line                                    |
| WDM              | Wavelength Division Multiplexing                               |
| WWDM             | Wide Wavelength Division Multiplexing                          |
| XFP              | 10 Gb Small Form-Factor Pluggable                              |
| XPM              | Cross Phase Modulation   |

## SEZNAM PŘÍLOH

| <b>DVD obsahující:</b> |   |
|------------------------|---|
| Adresář                | Obsah   |
| DOKUMENT               | Elektronická verze diplomové práce ve formátu PDF     |
| KOMPRESSE              | Zdrojové soubory k simulaci komprese                  |
| ZPOZDENI               | Zdrojové soubory k simulaci zpoždění mezi signály WDM |
| OTDM_WDM               | Zdrojové soubory k návrhu simulace konverze OTDM/WDM  |
| WDM_OTDM               | Zdrojové soubory k návrhu simulace konverze WDM/OTDM  |