

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Lukáš Lučenič



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## MODULAČNÍ TECHNIKY POUŽÍVANÉ VE WDM SÍTÍCH

THE MODULATION TECHNIQUES USED IN WDM OPTICAL NETWORKS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Lukáš Lučenič**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Lukáš Kočí**

**BRNO 2016**

# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Lukáš Lučenič

**ID:** 146892

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Modulační techniky používané ve WDM sítích

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem diplomové práce je simulace DWDM optické sítě, definované doporučením ITU-T, obsahující minimálně 16 komunikačních kanálů na přenosovou vzdálenost minimálně 50 km. Simulace bude provedena ve VPIphotonics. Jednotlivé komunikační kanály budou obsahovat šířku pásma maximálně 50 GHz a přenosovou rychlost minimálně 10 Gbit/s. Na výsledném simulačním modelu student provede simulace minimálně 8 modulačních formátů (RZ, NRZ, CSRZ, CRZ, QAM a další). Výsledkem práce bude přímé porovnání modulačních technik z hlediska využitelnosti šířky pásma a porovnání kvality přenosu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] SABAPATHI, T., S. SUNDARAVADIVELU a A. VAIRAMUTHU. 2011. Analysis of optical modulation formats for DWDM system. 2011 Third International Conference on Advanced Computing. IEEE, : 68-73. DOI: 10.1109/ICoAC.2011.6165151. ISBN 978-1-4673-0671-3.

[2] YU, Changyuan, Lei XU, Ezra IP, Philip Nan JI, Ting WANG, Shuji MURAKAMI, Yutaka YANO a Tsutomu TAJIMA. 2006. Comparison of Modulation Formats for 40-Gbit/s DWDM Optical Fiber Transmission Systems with 50-GHz Channel Spacing. 2006 IEEE Sarnoff Symposium. IEEE, : 1-4. DOI: 10.1109/SARNOF.2006.4534719. ISBN 978-1-4244-0002-7.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 25.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Kočí

**Konzultant diplomové práce:**

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

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Hlavným cieľom diplomovej práce je simulácia DWDM optickej siete, definovanej doporučením ITU-T. Optická sieť obsahuje 16 komunikačných kanálov s prenosovou vzdialenosťou 50 km. Jednotlivé komunikačné budú obsahovať šírku pásma minimálne 50 GHz a prenosovú rýchlosť minimálne 10 Gbit/s. Na výslednom simulačnom modeli by malo byť vykonaných aspoň 8 druhov modulačných techník. Výsledkom práce by malo byť porovnanie modulačných techník z hľadiska použiteľnosti šírky pásma a porovnania kvality prenosu.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

optické vlákna, WDM, DWDM, modulácie, zdroje svetla, lineárne a nelineárne javy,

## **ABSTRACT**

The main goal of the diploma thesis is DWDM simulation of optical network, defined by recommendation ITU-T. Optical network includes 16 communication channels with length of fiber 50 km. Each channel have to be set with bandwidth 50 GHz and Bit rate with minimal value 10 Gbit/s. The final simulation model includes 8 types of modulation techniques. The result of the thesis is comparison modulation techniques in terms of usability of bandwidth and comparison of the quality of transfer.

## **KEYWORDS**

optical fiber, WDM, DWDM, modulations, light sources, linear and nonlinear effects,

LUČENIČ, Lukáš *Modulační techniky používané ve WDM sítích*: diplomová práce. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 71 s. Vedúci práce bol Ing. Lukáš Kočí

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Modulační techniky používané ve WDM sítích“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/nebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisejúcich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), vo znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka č. 40/2009 Sb.

BRNO .....

.....

(podpis autora)

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Lukášovi Kočímu za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

BRNO .....

.....

(podpis autora)



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

## POĎAKOVANIE

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

BRNO .....

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

Úvod	12
<b>1 Princíp</b>	<b>13</b>
<b>2 Konštrukcia optického vlákna</b>	<b>14</b>
2.1 Typy optických vlákien . . . . .	14
2.1.1 Jednovidové optické vlákna . . . . .	14
2.1.2 Mnohovidové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu . . . . .	14
2.1.3 Mnohovidové vlákna s premennou zmenou indexu lomu . . . . .	14
<b>3 Javy v optike</b>	<b>16</b>
3.1 Lineárne javy . . . . .	16
3.1.1 Útlm . . . . .	16
3.1.2 Absorpcia . . . . .	18
3.1.3 Ohyby . . . . .	18
3.1.4 Rozptyl . . . . .	19
3.2 Nelineárne javy . . . . .	19
3.2.1 Trojvlnné zmiešavanie . . . . .	20
3.2.2 Kerrov jav . . . . .	20
3.2.3 Vlastná fázová modulácia . . . . .	20
3.2.4 Krížová modulácia . . . . .	21
3.2.5 Štvorvlnné zmiešavanie . . . . .	21
3.3 Disperzia . . . . .	21
3.3.1 Vidová disperzia . . . . .	22
3.3.2 Chromatická disperzia . . . . .	22
3.3.3 Materiálová disperzia . . . . .	23
3.3.4 Vlnovodná disperzia . . . . .	23
3.3.5 Polarizačná disperzia . . . . .	24
3.3.6 Profilová disperzia . . . . .	24
<b>4 Multiplexovanie</b>	<b>25</b>
4.1 Kódový multiplex CDM . . . . .	25
4.2 Frekvenčný multiplex FDM . . . . .	25
4.3 Časový multiplex TDM . . . . .	26
4.4 Vlnový multiplex WDM . . . . .	27
4.4.1 Hrubý vlnový multiplex CWDM . . . . .	28
4.4.2 Hustý vlnový multiplex DWDM . . . . .	28



<b>5 Prvky prenosových systémov</b>	<b>31</b>
5.1 Zdroje žiarenia . . . . .	31
5.2 Detektory žiarenia . . . . .	32
5.3 Filtre . . . . .	33
5.4 Optické zosilňovače . . . . .	34
<b>6 Modulačné metódy</b>	<b>35</b>
6.1 NRZ . . . . .	35
6.2 RZ . . . . .	37
6.3 CRZ . . . . .	40
6.4 CSRZ . . . . .	42
6.5 PSK . . . . .	44
6.6 DPSK . . . . .	45
6.7 DQPSK . . . . .	47
6.8 QAM . . . . .	48
<b>7 Návrh siete DWDM</b>	<b>50</b>
7.1 Postup . . . . .	50
<b>8 Záver</b>	<b>66</b>
<b>Literatúra</b>	<b>67</b>
<b>Zoznam symbolov, veličín a skratiek</b>	<b>70</b>

# ZOZNAM OBRÁZKOV

2.1	Jednovidové vlákno . . . . .	14
2.2	Mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu . . . . .	15
3.1	Útlmová charakteristika [8] . . . . .	17
3.2	Vlastná fázová modulácia [7] . . . . .	21
3.3	Vidová disperzia v mnohovidovom prenose . . . . .	22
3.4	Chromatická disperzia . . . . .	23
3.5	Porovnanie disperzií [13] . . . . .	23
3.6	Polarizačná disperzia . . . . .	24
4.1	Princíp multiplexu a demultiplexu . . . . .	25
4.2	CDM Multiplex [24] . . . . .	26
4.3	Frekvenčný multiplex [24] . . . . .	26
4.4	Časový multiplex [24] . . . . .	27
4.5	Princíp WDM multiplexu . . . . .	28
5.1	Porovnanie spektrálnych charakteristík . . . . .	32
6.1	Optické spektrum NRZ modulácie . . . . .	35
6.2	Diagram oka NRZ modulácie . . . . .	36
6.3	Graf závislosti BER od vzdialenosti NRZ modulácie . . . . .	36
6.4	Diagram oka RZ modulácie . . . . .	38
6.5	Optické spektrum RZ modulácie . . . . .	38
6.6	Graf závislosti BER od vzdialenosti modulácie RZ . . . . .	39
6.7	Optické spektrum CRZ modulácie . . . . .	40
6.8	Diagram oka CRZ modulácie . . . . .	41
6.9	Graf závislosti BER od vzdialenosti CRZ modulácie . . . . .	41
6.10	Diagram oka CSRZ modulácie . . . . .	42
6.11	Optické spektrum CSRZ modulácie . . . . .	43
6.12	Graf závislosti BER od vzdialenosti CSRZ modulácie . . . . .	43
6.13	Bloková schéma QPSK modulátora . . . . .	44
6.14	Bloková schéma QPSK demodulátora . . . . .	45
6.15	Diagram oka DPSK modulácie . . . . .	45
6.16	Optické spektrum DPSK modulácie . . . . .	46
6.17	Graf závislosti BER od vzdialenosti DPSK modulácie . . . . .	46
6.18	Diagram oka DQPSK modulácie . . . . .	47
6.19	Optické spektrum DQPSK modulácie . . . . .	47
6.20	Bloková schéma QAM modulátora a demodulátora . . . . .	48
7.1	Bloková schéma navrhutej siete . . . . .	50
7.2	Model DWDM siete pre 8 kanálov . . . . .	52
7.3	Optické spektrum pre 8 kanálov . . . . .	53

7.4	Závislosť BER od vzdialenosti pre šírku pásma 100GHz . . . . .	55
7.5	Model DWDM siete . . . . .	58
7.6	Optické spektrum pre 16 kanálov so šírkou pásma 50 GHz. . . . .	59
7.7	Optické spektrum analyzované na dĺžke 50 km. . . . .	60
7.8	Porovnanie diagramov oka modulácií RZ, NRZ, CRZ, CSRZ, DPSK a DQPSK pri vzdialenosti 50 kilometrov. . . . .	61
7.9	Závislosť BER od vzdialenosti pre šírku pásma 50GHz s ideálnymi parametrami . . . . .	62
7.10	Závislosť BER od vzdialenosti pre šírku pásma 50GHz s reálnymi parametrami . . . . .	65

# ZOZNAM TABULIEK

3.1	Rozdelenie javov v optike . . . . .	16
3.2	Pásma vlnových dĺžok jednovidových optických vlákien . . . . .	18
4.1	Tabuľka vlnových dĺžok podľa ITU-T G.694.2 [11] . . . . .	28
4.2	Rozdelenie menovitých hodnôt frekvencii pre DWDM [10] . . . . .	30
5.1	Optické filtre a ich parametre [16] . . . . .	34
5.2	Porovnanie vlastností optických zosilňovačov . . . . .	34
6.1	Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie NRZ .	37
6.2	Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie RZ . .	39
6.3	Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie CRZ .	41
6.4	Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie CSRZ	43
6.5	Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie DPSK	46
7.1	Rozdelenie kanálov v navrhutej DWDM sieti pre šírku pásma 100GHz	54
7.2	Hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti pre šírku pásma 100GHz .	56
7.3	Rozdelenie kanálov v navrhutej DWDM sieti pre šírku pásma 50GHz	57
7.4	Hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti pre šírku pásma 50GHz s ideálnymi parametrami . . . . .	63
7.5	Hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti pre šírku pásma 50GHz s reálnymi parametrami . . . . .	64

# ÚVOD

So zvyšujúcou sa rýchlosťou a vyššími prenosovými kapacitami, je potrebné zlepšovať a vyvíjať nové moderné technológie prenosu dát v optických sieťach, za účelom spokojnosti náročných zákazníkov a zvyšovania kvality internetových služieb. Práca sa zaoberá tematikou prenosu dát formou optických sietí. V úvode diplomovej práce sú popísané základné teoretické princípy optických vlákien, rôzne techniky prenosu a vlastnosti prenosových optických vlákien. Pri prenose v optickom vlákne je potrebné dbať na základné optické a fyzikálne javy, vznikajúce pri prenose dát prostredníctvom optických vlákien, ktoré môžu ovplyvňovať rôzne prenosové vlastnosti. S novými technológiami prichádza vyššie využitie prenosových liniek, tým pádom sa musia prenosové cesty využívať dostatočne efektívne. K z kvalitnieniu prenosu a zvýšeniu efektivity sa používajú v optických sieťach multiplexory a demultiplexory, ktorými sa zlučujú a rozdeľujú prenosové kanály. V práci sú popísané rôzne používané techniky multiplexovania a demultiplexovania. K vysielaniu a spracovaniu signálu patria rôzne techniky modulácie a demodulácie signálu. Každá modulácia má svoje charakteristické vlastnosti, podľa nich sa vhodne vyberá použitie daného typu modulácie. Neoddeliteľnou súčasťou prenosu dát v optických vláknach sú zdroje svetelného žiarenia. Každý zdroj žiarenia ma svoje charakteristické vlastnosti podľa ktorých sa dá zdroj vhodne aplikovať do optickej siete. K prenosu dát prostredníctvom optických vlastností patria aj rôzne optické prvky. V kapitole 5 sú popísané optické prvky ako sú napríklad filtre. Základom práce je praktický návrh DWDM siete pre 16 kanálov, s použitím rôznych modulačných techník. K návrhu patrí aj analýza získaných charakteristík, napríklad analýza optického spektra prenosového kanála. Samotná DWDM sieť je navrhnutá podľa zadania na vzdialenosť 50 km s dodržaním parametrov popísaných v doporučení ITU-T G694.1.

# 1 PRINCÍP

Základný princíp optických sietí sa nachádza vo svetle. Prenos informácie v optickom vlákne je možný vďaka optickému žiareniu prechádzajúcemu optickým vedením. V porovnaní s klasickým metalickým vedením, kde sa k prenosu informácie používa prenos elektricky nabitých elektrónov sa v optickom vedení na prenos informácie používajú neutrálne fotóny. Dôvodom, prečo sa začali používať optické vlákna, je okrem zvýšenej rýchlosti a zvýšenej kapacity prenosového pásma vedenia aj bezpečnosť. V optických vláknach nevznikajú elektrické ani magnetické polia. To znamená, že optické vlákna sú dostatočne odolné proti vonkajším rušivým vplyvom v porovnaní s metalickými káblami.

K prenosu informácie prostredníctvom optického vlákna je potrebný zdroj svetelného žiarenia. Svetelné paprsky sa prenášajú v sklenených alebo plastových vláknach. V minulosti sa preferovalo používanie luminiscenčných diód, dnes sú populárnejšie lasery. Luminiscenčné diódy potrebujú k vyžarovaniu svetelného lúča nižšie napätie ako lasery, ale spektrálna dĺžka svetelného paprsku je širšia, čo znamená, že je viac rozptýlený. Lasery potrebujú vyššiu úroveň napätia ako luminiscenčné diódy, avšak svetelný paprsok laseru je užší. Dnešné moderné lasery sú schopné vysielat svetelné impulzy oveľa rýchlejšie ako luminiscenčné diódy. Z tohto dôvodu sa častejšie používajú lasery. Rozptýlenie svetelných paprskov v optickom vlákne je menšie. K tomu, aby sa vstupná informácia mohla dostať od zdroja k cieľu, je potrebná modulácia signálu. K modulácii signálu sa používajú modulátory, ktoré budú v ďalšej časti popísané. Informácia sa v prenosovom médiu prenáša pomocou svetla. V minulosti sa používal prenos s vlnovou dĺžkou 0,8 až 0,9  $\mu\text{m}$ . Následným skúmaním zdrojov žiarenia došlo k presunu vlnových dĺžok do pásma 1,3 až 1,6  $\mu\text{m}$ , kde optické vlákna vykazujú menšie straty a skreslenie signálu. [8]

## 2 KONŠTRUKCIA OPTICKÉHO VLÁKNA

### 2.1 Typy optických vlákien

Jedným zo základných rozdelení optických vlákien je rozdelenie podľa prenášaného svetla v jadre optického vlákna. Existujú dva základné typy prenosu: SMF (Single Mode Fiber) jednovidové optické vlákna a MMF (Multi Mode Fiber) mnohovidové optické vlákna. Mnohovidové vlákna sa dajú rozdeliť na mnohovidové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu a na mnohovidové vlákna s premenným (gradientným) indexom lomu [8].

#### 2.1.1 Jednovidové optické vlákna

V jednovidovom vlákne 2.1 sa prenášajú informácie prostredníctvom jedného svetelného paprsku. Šírka jadra jednovidového optického vlákna je približne 7 až 9  $\mu\text{m}$ . V jednovidovom vlákne vzniká nižšia disperzia, teda je možné preniesť väčšiu šírku pásma. Maximálne hodnoty šírky pásma môžu byť až rádovo THz [8].



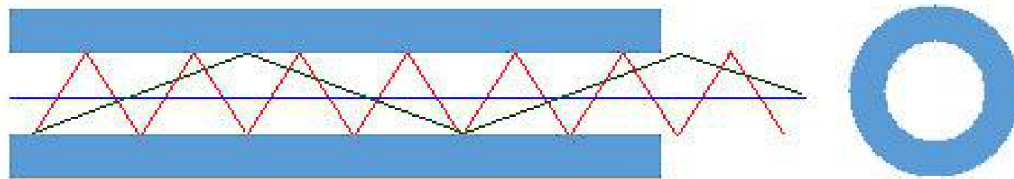
Obr. 2.1: Jednovidové vlákno

#### 2.1.2 Mnohovidové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu

Princípom mnohovidových vlákien je prenos viac svetelných paprskov v jednom optickom vlákne. Vzhľadom k zvýšeniu počtu vidov sa znižuje šírka prenášaného pásma. Maximálna šírka môže dosahovať hodnoty rádovo desiatky Mb/s. Zvyšovaním počtu vidov v optickom kábli sa zvyšuje priemer jadra optického vlákna až na 50 až 100  $\mu\text{m}$  [9].

#### 2.1.3 Mnohovidové vlákna s premennou zmenou indexu lomu

Aby sa zvýšila šírka prenášaného pásma, začala sa používať technológia s použitím gradientných mnohovidových vlákien. Vlákna používajú rôzne indexy lomu, tým pádom dochádza k zníženiu vidovej disperzie, tým sa zníži počet vidov vo vlákne, ale



Obr. 2.2: Mnohovidové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu

šírka pásma sa zvýši až na jednotky GHz/km. Dôležitým parametrom u mnohovidových vlákien je index lomu. U gradientných vlákien sa index lomu mení spojito, je to vlákno s parabolickou zmenou indexu [8].



## 3 JAVY V OPTIKE

Pri používaní optických vlákien sa využívajú optické fyzikálne vlastnosti. Na základe toho vznikajú v optických prenosoch sprievodné javy. Niektoré vzniknuté javy a vlastnosti sa využívajú pri prenose dát, iné javy a vlastnosti je potrebné určitými spôsobmi a technikami eliminovať. V tabuľke 3.1 je zobrazené základné rozdelenie javov, ktoré ovplyvňujú prenos dát.

Tab. 3.1: Rozdelenie javov v optike

Lineárne	Nelineárne	Disperzia
Útlm	Zmiešavanie	Vidová
Absorpcia	Kerrov jav	Polarizačná
Ohyby	Rozptyl	Chromatická
Prímesy	FWM	Profilová
Rozptyl	XPM	
	SPM	

### 3.1 Lineárne javy

Lineárne javy prebiehajú v lineárnom optickom prostredí, ovplyvňujú prenos signálu v optických vláknach. Medzi lineárne javy patria útlm, absorpcia, ohyby, prímesy a rozptyl.

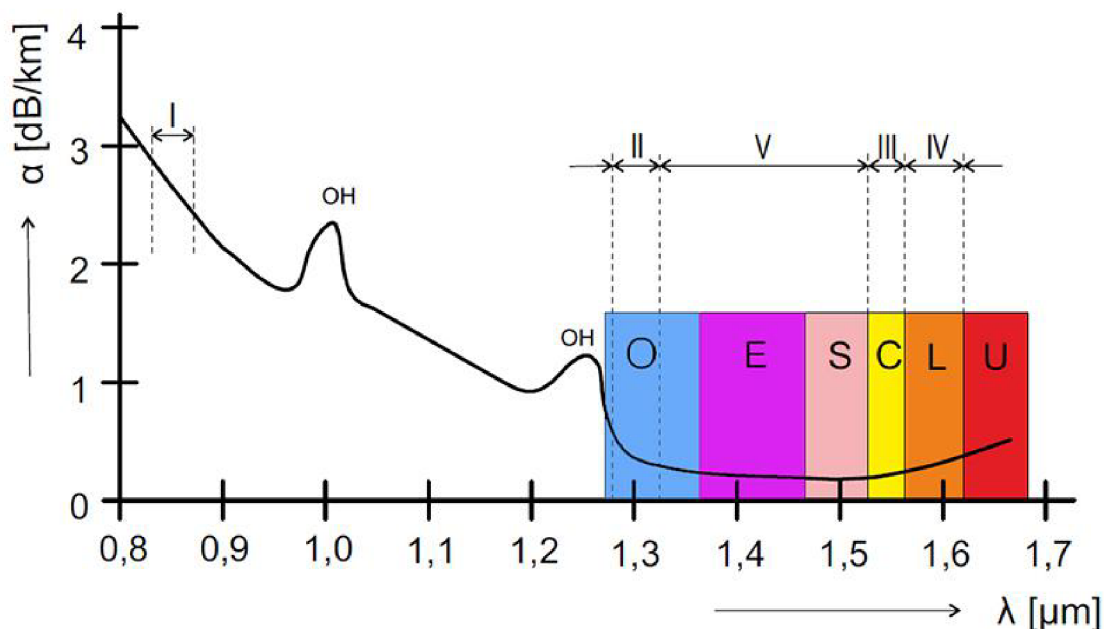
#### 3.1.1 Útlm

Útlm patrí k najdôležitejším parametrom pri prenose optickým vláknom. Útlm optického vlákna je pomer medzi výstupným a vstupným výkonom optického vlákna. Veličina je udávaná v dB, merný útlm je udávaný v dB/km. Útlm optického vlákna sa dá matematicky zapísať rovnicou [15]:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (3.1)$$

kde  $P_{out}$  je výstupný výkon a  $P_{in}$  je vstupný výkon. Útlm môže spôsobovať absorpcia, vyžarovanie paprsku z vlákna, nevhodné fyzikálne vlastnosti optického vlákna ako napríklad ohyb alebo zlá inštalácia vlákna. Útlm môže vznikáť aj pri porušení dokonalej geometrie, pri znečistení optického vlákna alebo pri poškodení materiálu, napríklad rôznymi trhlinami na materiáli. Zmenu útlmu môže spôsobiť aj zmena

teploty. Pri nízkej teplote ( $-30^{\circ}\text{C}$ ) sa môže hodnota útlmu zvýšiť na  $2\text{ dB/km}$ . Závislosť útlmu optického vlákna od vlnovej dĺžky, nazývaná aj útlmová charakteristika je zobrazená na grafe 3.1. Na charakteristike sú vyznačené prenosové okná a pásma, ktoré sa používajú pre prenos v optických sieťach [8].



Obr. 3.1: Útlmová charakteristika [8]

Okno I s vlnovými dĺžkami  $820\text{ nm}$  až  $880\text{ nm}$  je používané pre mnohovidový prenos. Oblasť sa používa v prístupových sieťach. Z toho vyplýva, že prenos dát je na menšie vzdialenosti.

Okno II sa nachádza v oblasti  $1280\text{ nm}$  až  $1335\text{ nm}$ . Oblasť vlnových dĺžok je typická pre použitie jednovidových diaľkových prenosov. Hodnoty útlmu sa pohybujú okolo hranice  $0,35\text{ dB/km}$ .

Okno III, v intervale vlnových dĺžok  $1530\text{ nm}$  až  $1565\text{ nm}$  slúži k prenosu dát formou kremíkového vlákna s útlmom  $0,19\text{ dB/km}$  až  $0,22\text{ dB/km}$ . Používa sa v diaľkových prenosoch.

Okno IV sa nachádza v oblasti  $1565\text{ nm}$  až  $1625\text{ nm}$ , rozdiel útlmu s oknom III je veľmi malý, v okne IV je útlm vyšší len nepatrne. Rozdiel útlmu medzi oknami III a IV nemá žiadne dopady na prenos.

Okno V je oblasťou medzi  $1335\text{ nm}$  a  $1530\text{ nm}$ , kde sa rôznymi technológiami odstránilo lokálne maximum na vlnovej dĺžke  $1380\text{ nm}$ . Spojením okna II a okna V vzniká súvislý prenosový kanál so šírkou pásma až  $50\text{ THz}$ .

Z obrázku 3.1 vyplýva, že celá oblasť vlnových dĺžok je rozdelená do 6 základných kategórií, ktoré sú rozdelené v tabuľke 3.2. Rozdelené oblasti sú definované v do-

poručení ITU-T. Pre tieto prenosy sú následne určené rôzne doporučenia ITU-T s označením skupiny G.652 - G.657 [8].

Pásmo	Názov	Rozsah [nm]
O	Original	1260-1360
E	Extended	1360-1460
S	Short	1460-1530
C	Conventional	1530-1565
L	Long	1565-1625
U	Ultra-long	1625-1675

Tab. 3.2: Pásmo vlnových dĺžok jednovidových optických vlákien

### 3.1.2 Absorpcia

Absorpcia vlákien je jav, v ktorom sa elektrická energia mení na tepelnú energiu. Tento jav sa nazýva tepelná absorpcia. V optických vláknach používaných v telekomunikáciách sa pri prevádzke vlákna mení teplota. Rozdiel je veľmi malý, prakticky nezmerateľný. Všeobecne sa dá absorpcia rozdeliť do dvoch základných skupín:

- vlastná absorpcia
- prímesová absorpcia

Vlastná absorpcia existuje v infračervenej oblasti, v ultrafialovej oblasti a absorpcia vlastným materiálom. V ultrafialovej a viditeľnej oblasti je na úrovni atómov, nedá sa odstrániť. V infračervenej oblasti sa nachádza na molekulárnej úrovni. Zvolením iného materiálu sa dá predchádzať rozkmitaniu molekúl, ktoré vzniká pôsobením svetelnej vlny.

Prímesová, nazývaná aj ako nevlastná absorpcia vzniká prítomnosťou iónov kovov, či iných prímiesí, ktoré sa dostanú do materiálu pri výrobe optického vlákna. Prímiesy sú taktiež zdrojom rôznych strát na optickom vlákne.

### 3.1.3 Ohyby

Pri výrobe optického vlákna, pri manipulácií a pri zapájaní vznikajú v optickom vlákne ohyby. Vplyvom mechanického namáhania majú ohyby za následok energetické straty. Ohyby sa dajú rozdeliť do dvoch kategórií:

- Makroohyby
- Mikroohyby

Mikroohyby vznikajú pri výrobe optického vlákna mechanickým namáhaním tlakom či ťahom, pri inštalácií optického vlákna do optickej sústavy. Mikroohyby nie

sú viditeľné voľným okom, preto ich odstránenie je veľmi náročné. Pri mikroohyboch vznikajú odchýlky od priamočiarej polohy vlákna, napríklad porušená kruhovitosť.

Makroohyby vznikajú podobne ako mikroohyby. Pri makroohyboch platí rovnosť, čím menší polomer ohybu, tým sú straty väčšie. Najčastejšia príčina vzniku makroohybov je nadmerné ohýbanie vlákien.

### 3.1.4 Rozptyl

Rozptylové straty sú dané výrobou optického vlákna. Podľa typu sa dá rozptyl rozdeliť do troch skupín:

- Rayleigho rozptyl
- Mieho rozptyl
- Rozptyl na nečistotách

Rayleigho rozptyl je dominantný jav v optoelektronike. Jav vzniká teplotným kmitaním kryštalickej mriežky. Tento jav má nevýhodu, že sa nedá odstrániť. Nedá sa odstrániť ani ochladením vlákna na absolútnu nulu, pretože pri absolútnej nule dochádza k zamrznutiu jednotlivých atómov, ale svetlo sa okolo zamrznutých atómov dokáže ohýbať. Čiastočné riešenie problému je v posunutí frekvencie do ultrafialovej oblasti.

Mieho rozptyl vzniká na nehomogenitách zrovnateľných s vlnovou dĺžkou. Príčinou rozptylu sú mikroskopické bublinky vo vlákne, kolísanie priemeru jadra alebo nečistoty vo vlákne.

Rozptyl na nečistotách je veľmi podobný Mieho rozptylu. Odlišnosť je v tom, že nehomogenita je vyššia ako vlnová dĺžka svetla. Správnou technológiou výroby sa dá problém odstrániť.

## 3.2 Nelineárne javy

Nelineárne javy vznikajú veľkými hustotami svetelného výkonu vo vlákne. Problém vzniká v tom, že optické vlákna majú malý prierez jadra a pri použití vlnového multiplexu sa do dlhších trás vkladá optický zosilňovač, ktorý zvýši výkon signálu niekoľkonásobne. V prípade, že máme v jednom optickom vlákne desiatky kanálov, tak výkon všetkých laserov sa musí sčítať. Pri návrhu nových optických ciest s použitím prenosových rýchlostí 10 Gb/s a viac na jeden kanál je potrebné problematiku vzniku nelineárnych javov brať do úvahy [8].

### 3.2.1 Trojvlonné zmiešavanie

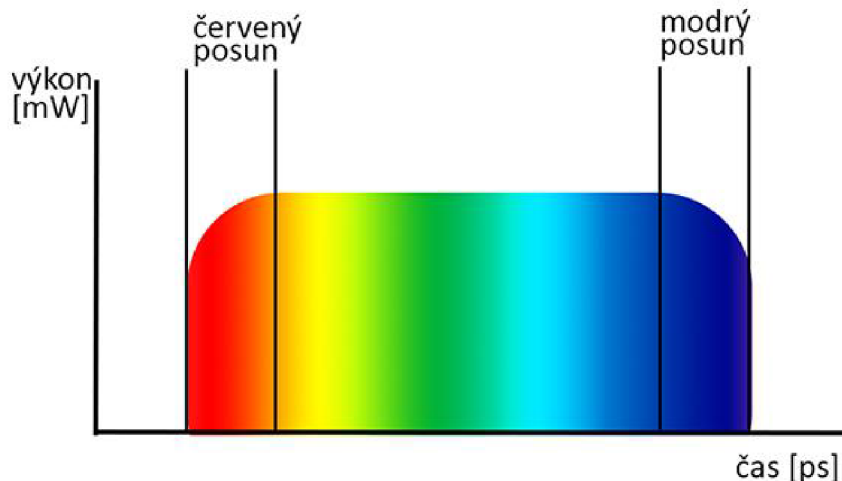
Trojvlonné zmiešavanie je jav, ktorý vzniká pri zmiešavaní dvoch optických vln s rôznymi frekvenciami. Ak prechádzajú obidve vlny nelineárnym prostredím, dochádza k súčtu alebo rozdielu obidvoch zložiek, vytvorí sa tretia zložka. K tomu, aby vznikla výsledná tretia zložka, je potrebné, aby vlny boli rovinné, jedna vlna musí byť kombináciou druhej vlny, tým dochádza k splneniu fázovej podmienky. Popísaný jav sa nazýva jav druhého rádu.

### 3.2.2 Kerrov jav

Tento jav prvýkrát potvrdil a popísal fyzik John Kerr. Jeho teória nám popisuje závislosť indexu lomu od intenzity svetelného paprska, ktorý vstupuje do prostredia. Zmena indexu lomu sa v rôznych častiach prostredia mení. Jav sa využíva vo vlastnej fázovej modulácii a v krížovej modulácii. Kerrov jav sa zvykne označovať ako jav tretieho rádu.

### 3.2.3 Vlastná fázová modulácia

Vlastná fázová modulácia (Self-Phase Modulation-SPM) je jav, ktorý sa označuje aj ako automodulácia. V automodulácii dochádza k modulácii paprsku prechádzajúceho nelineárnym prostredím tretieho rádu. Modulácia spočíva v zmene indexu. Zmena indexu je závislá od indexu lomu, dĺžky dráhy, výkonu paprsku a prierezu optického prostredia. V prípade, že sa zmení index lomu svetelného paprsku, dochádza k modulácii signálu. V praxi to znamená, že sa posunú nahor vlnové dĺžky nástupnej hrany (červený posun) a vlnové dĺžky vzostupnej hrany sa posunú smerom dolu (modrý posun), to znamená, že dochádza k medzisymbolovej interferencii. Na obrázku 3.2 je popísaný dej naznačený [8] [20].



Obr. 3.2: Vlastná fázová modulácia [7]

### 3.2.4 Krížová modulácia

Jav krížovej modulácie (Cross-Phase Modulation-XPM) vychádza z Kerrovho javu. Ak vláknom prechádza dva a viac paprskov, dochádza k vzájomnému prekrytiu paprskov. Prvý impulz spôsobí zmenu indexu lomu, podľa zmeny fáze prvej vlny, sa zmení index lomu druhej vlny. Dôsledkom javu dochádza k vzájomnému ovplyvňovaniu prvkov a tým sa môže zmeniť ich spektrum [25] [20].

### 3.2.5 Štvorvlnné zmiešavanie

Štvorvlnné zmiešavanie vln (Four-Wave Mixing-FWM) je jav, ktorý musí byť braný do úvahy pri návrhu prenosov s použitím hustého vlnového multiplexu (DWDM-Dense Wave Length Multiplex). V prípade, ak je potrebné nadviazať svetelný paprsek s veľkou intenzitou, tak odozva optického prostredia sa stáva nelineárnou. Tým vzniká jav štvorvlnného zmiešavania. FWM vzniká pri nadväzovaní troch svetelných paprskov s rôznymi vlnovými dĺžkami. Dôsledkom javu je vznik štvrtej vlny. Štvrtá vlna je odlišná od predchádzajúcich troch vrstiev. Platnosť štvorvlnného zmiešavania dokazuje rovnica [25]:

$$\Delta k = k_1 + k_3 - k_4 - k_2 \quad (3.2)$$

## 3.3 Disperzia

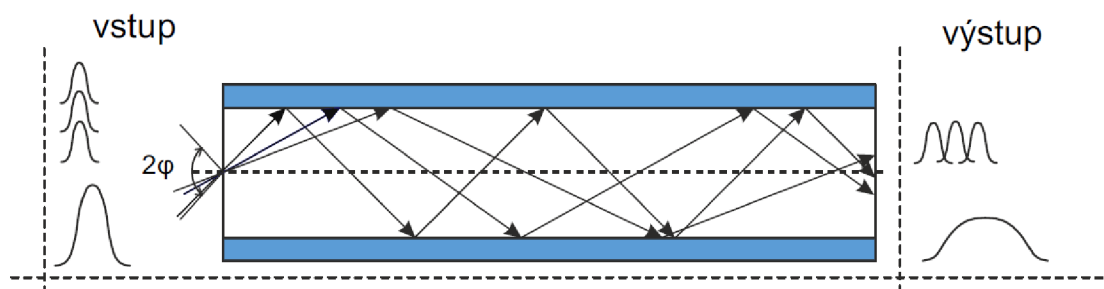
Disperzia je jav, ktorý vzniká pri prenose svetelných paprskov v optickom vlákne. Disperziu spôsobujú rozdielne šírky impulzu meranej v polovici výšky na vstupe

a na výstupe optického vlákna. Dôsledkom disperzie je rozšírenie impulzov svetelných paprskov v časovej oblasti v digitálnych systémoch. Rozšírený signál zasahuje do okolitých bitov prenášaných dát a vzniká jav, ktorý sa nazýva interferencia. Interferencia je vzájomné pôsobenie signálov, ktoré spôsobuje nárast bitovej chybovosti. V analógových systémoch sa zmenší frekvenčná oblasť modulačného signálu optickej nosnej. Disperzia limituje niektoré potrebné vlastnosti pre prenos dát, napríklad šírku prenášaného pásma, rýchlosť alebo vzdialenosť prenosu. Disperzia sa podľa rôznych prejavov delí do kategórií:

- Vidová
- Chromatická
  - Materiálová
  - Vlnovodná
- Polarizačná
- Profilová

### 3.3.1 Vidová disperzia

Mnohovidové optické prenosy rozkladajú prenášané dáta do viacerých vidov. Zákon optiky tvrdí, že čím vyšší uhol, ktorý zvierajú trajektória svetelného lúča s osou svetlovodu, tým je dráha lúča dlhšia a tým rýchlosť lúča klesá. Z teórie vyplýva, že vidy s nižším uhlom sa šíria rýchlejšie. Dôsledkom javu je rozšírenie vstupného impulzu na výstupe optického vlákna, viď obrázok 3.3 [9].

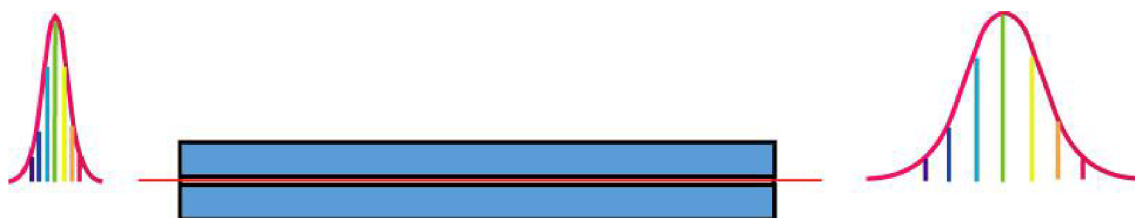


Obr. 3.3: Vidová disperzia v mnohovidovom prenose

### 3.3.2 Chromatická disperzia

Chromatická disperzia je dôležitý jav pri prenosoch pomocou jednovidových vlákien, pri prenosoch mnohovidovými vláknami sa disperzia príliš neprejavuje. Chromatická disperzia je daná závislosťou indexu lomu od frekvencie svetelného paprsku. Princíp chromatickej disperzie je zobrazený na obrázku 3.4. Pri vyšších prenosových

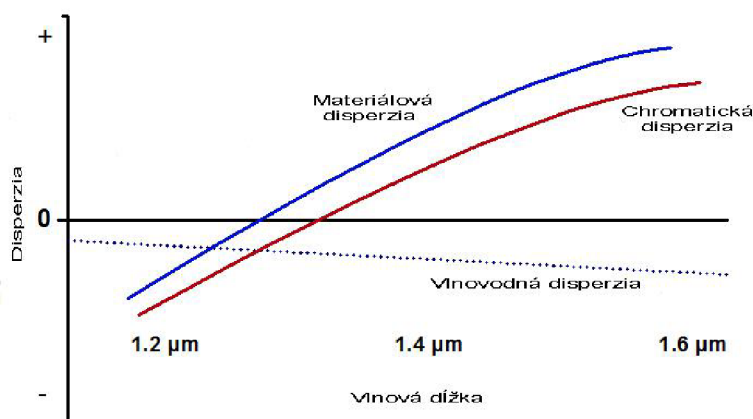
rýchlostiach s užšími impulzmi blízko pri sebe spôsobí rozširovanie impulzov vyššiu hodnotu skreslenia signálu. Týmto chromatická disperzia obmedzuje prenosové rýchlosti systému. Z obrázku 3.5 vyplýva, že závislosť indexu lomu od vlnovej dĺžky nie je lineárna. Jednotlivé frekvencie sa šíria po vlákne po rôznych trajektóriách, to znamená, že doba jednotlivých frekvencií nie je rovnaká [25] [15].



Obr. 3.4: Chromatická disperzia

### 3.3.3 Materiálová disperzia

Materiálová disperzia je zapríčinená závislosťou indexu lomu od vlnovej dĺžky optického žiarenia. Svetelné zdroje nevyžarujú monochromatické svetelné žiarenie, ale vyžarujú svetelné žiarenie so špecifickou spektrálnou šírkou. Jednotlivé vlnové dĺžky spektra sa šíria v optickom vlákne rôznymi rýchlosťami. Dôsledkom toho sa zvyšuje šírka impulzov, ktoré sa šíria v optickom vlákne. Rozšírenie impulzu je úmerné spektrálnej šírke zdroja žiarenia a dĺžke optického vlákna [12].



Obr. 3.5: Porovnanie disperzií [13]

### 3.3.4 Vlnovodná disperzia

Pri vlnovodnej disperzii je dôležitým faktorom závislosť oneskorenia od frekvencie svetla. Tvar vidu sa mení v závislosti od frekvencie. Časť svetelného paprsku sa šíri

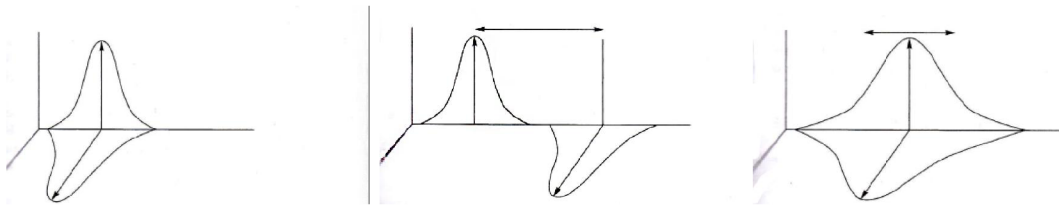


v jadre optického vlákna, časť svetelného paprsku uniká v plášti optického vlákna. Pri výrobe optického vlákna sa dajú čiastočne ovplyvniť hodnoty vlnovej disperzie. Konštrukciou optického vlákna, polomerom jadra optického vlákna, indexom lomu optického vlákna je možné hodnoty vlnovodnej disperzie meniť [21].

### 3.3.5 Polarizačná disperzia

Pri zvyšovaní prenosovej rýchlosti sa začína objavovať polarizačná disperzia. Pri polarizačnej disperzii sa vyskytuje fyzikálny jav, ktorý sa nazýva polarizácia svetla. Polarizačná vidová disperzia je závislá od rýchlosti šírenia vidov v optickom vlákne. Vid, ktorý prechádza optickým vláknom sa šíri v dvoch vzájomne na sebe kolmých polarizačných rovinách. Pri akejkoľvek kruhovej nesymetrii optického vlákna alebo pri poškodení jadra optického vlákna sa začína prejavovať polarizačná disperzia. Najčastejšie príčiny vzniku polarizačnej disperzie sú mikroohyby, vznikajúce pri montáži káblu alebo nepresnosti vznikajúce pri výrobe optického vlákna. Tieto chyby majú za následok šírenie polarizácií rôznymi rýchlosťami a tým aj skreslenie signálu.

Na obrázkoch 3.6, je znázornený priebeh polarizácie. Na obrázku 3.6 vľavo je vidieť vid prechádzajúci vláknom v dvoch na sebe kolmých rovinách. Z obrázku je vidno, že obidve roviny sú v jednej fáze. Na obrázku 3.6 v strede je znázornený priebeh polarizácie. Jedna rovina je posunutá. Na obrázku 3.6 vpravo je znázornené, ako samotná disperzia vznikla [21].



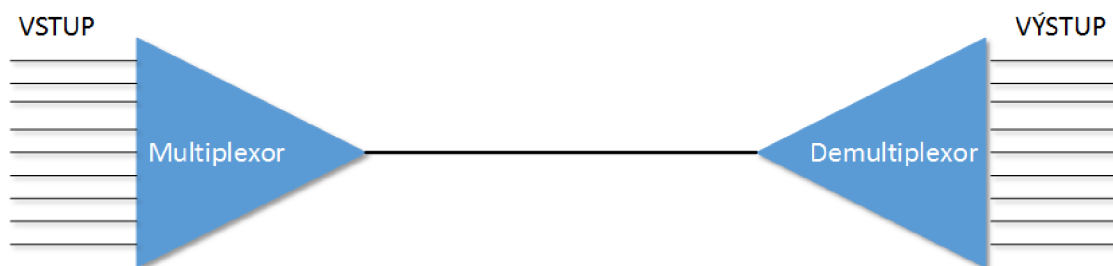
Obr. 3.6: Polarizačná disperzia

### 3.3.6 Profilová disperzia

Profilová disperzia je závislosť pomerného rozdielu indexov lomu jadra a pláštu optického vlákna od vlnovej dĺžky. Závislosť je veľmi malá, ale pri vysokých prenosových rýchlostiach je potrebné brať do úvahy jej vplyv. Zložením profilovej, materiálovej aj vlnovodnej disperzie sa získa chromatická disperzia, pretože všetky spomenuté disperzie sú závislé od vlnovej dĺžky svetla [15].

## 4 MULTIPLEXOVANIE

Multiplexovanie je špeciálna metóda prenosu, ktorá využíva viacnásobné využívanie jedného prenosového vedenia. Prenos cez multiplex sa nazýva multiplexný prenos. Multiplexor je zariadenie, ktoré zlučuje viac kanálov do jednej prenosovej cesty. Na strane príjemcu sa nachádza demultiplexor, ktorý má opačnú funkciu ako multiplexor. Rozdeľuje prijaté dáta z jednej prenosovej cesty do viac kanálov. Princíp multiplexovania je zobrazený na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Princíp multiplexu a demultiplexu

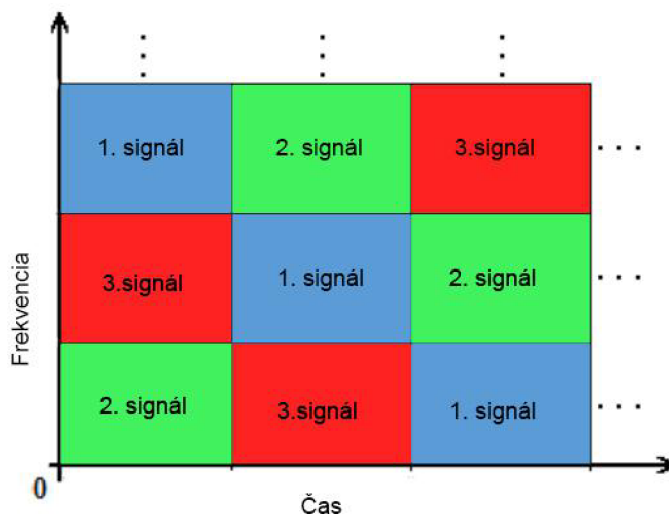
V technike multiplexovania sa používajú dva základné typy multiplexovania: časový multiplex a frekvenčný multiplex. Jednotlivé multiplexy sa delia do ďalších skupín.

### 4.1 Kódový multiplex CDM

Kódový multiplex CDM (Code Division Multiplex) sa používa v telekomunikačných technológiách, ale aj v optických sieťach. Základná myšlienka kódového multiplexu je daná v určitých kódoch, ktoré slúžia ku kódovaniu kanálov do jedného prenosového média. Na strane príjemcu demultiplexor získa celý balík dát a na základe použitých kódov dáta rozdelí do viac výstupných kanálov. Je dôležité, aby multiplexor aj demultiplexor poznali kódy na kódovanie a dekódovanie dát. Princíp multiplexu je načrtnutý na obrázku 4.2 [23].

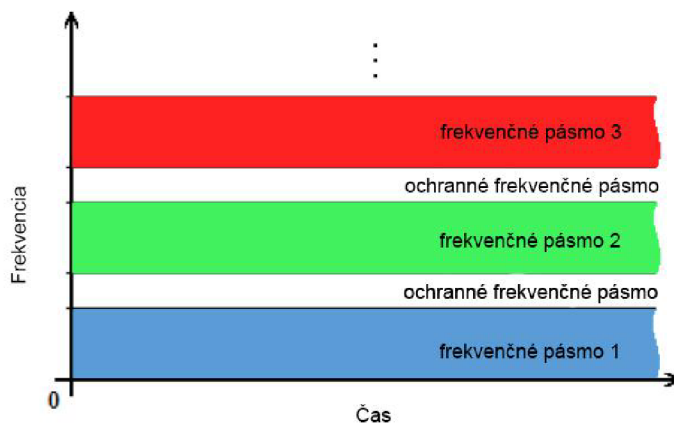
### 4.2 Frekvenčný multiplex FDM

Základom frekvenčného multiplexu FDM (Frequency Division Multiplex) je rozdelenie celého prenášaného pásma na viac frekvenčných pásiem. Každý zdroj signálu má svoje frekvenčné pásmo, frekvenčné pásma sa neprekrývajú. Z obrázku 4.3 vyplýva,



Obr. 4.2: CDM Multiplex [24]

že frekvenčné pásma sa nenachádzajú hneď vedľa seba. Medzi frekvenčnými pásmami sa nachádza určité ochranné frekvenčné pásmo. Ochranné frekvenčné pásmo plní ochrannú funkciu, aby sa pásma vzájomne neovplyvňovali.

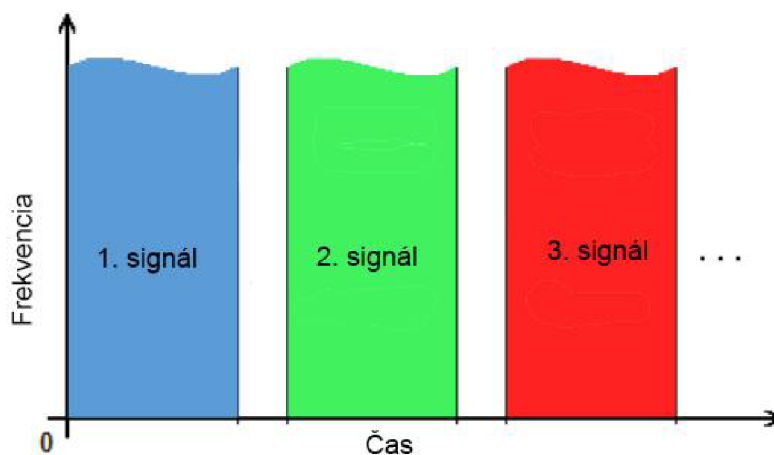


Obr. 4.3: Frekvenčný multiplex [24]

### 4.3 Časový multiplex TDM

Princíp časového multiplexu TDM (Time Division Multiplex) je veľmi podobný ako u frekvenčného multiplexu. U časového multiplexu sa rozdeľujú časové úseky. Každý kanál má určitý časový úsek v ktorom môže vysielat dáta. Pri časovom multiplexe

je dôležité, aby sa jednotlivé časové úseky neprekrývali a vzájomne neovplyvňovali. Na obrázku 4.4 je vidieť, že medzi jednotlivými časovými intervalmi sa nachádza ochranné časové pásmo v ktorom sa nevysielajú dáta. K prenosu dát prostredníctvom optických sietí sa používa technológia OTDM (Optical Time Division Multiplex), ktorá je rovnaká ako technológia TDM.



Obr. 4.4: Časový multiplex [24]

## 4.4 Vlnový multiplex WDM

Vlnový multiplex WDM (Wavelength Multiplex) dokáže prenášať na jednom optickom vlákne viac signálov. Funguje na princípe odlišnosti vlnovej dĺžky. Každý prenášaný signál má inú vlnovú dĺžku. Na základe tejto rozdielnosti sa dajú rozpoznať zdroje signálu. Počet nosných vlnových dĺžok v optickom vlákne závisí od fyzických parametrov samotného optického vlákna. Výhodami vlnového multiplexu je možnosť prenosu signálu s rôznymi prenosovými rýchlosťami, možnosť prenosu signálu s rôznymi modulačnými technikami, pridaním vlnovej dĺžky možnosť zvýšenia prenosovej rýchlosti. Dôležitou výhodou WDM je možnosť transparentného prenosu optických kanálov s rýchlosťami od 140 Mb/s až po 10 Gb/s. S použitím WDM je možné budovať chrbticové (páteřní) siete. Vďaka WDM je možné ušetriť počet vlákien na prenesenie určitej kapacity [22] [14].

Základný princíp vlnového multiplexu je zobrazený na obrázku 4.5. Na vstupe sa nachádza niekoľko kanálov s rôznymi vlnovými dĺžkami. Prostredníctvom multiplexu sú všetky vlnové dĺžky vložené do jedného optického vlákna. Tým je dosiahnutý súčasný prenos viac vlnových dĺžok v jednom optickom vlákne, vytvorí sa viac optických kanálov. Pri zlučovaní kanálov s podobnými vlnovými dĺžkami, je potrebné



Obr. 4.5: Princíp WDM multiplexu

dbať na určitý odstup medzi dvomi blízkymi vlnovými dĺžkami. Na základe hustoty kanálov použitých v jednom optickom vlákne sa rozdeľuje multiplex na:

- CWDM
- DWDM

#### 4.4.1 Hrubý vlnový multiplex CWDM

Pre hrubý vlnový multiplex CWDM (Coarse Wave Division Multiplex) sa definovali kanály s presnými hodnotami nosných vlnových dĺžok a odstupy medzi nimi vid' tabuľka 4.1 [14].

Nosné číslo	Nominálna vlnová dĺžka [nm]	Rozdelenie spektra
1 - 5	1270 - 1350	pásмо O
6 - 10	1370 - 1450	pásмо E
11 - 14	1770 - 1530	pásмо S
15	1530 - 1565	pásмо C
16 - 18	1565 - 1625	pásмо L

Tab. 4.1: Tabuľka vlnových dĺžok podľa ITU-T G.694.2 [11]

#### 4.4.2 Hustý vlnový multiplex DWDM

Technológia hustého vlnového multiplexu DWDM (Dense Wavelength Multiplex) bola vyvinutá za účelom zvýšenia prenosovej kapacity, vzdialenosti a poskytnutia najhustejšieho rozostupu vlnových dĺžok. Pri použití technológie DWDM je potrebné, aby spektrálna charakteristika zdroja svetla bola čo najužšia. V multiplexore a demultiplexore sa používajú rôzne tenkovrstvové filtre alebo úzkopásmové referenčné filtre.

Všetky potrebné vlastnosti a charakteristiky prenosu pomocou technológie DWDM sú popísané v doporčení ITU-T G.694.1. Doporučení definuje pre technológiu

DWDM spektrálny raster, ktorý vychádza z normalizovanej frekvencie 193,1 THz. Doporučenie podporuje rôzne delenie kanálov v rozsahu od 12,5 GHz do 100 GHz a viac (celočíselné násobky 100 GHz). Doporučenie ITU-T G 694.1 podporuje aj nerovnomerné delenie. V súčasnosti doporučenie definuje 4 základné rastre s delením 12,5 GHz; 25 GHz; 50 GHz a 100 GHz. Počet kanálov nie je presne špecifikovaný, preto sa bude odvíjať od použitého pásma. Napríklad pri použití 40 kanálov pri 100 GHz delení ( $100 \text{ GHz} * 40 = 4\,000 \text{ GHz} = 4 \text{ THz}$ ) je možné obsadiť celé pásmo C. V prípade, že použijeme 50 GHz rozdelenie, je možné použiť dvojnásobný počet kanálov. V praxi sa používajú systémy, ktoré pracujú s 40, 80 alebo s 160 kanálmi v oblasti vlnových dĺžok od 1490 nm do 1620 nm (pásma S,C a L). Je potrebné vziať v úvahu, že dosah uvažovaných kanálov a nároky na odstup signál, šum sa so zvyšujúcou prenosovou rýchlosťou v kanáloch DWDM zvyšujú [10].

Tab. 4.2: Rozdelenie menovitých hodnôt frekvencií pre DWDM [10]

Menovité hodnoty frekvencií (THz) pre pásma:			
12,5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz
195,9375	-	-	-
195,9250	195,925	-	-
195,9125	-	-	-
195,9000	195,900	195,90	195,9
195,8875	-	-	-
195,8750	195,875	-	-
195,8625	-	-	-
195,8500	195,850	195,85	-
195,8375	-	-	-
...	...	...	...
193,1000	193,100	193,10	193,1
193,0875	-	-	-
193,0750	193, 075	-	-
193,0625	-	-	-
193,0500	193,050	193,05	-
193,0375	-	-	-
193,0250	193,025	-	-
193,0125	-	-	-
193,0000	193,000	193,00	193,0
192,9875	-	-	-
192,9750	192,975	-	-
192,9625	-	-	-
...	...	...	...
184,7750	184,775	-	-
184,7625	-	-	-
184,7500	184,750	184,75	-
184,7375	-	-	-
184,7250	184,725	-	-
184,7125	-	-	-
184,7000	184,700	184,70	184,7

## 5 PRVKY PRENOSOVÝCH SYSTÉMOV

V optickej sústave sa prenášajú dáta prostredníctvom svetelných paprskov. K tomu, aby vznikli a aby sa bez problémov šírili svetelné paprsky sú potrebné zdroje svetelného žiarenia, detektory svetelného žiarenia, filtre, zosilňovače a ďalšie doplnkové prvky.

### 5.1 Zdroje žiarenia

Zdroje žiarenia sú základom optických prenosových sietí. Ku zvýšeniu kvality prenosu sa používajú určité požiadavky, ktoré musia svetelné zdroje spĺňať, aby bola kvalita prenosu dostatočná. Jednou zo základných požiadaviek u zdrojov žiarenia je spektrálna čiara a šírka spektra. Čiara by mala byť dostatočne úzka, aby nezasahovala do susedných kanálov a neovplyvňovala ich. Všeobecne platí teoretický predpoklad, že čím nižšia šírka optického spektra, tým je použitie daného zdroja žiarenia výhodnejšie. Ďalšou dôležitou vlastnosťou zdrojov žiarenia je stabilita vlnovej dĺžky. Pri prenosoch optických sietí je dôležité, aby nosná frekvencia svetelného paprsku bola stabilná. Posun o 1 nm môže spôsobiť nefunkčnosť WDM optického systému. Medzi ďalšie dôležité parametre patrí nepochybne výkon. Dostatočne vysoký výkon je potrebný k úspešnej detekcii signálu na prijímacej strane. V optických prenosových sieťach sa používajú ako zdroje žiarenia LED diódy a lasery. Na obrázku 5.1 je porovnanie spektrálnych charakteristík LED diódy (vľavo) a lasera (vpravo).

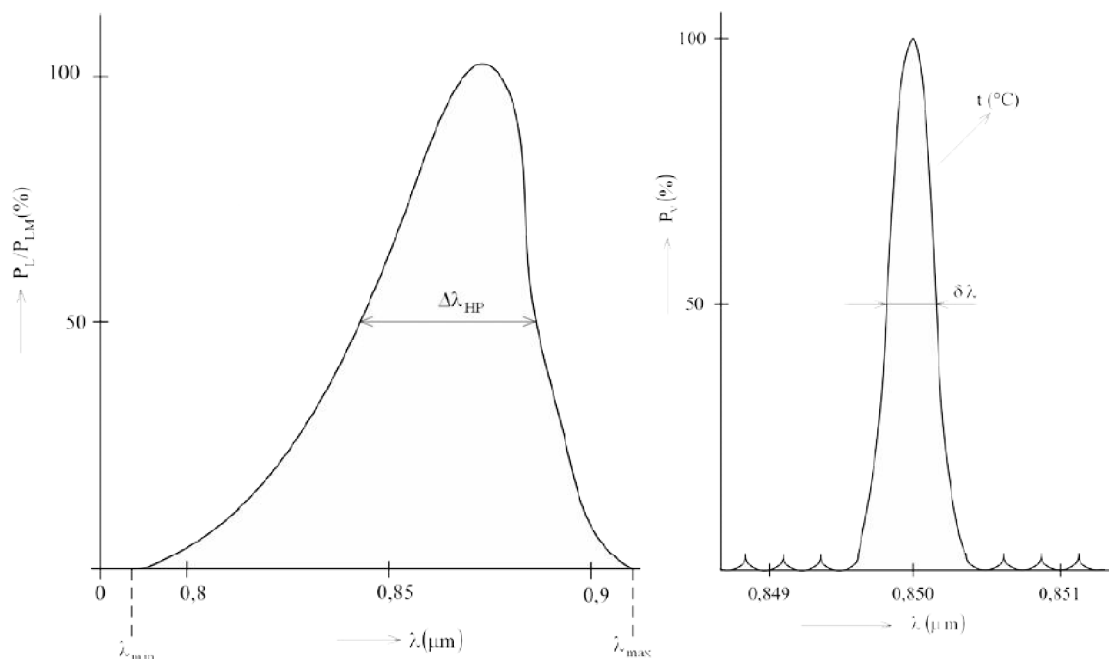
LED (light-emitting) diódy sú luminiscenčné diódy, emitujúce svetelné žiarenie. LED diódy sa vyrábajú v dvoch základných prevedeniach: povrchové diódy a hránovo emitujúce diódy. Diódy sú používané ako zdroj svetelného žiarenia s nižšími prenosovými rýchlosťami (okolo 100 Mb/s). Z dôvodu širokej spektrálnej čiary sa diódy vo WDM sieťach prestali používať.

Laserové diódy sú polovodičové súčiastky, ktoré slúžia k premene elektrického prúdu na svetelné žiarenie. Laserové diódy sú malé a majú dlhú dobu životnosti. Výhodou laserových diód je vysoký emitovaný výkon. V súčasnosti sa používajú lasery s vnútorným rezonátorom a s rozprestrenou spätnou väzbou tzv. DFB (Distributed-feedback Laser), Fabry - Perotove diódy, lasery s trvalou alebo spojitou vlnou a lasery s rozprestenými Braggovými reflektormi - DBR (distributed Bragg reflector) [2].

DBR lasery používajú zmenu prietoku prúdu mriežkou, tým sa mení index lomu. Vďaka tejto vlastnosti sa dá laser jemne doladovať.

Lasery s trvalou alebo spojitou vlnou (continuous wave), nazývané aj ako CW lasery, sú lasery s konštantnou emisiou svetla. Emisia môže nastať v režime jedného





Obr. 5.1: Porovnanie spektrálnych charakteristík

rezonátora alebo vo viacerých. Prvé CW lasery boli hélium-neónové lasery, ktoré pracovali so svetlom na vlnových dĺžkach 1153 nm. Neskôr sa začali používať lasery s vlnovou dĺžkou 632,8 nm. CW lasery sú ideálnym použitím pri optických sieťach. Výstupný výkon vyžarovania je v rozsahu od 10 mW do 10 W. Lasery sú dostupné v rôznych vyhotoveniach, dokážu emitovať svetlo v infračervenej oblasti, viditeľnej oblasti aj ultrafialovej oblasti [18].

Neskôr boli vyvinuté aj mnohovidové zdroje svetla. Hlavnou myšlienkou mnohovidových laserov je veľmi rýchle ladenie niekoľkých laserov s rôznymi vlnovými dĺžkami. Ladenie sa realizuje výberom aktívneho lasera. Mnohovidové zdroje žiarenia oscilujú na rôznych vlnových dĺžkach. Spomínané svetelné zdroje boli vyvinuté za účelom použitia vo WDM optických systémoch.

## 5.2 Detektory žiarenia

Základným prvkom detekcie optického žiarenia sa používa fotodióda, ktorá využíva PN priechod. Ako detektory optického žiarenia sa používajú lavínové diódy a PIN diódy. Práve PIN diódy sú v praxi vo WDM často používané. V praktickej časti, pri zostavovaní modelu DWDM optickej siete sú použité tiež. PIN diódy môžu detekovať široké spektrum signálu. Dôležitým parametrom PIN diódy je citlivosť diódy. Citlivosť je daná pomerom prúdu v závernom smere ku výkonu optického žiarenia, ktorý dopadá na fotodiódu [3]. PIN dióda sa od klasickej fotodiódy odlišuje tým, že

materiály sú dotované, tak aby sa nosiče náboja nezdržovali a rýchlo uvoľnili pole strednej vrstvy I. Stredná vrstva I sa nachádza medzi časťami P a N. Účelom vrstvy I je okrem iného aj zvyšovať rýchlosť prechodu. Preto sa PIN dióda aplikuje do zariadení, kde je potrebná rýchla reakcia. Spolu s diódou musí byť zapojený rezistor, avšak rezistor produkuje určitý šum. Čím je vyššia hodnota odporu na rezistore, tým je nižší prúdový šum rezistora[1].

Ďalšou používanou diódou je lavínová fotodióda. Lavínová fotodióda je veľmi citlivý polovodičový detektor žiarenia. Dióda používa k svojej funkcii lavínový jav. Dióda je napájaná záverným napätím s hodnotami desiatok až stoviek Voltov. V tomto prípade sú elektróny a diery excitované dopadom fotonov, ktoré sú urýchľované silným elektrickým polom. Výhodou lavínovej diódy je veľmi vysoká citlivosť. V porovnaní s PIN diódou, má však lavínová dióda vyššie hodnoty šumu [19].

## 5.3 Filtre

Úlohou WDM multiplexoru je združovanie jednotlivých svetelných zväzkov do jedného vlnovodu. K tomu, aby sa svetelné zväzky rozdelili správne do jedného kanálu slúžia filtre. Filtre rozdeľujú jednotlivé paprsky podľa vlnovej dĺžky svetelného paprsku. Filtre môžu potlačiť vnútrokanálovú interferenciu, vznikajúcu malým rozstupom kanálov pri malých stratách. Na strane demultiplexoru sa nachádzajú filtre, ktoré rozdeľujú paprsky z kanálu na viac dielkov podľa vlnovej dĺžky. Filtre, nazývané aj ako selektívne členy sú recipročné. To znamená, že sa dajú použiť pre multiplexovanie aj demultiplexovanie. Filtre sa dajú rozdeliť na interferenčné a disperzné, respektíve laditeľné a pevné filtre. Pri použití technológie WDM sa v praxi uplatňujú filtre s optickými mriežkami alebo interferenčnými filtrami [16].

### Laditeľné filtre

- Fabry-Perot
- Fabry-Perot s tekutými kryštálmi
- Mach-Zehnder interferometre
- Akusticko-optické
- Elektrooptické

### Pevné filtre

- Vlnovody usporiadané do mriežky
- Braggova mriežka
- Interferenčné tenkovrstvové

Filter	Rozsah ladenia (nm)	Čas preladenia ( $\mu\text{m}$ )
Fabry-Perot	500	1000-10000
Akusticko-optický	250	10
Elektrooptický	16	0,001-0,010
Fabry-Perot s tekutými krištálmi	50	0,5-10

Tab. 5.1: Optické filtre a ich parametre [16]

## 5.4 Optické zosilňovače

Optické signály sa dajú prenášať v optickom vlákne na relatívne dlhé trasy. Optické signály s dĺžkou trasy približne do 80 km sa dajú prenášať bez použitia zosilňovača. Optické zosilňovače pracujú na rovnakom princípe ako elektrické zosilňovače, líšia sa v tom, že optický zosilňovač zosilní len výkon signálu, ale neobnovuje tvar signálu. Tento typ zosilňovača sa označuje 1R (re-amplification), čo znamená, že signál je zosilnený. Existujú zosilňovacie prvky, ktoré najprv prevedú optický signál na elektrický, zosilnený elektrický signál je znovu prevedený na optický. Tento proces sa označuje ako 3R (re-amplification, re-shaping, re-timing). V procese je signál zosilnený, obnovený a jeho tvar je obnovený. Obnovenie tvaru signálu eliminuje šum. Obnovenie časovania vykonáva časovú synchronizáciu signálu s pôvodným signálom. Avšak použitie 3R zosilňovačov nie je vhodné vo WDM optickej sieti. Preto sa vo WDM sieťach používajú zosilňovače, ktoré nekonvertujú optický signál na elektrický signál. Pri použití optického zosilňovača vzniká riziko pridania šumu do optického signálu. Vo WDM optických sieťach sa používajú dva typy zosilňovačov:

- optický vláknový zosilňovač (OFA-optical fiber amplifier)
- polovodičový optický zosilňovač (SOA-semiconductor optical amplifier).

Medzi základné parametre vo WDM sieťach patria zosilnenie signálu, veľkosť výstupného signálu a rozsah vlnových dĺžok optického žiarenia [16].

Vlastnosti	Optický zosilňovač	Polovodičový zosilňovač
Maximálne zosilnenie (dB)	25-30	20-25
Straty	0,1-2	6-10
Výstupný saturačný výkon (dBm)	13-23	5-20
Šumové číslo (dBm)	4-6	7-12

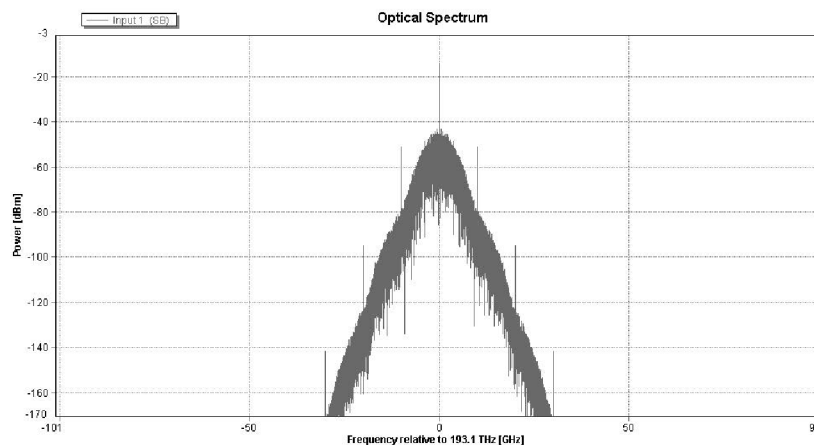
Tab. 5.2: Porovnanie vlastností optických zosilňovačov

## 6 MODULAČNÉ METÓDY

Modulácia je ovplyvňovanie niektorého z parametrov harmonickej nosnej vlny modulačným signálom. Medzi parametre, ktoré sa dajú modulovať patrí amplitúda, frekvencia alebo počiatočná fáza. Každý z uvedených parametrov sa dá meniť v závislosti od modulačného signálu. Výsledkom procesu modulovania je modulovaný signál. Podľa typu signálu sa dajú modulácie rozdeliť do dvoch základných skupín. Modulačný signál môže byť analógový alebo digitálny. Pri modulácii digitálneho (impulzného) signálu sa namiesto slova modulácia požíva termín kľúčovanie. Pri digitálnej modulácii je signál vyjadrený vo forme bitovej postupnosti [23]. Pri tvorbe DWDM optickej siete sú použité a otestované nasledujúce modulácie.

### 6.1 NRZ

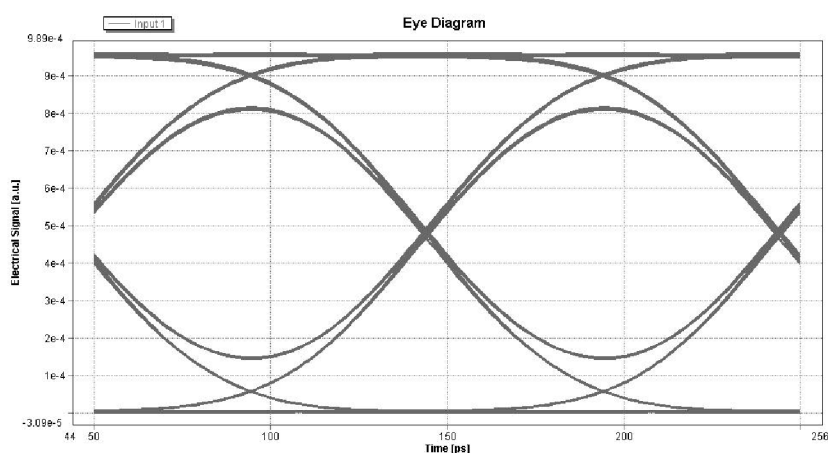
NRZ (Non return to zero) patrí medzi najjednoduchšie modulačné metódy. Impulz NRZ sa generuje počas celej doby trvania jedného bitu. Na obrázku 6.1 je znázornené optické spektrum signálu. Výhodou NRZ modulácie je nízka šírka pásma pre vysielač aj prijímač. Impulzy majú úzke optické spektrum. Medzi výhody patrí aj zredukovaná spektrálna šírka pásma, ktorá spôsobuje vyššiu odolnosť proti disperzii. Úzke spektrum signálu NRZ impulzu je výhodné pri použití WDM a DWDM systémov [4].



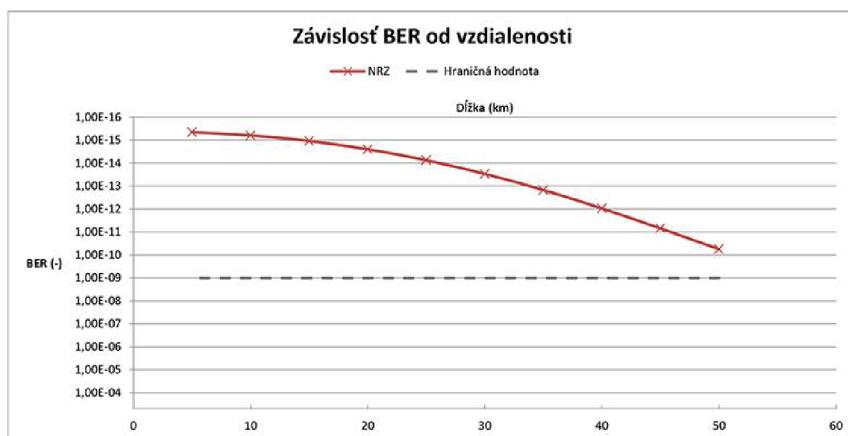
Obr. 6.1: Optické spektrum NRZ modulácie

NRZ modulátor sa skladá z fotodiódy, PRBS generátora (pseudorandom binary sequence), NRZ kodéra, filtra, MZM (Mach-Zhender) modulátora a útlmového článku. Laserová fotodióda k vyžarovaniu svetelnej vlny používa DFB laser. DFB laser produkuje spojitý optický signál. Na obrázku 6.1 je zobrazené optické

spektrum fotodiódy. Ďalším potrebným článokm NRZ modulátora je PRBS generátor, ktorý generuje pseudonáhodnú bitovú (sekvenciu) postupnosť. Ku generovaniu pseudonáhodnej bitovej sekvencie sa používa určitý deterministický algoritmus. Pseudonáhodná sekvencia je následne zakódovaná vzorkovaným signálom, ktorý generuje NRZ kódér. Zakódovaná sekvencia bitov sa filtruje pomocou Gaussovho filtra. Filter uhladzuje obdĺžnikový signál a odstraňuje jemné nedostatky signálu. V NRZ modulátore sa nachádza Mach-Zehnder modulátor (MZM), ktorý slúži na riadenie amplitúdy optickej vlny. Ako posledná časť NRZ modulátora sa nachádza útlmový článok, ktorý utlmuje vysielaný signál [26].



Obr. 6.2: Diagram oka NRZ modulácie



Obr. 6.3: Graf závislosti BER od vzdialenosti NRZ modulácie

NRZ demodulátor obsahuje na vstupnej časti PIN fotodiódu, ktorá spracuje optický signál. Po prijatí signálu sa pomocou predzosilňovača signál zosilní na požadovanú úroveň. V demodulátore sa nachádza elektrický filter, ktorý filtruje na zá-

klade prenosovej funkcie. V modeli je použitý Gaussov filter. Filter samozrejme podporuje aj iné funkcie ako sú napríklad Butterworthova, Besselova alebo Chebyshevova funkcia. Upravený a demodulovaný signál je možné analyzovať. Z analýzy je možné získať diagram oka NRZ modulácie, ktorý je zobrazený na obrázku 6.2. Pomocou analyzátoru sú v tabuľke 6.1 namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti [26].

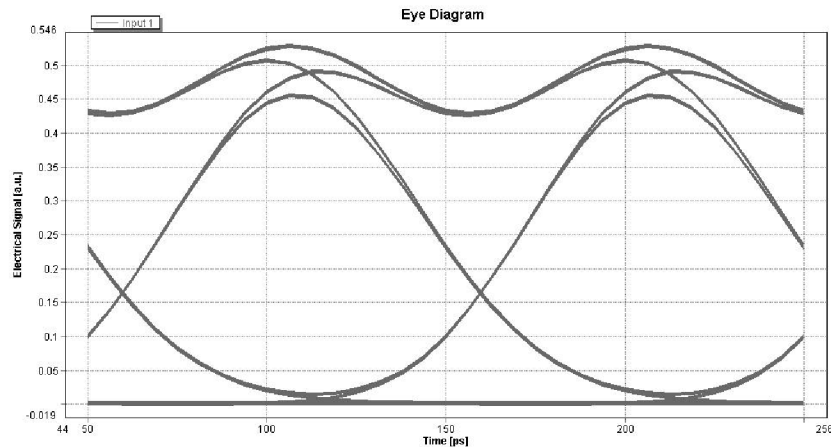
Tab. 6.1: Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie NRZ

Vzdialenosť (km)	BER(-)
5	4,4916e-16
10	6,2764e-16
15	1,0926e-15
20	2,5216e-15
25	7,5306e-15
30	2,9642e-14
35	1,4881e-13
40	9,4218e-13
45	6,9823e-12
50	5,6194e-11

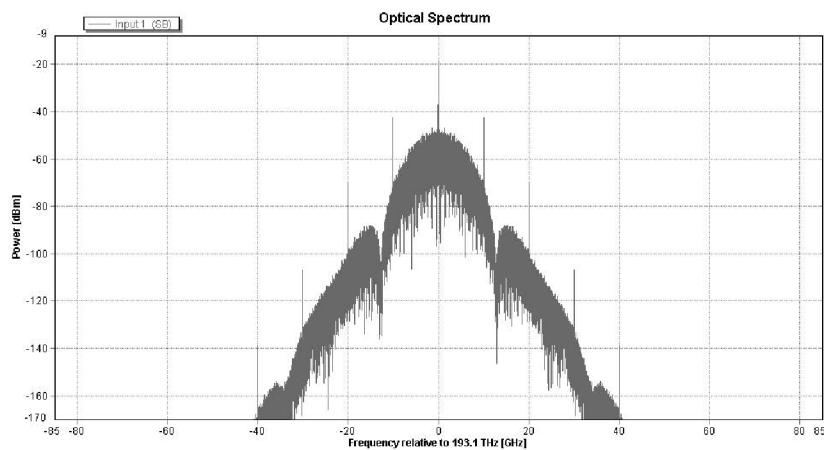
## 6.2 RZ

RZ (Return to zero) je modulácia, kde návratová hodnota signálu sa vráti k nule. V porovnaní s NRZ je u RZ modulácie dĺžka trvania impulzu polovičná. Binárna jednotka je reprezentovaná ako kladný impulz pre polovicu periódy. Druhá časť periódy je nulová, impulz sa vracia k nule. Spektrálna šírka RZ modulácie je väčšia ako pri použití modulácie NRZ. To, znamená, že odolnosť proti disperzii klesá, zároveň klesá aj spektrálna účinnosť WDM systémov, ktoré používajú RZ moduláciu. RZ modulácia sa používa na diaľkové optické prenosy s vysokými rýchlosťami [4] [26].

RZ modulátor sa skladá z fotodiódy, PRBS generátora, NRZ kodéra, filtra, MZM a útlmového článku. Laserová fotodióda k vyžarovaniu svetelnej vlny používa DFB laser. DFB laser produkuje spojitý optický signál. Na obrázku 6.5 je zobrazené optické spektrum fotodiódy. Ďalším potrebným článkom NRZ modulátora je PRBS generátor (pseudorandom binary sequence), ktorý generuje pseudonáhodnú bitovú (sekvenciu) postupnosť. Ku generovaniu pseudonáhodnej bitovej sekvencie sa používa určitý deterministický algoritmus. Pseudonáhodná sekvencia je následne za-



Obr. 6.4: Diagram oka RZ modulácie



Obr. 6.5: Optické spektrum RZ modulácie

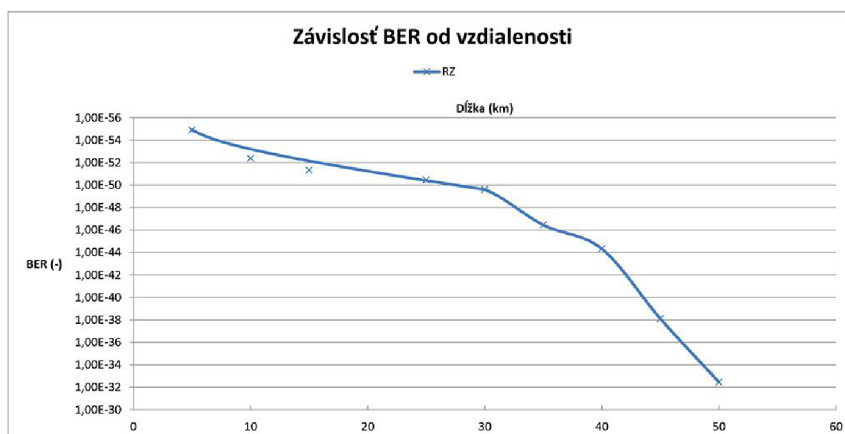
kódovaná vzorkovaným signálom, ktorý generuje RZ kódér. Zakódovaná sekvencia bitov sa filteruje pomocou Gaussovho filtra. Filter uhladzuje obdĺžnikový signál a odstraňuje jemné nedostatky signálu. V RZ modulátore sa nachádza Mach-Zehnder modulátor (MZM), ktorý slúži na riadenie amplitúdy optickej vlny. Ako posledná časť RZ modulátora sa nachádza útlmový článok, ktorý utlmuje vysielaný signál [26].

RZ demodulátor obsahuje na vstupnej časti PIN fotodiódu, ktorá spracuje optický signál. Po prijatí signálu sa pomocou predzosilňovača signál zosilní na požadovanú úroveň. PIN dióda pridáva do prijatého signálu šum, tzv. Thermal Noise s hodnotou  $10e-12 \text{ A/Hz}^{1/2}$ . V demodulátore sa nachádza elektrický filter, ktorý filteruje na základe prenosovej funkcie. V modeli je použitý Gaussov filter. Filter samozrejme podporuje aj iné funkcie ako sú napríklad Butterworthov, Besselov alebo Chebyshevov filter. Upravený a demodulovaný signál je možné analyzovať. Z analýzy je

možné získať diagram oka RZ modulácie, ktorý je zobrazený na obrázku 6.4. Pomocou analyzátora sú v tabuľke 6.2 namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti [26].

Tab. 6.2: Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie RZ

Vzdialenosť (km)	BER(-)
5	1,2475e-55
10	4,1145e-53
15	4,6748e-52
20	7,7852e-51
25	3,4732e-51
30	2,4662e-50
35	3,5541e-47
40	4,7410e-45
45	7,8403e-39
50	3,4904e-33



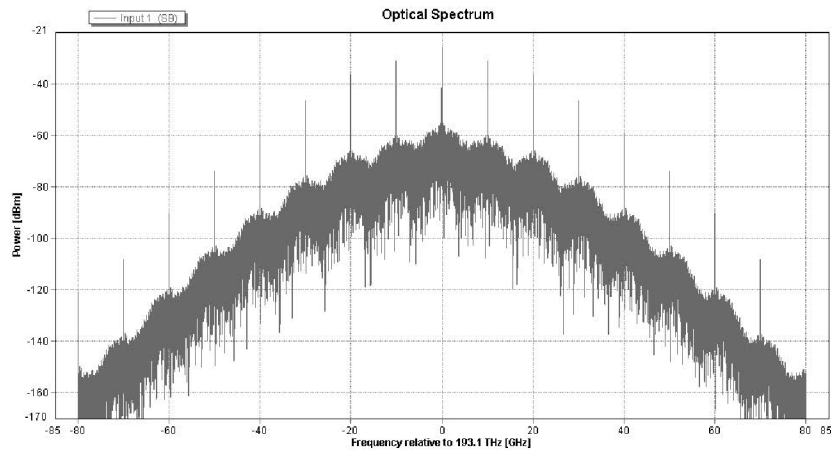
Obr. 6.6: Graf závislosti BER od vzdialenosti modulácie RZ



## 6.3 CRZ

CRZ (Chirped) modulácia vychádza z RZ modulácie. Pri CRZ modulácií sa využíva frekvenčné rozmietanie optickej nosnej frekvencie. Dôsledkom rozmietania optickej nosnej frekvencie je širšie optické spektrum. Širšie optické spektrum pri dlhších vzdialenostiach znižuje účinnosť modulácie a tým zvyšuje bitovú chybovosť BER.

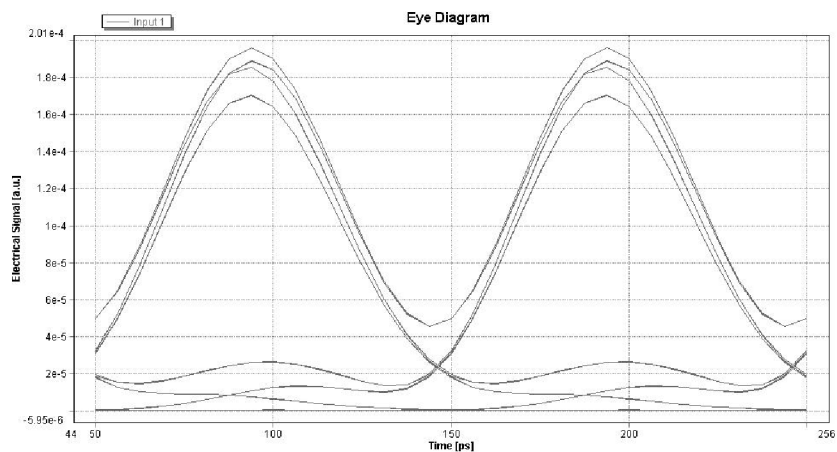
V porovnaní s moduláciami RZ a NRZ je CRZ modulácia odolnejšia voči neli-



Obr. 6.7: Optické spektrum CRZ modulácie

neárnym javom. CRZ modulátor obsahuje viac frekvenčných modulátorov ako RZ modulácia. Samotný CRZ vysielač pozostáva z lasera a troch Mach-Zehnder modulátorov (MZM). Prvý MZM generuje NRZ impulzy, druhý modulátor konvertuje NRZ impulzy do RZ modulácie a tretí modulátor pridá do RZ modulácie rozmietanie frekvencie. Demodulátor CRZ je identický ako u RZ modulácie [17] [26]. V tabuľke 6.3 sa nachádzajú namerané hodnoty bitovej chybovosti BER v závislosti od vzdialenosti medzi vysielačom a prijímačom. Z tabuľky vyplýva, že pri vzdialenosti nad 35 kilometrov je hodnota bitovej chybovosti príliš vysoká. Hraničná hodnota bitovej chybovosti BER je približne  $1 \cdot 10^{-9}$ . To znamená, že modulácia nie je vhodná na dlhé trasy bez použitia zosilňovačov či filtrov. Závislosť bitovej chybovosti od vzdialenosti je zobrazená v grafe 6.9 [26].

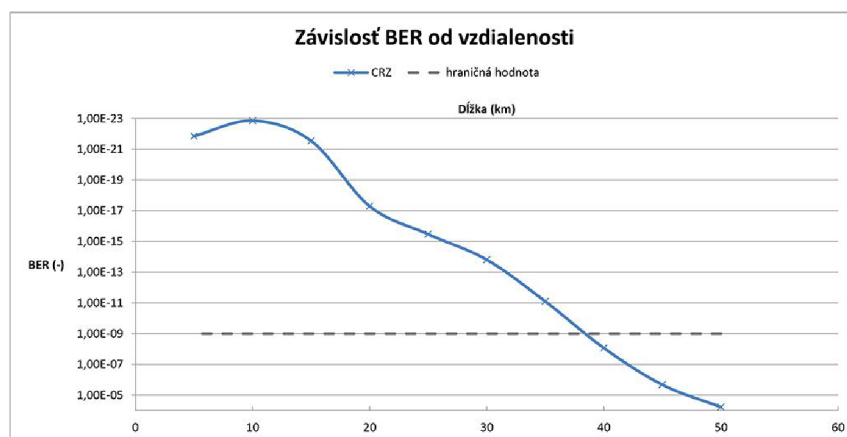
K tomu, aby modulácia svojou šírkou pásma neovplyvňovala iné kanály existuje niekoľko riešení. Jedným z potenciálnych riešení je nastavenie pre káňal s CRZ moduláciou väčšiu šírku pásma. Výsledkom toho by bol väčší odstup káňala od susedného káňala.



Obr. 6.8: Diagram oka CRZ modulácie

Tab. 6.3: Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie CRZ

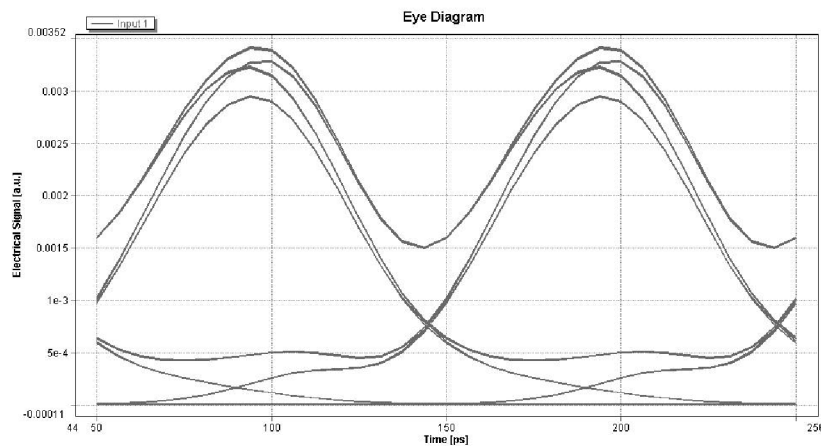
Vzdialenosť (km)	BER(-)
5	1,4101e-22
10	1,3895e-23
15	2,8795e-22
20	5,1419e-18
25	3,3994e-16
30	1,5509e-14
35	8,0070e-12
40	8,6184e-9
45	2,1190e-6
50	5,9666e-5



Obr. 6.9: Graf závislosti BER od vzdialenosti CRZ modulácie

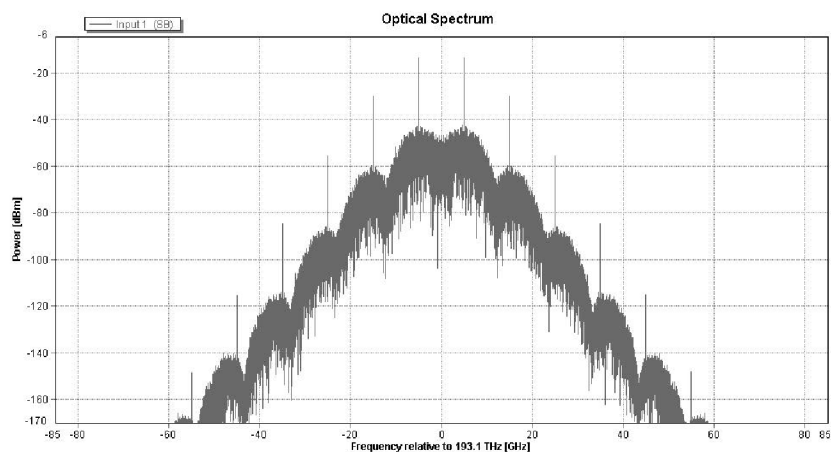
## 6.4 CSRZ

CSRZ (Carrier-Suppressed Return-to-Zero) modulácia je s potlačenou optickou nosnou s návratom k nule. Vysielač CSRZ modulácie je zložený z laserového zdroja a dvoch externých MZ modulátorov. Prvý modulátor generuje CSRZ impulzy 66% DC. Frekvencia druhého MZ modulátora je riadená analógovým sínusovým generátorom s polovičnou prenosovou rýchlosťou. Druhý modulátor konvertuje NRZ do CS-RZ modulačného signálu. Vzhľadom na skutočnosť, že približne polovica bitov fázy je kladná a druhá polovica bitov záporná, tak sa odčítajú. Na výstupnom spektre signálu sa nenachádza veľká výkonová zložka nosnej vlnovej dĺžky, ktorá sama o sebe nenesie žiadne informácie. Na prijímacej strane CSRZ demodulátora sa nachádza prijímacia fotodióda a predzosilňovač. Fotodióda konvertuje optický signál na elektrický, ktorý je následne zosilnený. Druhá časť z prijímača sa skladá zo zosilňovača a filtra. Vo filtri na prijímacej strane je nastavená Besselova prenosová funkcia. Filtráciou sa získa čistejší signál, ktorý sa dá následne analyzovať [17] [26].

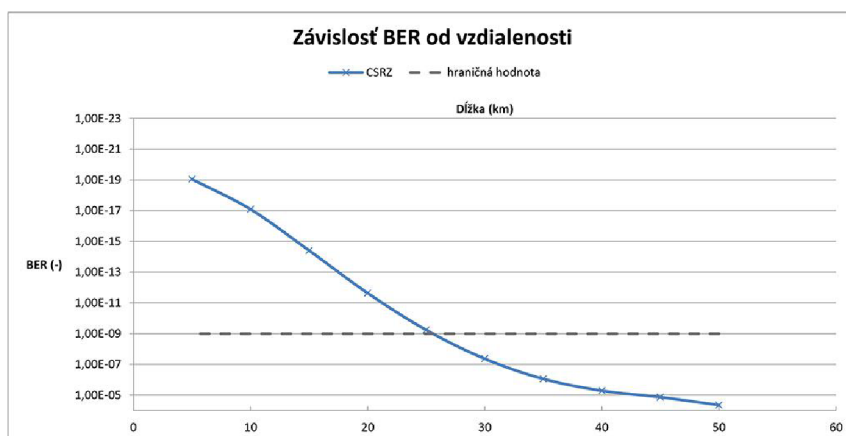


Obr. 6.10: Diagram oka CSRZ modulácie

Z nameraných hodnôt z tabuľky 6.4 vyplýva, že bitová chybovosť na väčšej trase je neuspokojivá. Vysoké hodnoty bitovej chybovosti BER môžu byť dôsledkom širokého optického spektra vysielača, ktoré je znázornené na grafe 6.11, pretože sa môže rušiť so susednými signálmi [26].



Obr. 6.11: Optické spektrum CSRZ modulácie



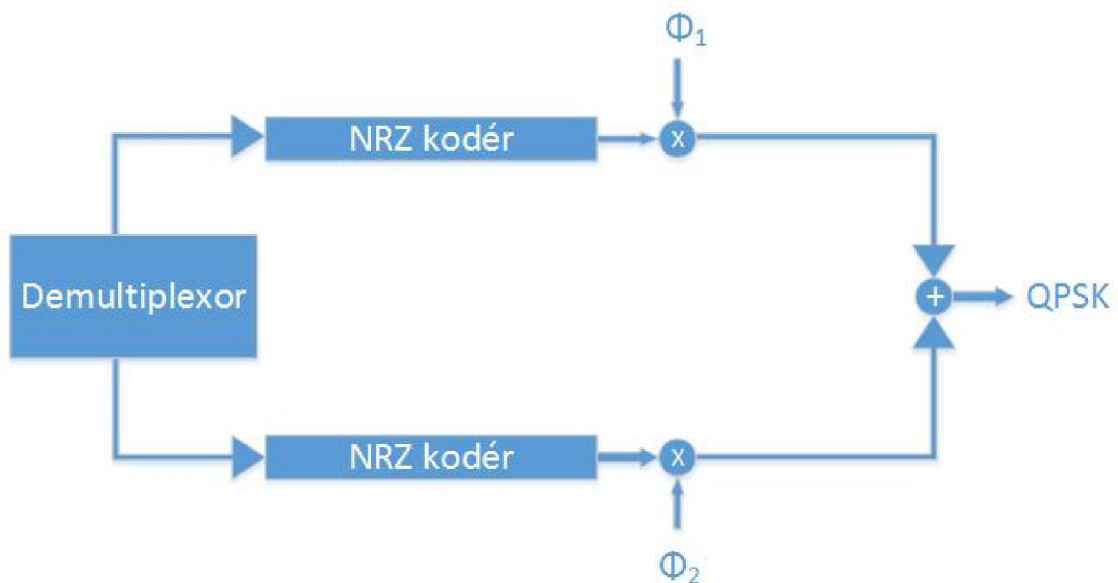
Obr. 6.12: Graf závislosti BER od vzdialenosti CSRZ modulácie

Tab. 6.4: Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie CSRZ

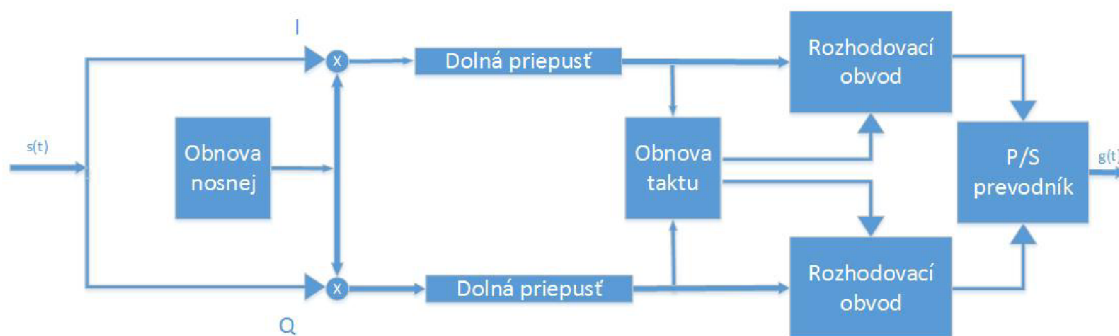
Vzdialenosť (km)	BER(-)
5	9,0709e-20
10	8,1918e-18
15	3,9482e-15
20	2,3356e-12
25	5,8375e-10
30	4,3118e-8
35	8,8366e-7
40	5,1864e-6
45	1,3622e-5
50	4,4859e-5

## 6.5 PSK

PSK (Phase Shift Keying) je fázové klúčovanie, funguje na princípe zmeny fáze v modulovanom signále o určitú danú hodnotu. Digitálna PSK modulácia používa k reprezentácii dát konečný počet signálov. Signály sa od seba odlišujú rôznymi posuvmi fáze. Každá fáza kóduje rovnaký počet bitov. Demodulátor určuje fázu prijímaného signálu a priradzuje k nej bity. Existuje aj druhá varianta modulácie, kedy demodulátor neporovnáva aktuálny signál s referenčnou hodnotou, ale porovnáva s predchádzajúcim priebehom prijímaného signálu. Táto metóda sa nazýva diferenciálne klúčovanie fázovým posuvom. Klúčovacie techniky sa zobrazujú aj na tzv. konstelačných diagramoch. Konstelačný diagram znázorňuje jednotlivé fáze ako body v komplexnej rovine. Počet konstelačných bodov v diagrame môže byť ľubovoľný, ale pri použití fázového klúčovania sa počet konstelačných bodov určuje podľa druhej mocniny. Obvyklým príkladom PSK môže byť binárne klúčovanie fázovým posunom BPSK (Binary Phase Shift Keying) alebo kvadrátne klúčovanie fázovým posunom QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) [23], [26].



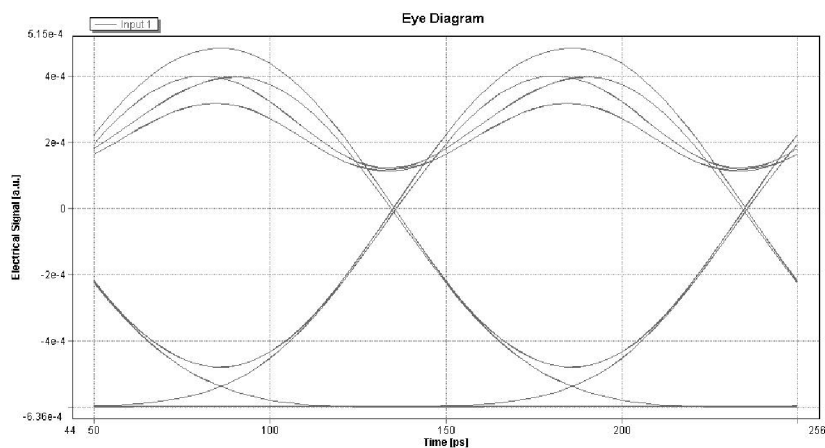
Obr. 6.13: Bloková schéma QPSK modulátora



Obr. 6.14: Bloková schéma QPSK demodulátora

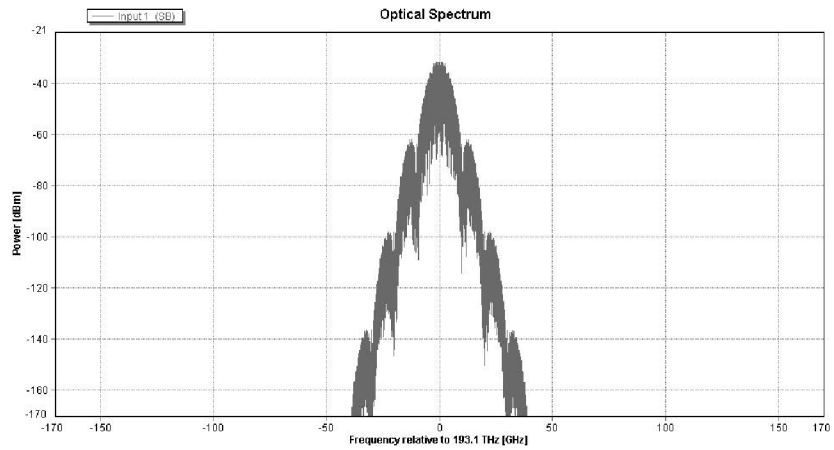
## 6.6 DPSK

DPSK (Differential phase-shift keying), diferenčné fázové klúčovanie je modulácia, ktorá zaznamenáva zmeny v binárnom toku. Na základe týchto zmien sa zmenené vlastnosti prenášaného signálu. Demodulátor zaznamenáva zmeny vo fáze prichádzajúceho signálu. DPSK sa od PSK odlišuje podľa nasledovných pravidiel. V prípade logickej jednotky, zostáva fáza nezmenená. Pri logickej nule sa mení fáza o  $\pi$ . U diferenčnej fázovej modulácie charakteristické hodnoty fázy nevyjadrujú veľkosť fázy nosnej, ale veľkosť zmeny fázy v porovnaní s predchádzajúcim intervalom [26].



Obr. 6.15: Diagram oka DPSK modulácie

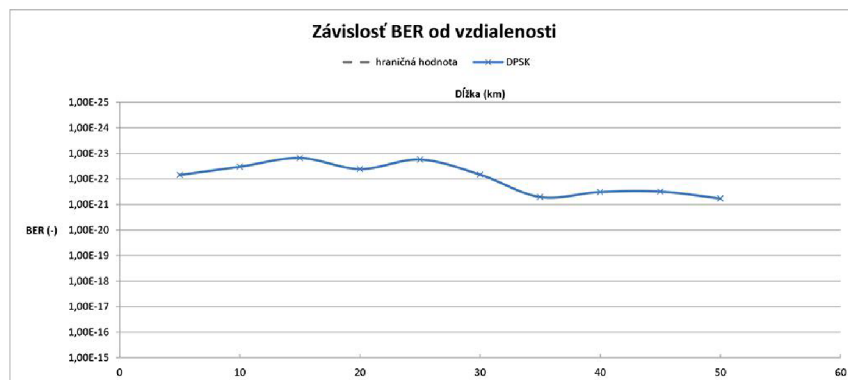
Z nameraných hodnôt bitovej chybovosti BER z tabuľky 6.5 vyplýva, že na vzdialenosti 50 kilometrov sa hodnota bitovej chybovosti mení len minimálne. Z toho vyplýva, že DPSK modulácia je ideálna voľba pri tvorbe DWDM optickej siete. Z optického spektra 6.16 je možné zistiť, že šírka spektra je ideálna. Po modulácii a následnej demodulácii signálu bol analýzou získaný nasledujúci diagram oka 6.15 [26].



Obr. 6.16: Optické spektrum DPSK modulácie

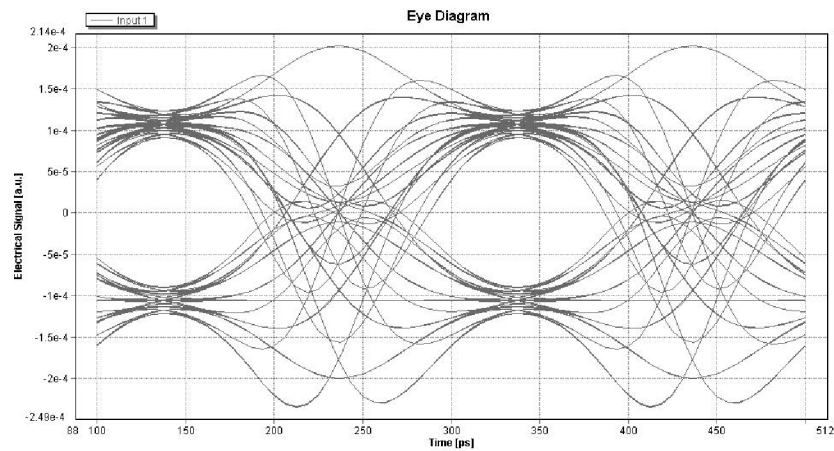
Tab. 6.5: Namerané hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti modulácie DPSK

Vzdialenosť (km)	BER(-)
5	6,9841E-23
10	3,3365E-23
15	1,5214E-23
20	4,1114E-23
25	1,7481E-23
30	6,7821E-23
35	5,1174E-22
40	3,2451E-22
45	3,1347E-22
50	5,8414E-22

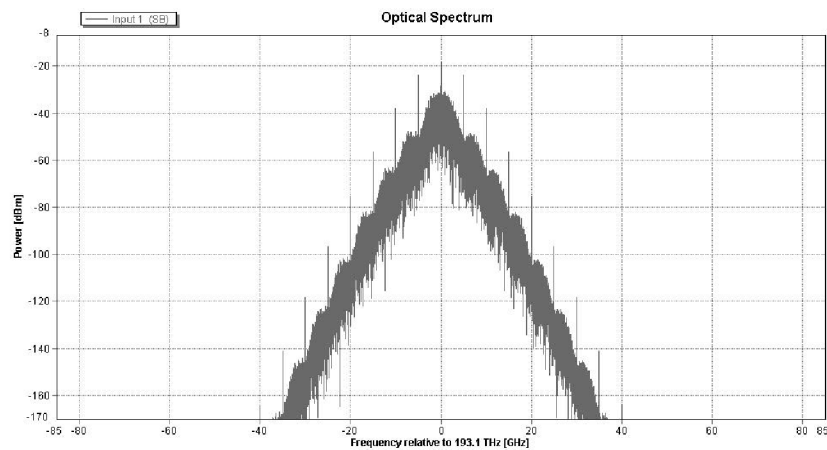


Obr. 6.17: Graf závislosti BER od vzdialenosti DPSK modulácie

## 6.7 DQPSK



Obr. 6.18: Diagram oka DQPSK modulácie



Obr. 6.19: Optické spektrum DQPSK modulácie

Kvadratúrne fázové klúčovanie (QPSK) všeobecne je viacstavový systém, ktorý používa štyri signálové prvky, vyjadrené nosnou vlnou s odlišnou počiatočnou fázou. Každý signálový prvok je reprezentovaný signálovou bitovou dvojicou. Modulácia QPSK je vytvorená z dvojstavového klúčovania binárneho fázového klúčovania. Je vytvorená pomocou dvoch nosných vln, ktoré majú rovnakú frekvenciu. V tomto prípade je frekvencia fázovo posunutá o  $\pi/2$ .

DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) je diferenčné kvadratúrne fázové klúčovanie, ktoré používa štyri signálové prvky, ktoré sú vyjadrené nosnou vlnou s odlišnou počiatočnou fázou. Každý signálový prvok obsahuje jednu bitovú dvojicu. Bitové kombinácie sú 00, 01, 10 a 11. Kodér sa skladá z deliča výkonu,

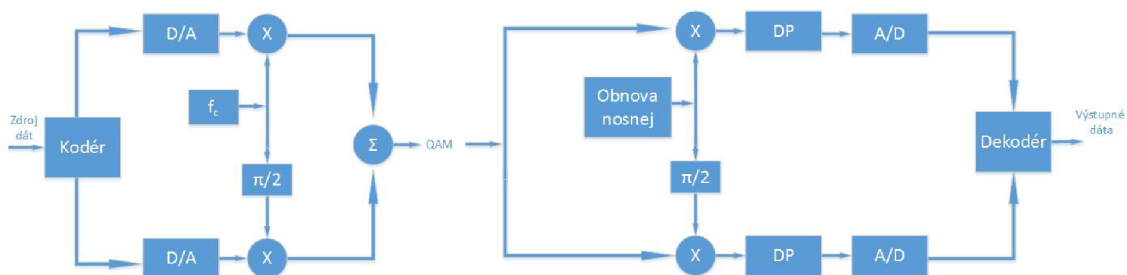


z dvoch rovnobežných Mach-Zehnder modulátorov, z článku optického posunu a zlučovača optického výkonu. Signály sú rozdelené do dvoch vetví I a Q. Signály z vetvy I a vetvy Q sú posunuté o fázu  $\pi/2$ . Namerané bitové chybovosti vo vetve I aj vo vetve Q sú takmer totožné. Odchýlky medzi vetvami sú len veľmi malé. Z dôvodu správneho dekódovania je potrebné správne namapovanie dát zo vstupu na výstup. Dá sa povedať, že DQPSK modulácia je vylepšená DPSK modulácia. Vzhľadom k tomu, že v každom symbole sú kódované 2 bity, tak dátový tok sa v porovnaní s DPSK zníži o polovicu. Modulátor DQPSK má nastavenú hodnotu výkonu na 1 mW. Táto hodnota výkonu je pre prenos a demodulovanie signálu dostačujúca.

Na obrázku 6.18 je znázornený diagram oka získaný z analýzy modelu DQPSK simulácie. Z analýzy vysielača je získané optické spektrum vysielača 6.19 [26].

## 6.8 QAM

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) je kvadratúrna amplitúdová modulácia, ktorá používa prepracovanú modulačnú techniku. Prichádzajúce dáta sa rozdelia do dvoch tokov s polovičnou prenosovou rýchlosťou, následne sú modulované na dvojici nosných vzájomne fázovo posunutých o  $90^\circ$ .



Obr. 6.20: Bloková schéma QAM modulátora a demodulátora

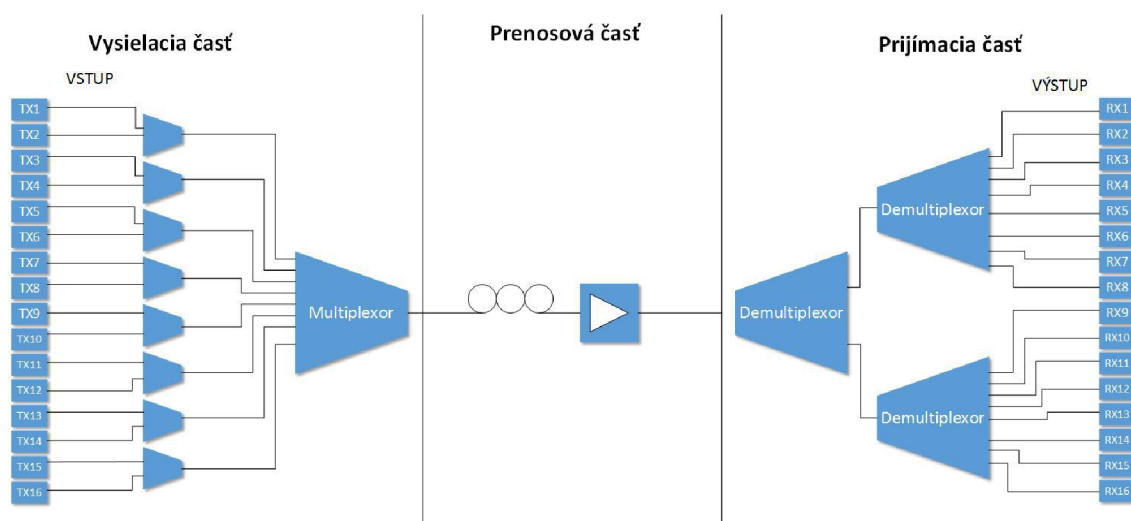
Bloková schéma QAM modulátora aj demodulátora je na obrázku 6.20. Demodulácia signálu sa vykonáva opačnou technikou ako modulácia signálu. Signál sa rozdelí do násobičiek, kde sa násobí s nosnou, ktorá je vo fázi alebo je posunutá o  $90^\circ$ . Demodulátor obsahuje dolnú priepusť k identifikácii symbolov a tiež aj blok pre obnovu nosnej, viď obrázok 6.20. Obnovená nosná musí mať rovnakú hodnotu aj fázový posun ako aj pri modulácii. Často sa kvadratúrna modulácia označuje ako mQAM, kde písmeno m udáva počet signálových prvkov. Číslo m musí byť násobkom čísla 4. Preto sa v praxi často vyskytujú použité modulácie 16QAM, 64QAM, 256QAM. Viacstavové modulácie mQAM sú významným typom modulácií v komunikačných systémoch. Výhoda spočíva v zvýšení prenosovej rýchlosti pri zachovaní

šírky pásma pre prenosové kanály s obmedzenou šírkou pásma. Kvadrátúrna amplitúdová modulácia využíva signálový priestor najlepšie pomocou rôznych konštelácií. Pri rovnakom počte stavov má väčšiu minimálnu vzdialenosť signálových bodov. Tým pádom sa znižuje chybovosť [6].

V praktickej časti pri tvorbe modelu QAM modulácie nastali problémy s demoduláciou signálu. Použitý QAM modulátor dokázal modulovať signál správne, ale následná demodulácia signálu viacstavovej modulácie je neúspešná. Demodulátor QAM nedokázal správne demodulovať prijatý signál. Chyba nastala asi pri nesprávnom nastavení niektorých parametrov demodulátora. Následne pri demodulácii signálu je ako náhrada za nefunkčný QAM demodulátor použitý DQPSK demodulátor, ktorý dokáže demodulovať len 4QAM moduláciu, ktorá je v podstate totožná ako DQPSK modulácia. Z tohto dôvodu nie je QAM modulácia použitá vo výslednom modeli DWDM optickej sieti [26].

## 7 NÁVRH SIETE DWDM

Praktickým výstupom práce je vlastný návrh DWDM optickej siete, definovaný doporučením ITU- T, obsahujúci 16 komunikačných kanálov na prenosovej vzdialenosti 50 kilometrov. Jednotlivé kanály majú nastavenú šírku pásma 50 GHz a prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s. Pri zostavovaní návrhu DWDM siete, je možné rozdeliť návrh do 3 základných častí. Celý návrh sa dá rozdeliť na vysielačiu časť, prenosovú časť a prijímaciu časť vid' obrázok 7.1.



Obr. 7.1: Blokova schéma navrhutej siete

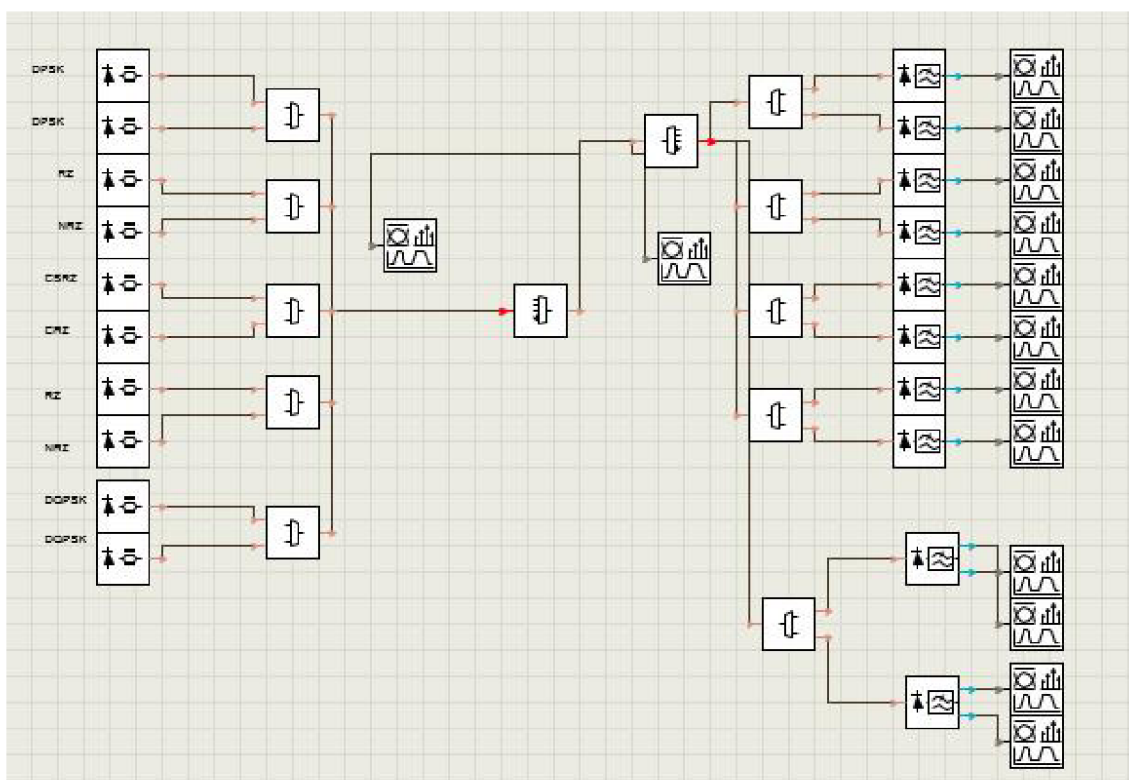
### 7.1 Postup

Pri návrhu DWDM siete sa postupovalo systematicky a postupne. Celá DWDM optická sieť sa skladá z viacerých samostatne fungujúcich modelov. Každý samostatný model obsahuje funkčnú moduláciu. Následne funkčný modulátor a demodulátor sa použili pri skladaní modelu DWDM optickej siete. Samotné prvky použité v DWDM modeli sú vybrané z knižnice softvéru VPI Photonics alebo zo vzorových obvodov. Ako prvá bola vytvorená modulácia RZ, pretože patrí k tým jednoduchším moduláciám. RZ modulácia funguje bez problémov. Modulátor RZ bol vybraný z knižnice programu VPI Photonics. Ako demodulátor je použitý OOK (On-off keying) demodulátor. OOK demodulátor patrí k tým jednoduchším demodulátorm. Výhodou OOK je použitie pri viacerých typoch modulácií. A to je využité aj pri vytváraní modelu NRZ modulácie. NRZ modulátor je taktiež použitý z knižnice softvéru VPI Photonics. A na mieste demodulátora je použitý OOK demodulátor. Po overení funkčnosti RZ a NRZ modulácie bol vytvorený jednoduchý WDM model

s 8 kanálmi, aby sa zistilo či sa kanály vzájomne neovplyvňujú. Výsledky analýzy optického spektra boli uspokojivé. Následne boli vytvorené modely pre modulácie CRZ a CSRZ. Pri vytváraní sa postupovalo analogicky ako v predchádzajúcom prípade. Pri tvorbe jednotlivých modulácií bolo potrebné nastaviť niektoré parametre, aby model správne fungoval. Jednoduchý model s 8 kanálmi a 4 moduláciami bez pripojenej optickej trasy fungoval. Namerané hodnoty bitovej chybovosti BER sa pohybovali v rozmedzí približne  $1.10^{-19}$  až  $1.10^{-54}$ . Po vložení optickej trasy do modelu sa hodnoty bitovej chybovosti BER menili len minimálne. Pri analýze optického spektra sa zistilo, že optické spektrá CRZ a CSRZ modulácie môžu byť príliš široké a môžu negatívne ovplyvňovať susedné kanály. Tento poznatok sa bral v úvahu pri neskoršom skladaní všetkých modulácií do DWDM optického modelu. Pri sledovaní správania modelu boli zapojené analyzátory optického spektra aj na vysielačnej strane modulátora aj na prijímacej strane demodulátora. Týmto sa sledoval výskyt šumu v optickom spektre. Z analýzy optického spektra vyplýva, že hodnoty šumu sú dostatočne nízke. Po overení funkčnosti dvojstavových modulácií boli vytvárané modely s použitím viacstavových modulácií. Poskladaním modelu s použitím DPSK modulácie bola začatá analýza viacstavových modulácií. Pri prvej analýze modulácia najprv nefungovala, no po upresnení a zmenení parametrov modulátora a demodulátora následne modulácia bola plne funkčná. Funkčná modulácia bola analyzovaná. Hodnoty bitovej chybovosti BER sa pohybujú okolo hodnoty  $1.10^{-22}$  až  $1.10^{-23}$ . Ďalšou testovanou moduláciou je diferenciálne kvadratúrne fázové kľúčovanie DQPSK. U tejto modulácie je signál rozdelený do dvoch častí – I a Q. V modeli je použitý modulátor, ktorého výstupom je spoločný kanál pre obidve vetvy. Až samotný demodulátor je rozdelený do dvoch vetiev, kde je každá vetva analyzovaná samostatne. V praktickej časti práce boli zhotovené a otestované aj iné typy modulácií. Z hľadiska demodulácie signálu a analýzy bitovej chybovosti BER boli pre neuspokojivé výsledky alebo nefunkčnosť nezaraďované do výsledného modelu DWDM. Keď fungovali všetky predchádzajúce modulácie, začal sa vytvárať model DWDM siete.

Najprv bola vytvorená optická sieť s 8 kanálmi, 6 modulačnými technikami a 100 GHz šírkou pásma. Schéma zapojenia simulovaného modelu DWDM optickej siete sa nachádza na obrázku 7.2. Zoradenie jednotlivých kanálov nie je náhodné. Pri zoradovaní jednotlivých typov modulácií je potrebné sledovať rôzne šírky optického spektra. Preto sa kanál s moduláciou CSRZ, ktorá má dosť široké optické spektrum, nachádza za kanálom s NRZ moduláciou s užším optickým spektrom. Taktiež kanál s RZ moduláciou s užším optickým spektrom susedí s kanálom so širším optickým spektrom, s moduláciou CRZ. V prípade, ak by boli dve modulácie CRZ alebo CSRZ použité vedľa seba na susedných kanáloch, je pravdepodobné, že by sa kanály ovplyvňovali a tým by sa prijatý signál nedal demodulovať. Pri vytváraní modelu existuje množstvo kombinácií ako správne rozdeliť modulácie na jednotlivé kanály.

Každá kombinácia môže mať rozdielne výsledky hodnôt bitovej chybovosti BER. Modulátory majú nastavené frekvencie podľa doporučenia ITU- T podľa G.694.1. Ako prvý kanál je nastavený kanál s moduláciou DPSK, ktorý má nastavenú najvyššiu hodnotu frekvencie. Všetky nasledovné kanály majú nastavenú menšiu frekvenciu. Z dôvodu menšieho rušenia kanálov sú nastavené vždy dve susedné frekvencie a jedna je vynechaná. Preskočením nastavenej frekvencie sa preskočí jedno frekvenčné pásmo. Tým pádom sa získa väčší priestor pre použité modulácie. Presné hodnoty nastavených frekvencií pre každý kanál sú zobrazené v tabuľke 7.1. Optická trasa má nastavenú hodnotu útlmu  $0,2 \cdot 10^{-3}$  dB/m a hodnotu disperzie  $16 \cdot 10^{-6}$  s/m<sup>2</sup>. Pri meraní hodnôt bitovej chybovosti BER sa menil parameter dĺžky optickej trasy z 0 na 50 km a to po 5 km skokoch. Výsledky z nameraných hodnôt závislosti bitovej chybovosti od zmeny dĺžky optickej trasy sú zaznamenané v tabuľke 7.2.

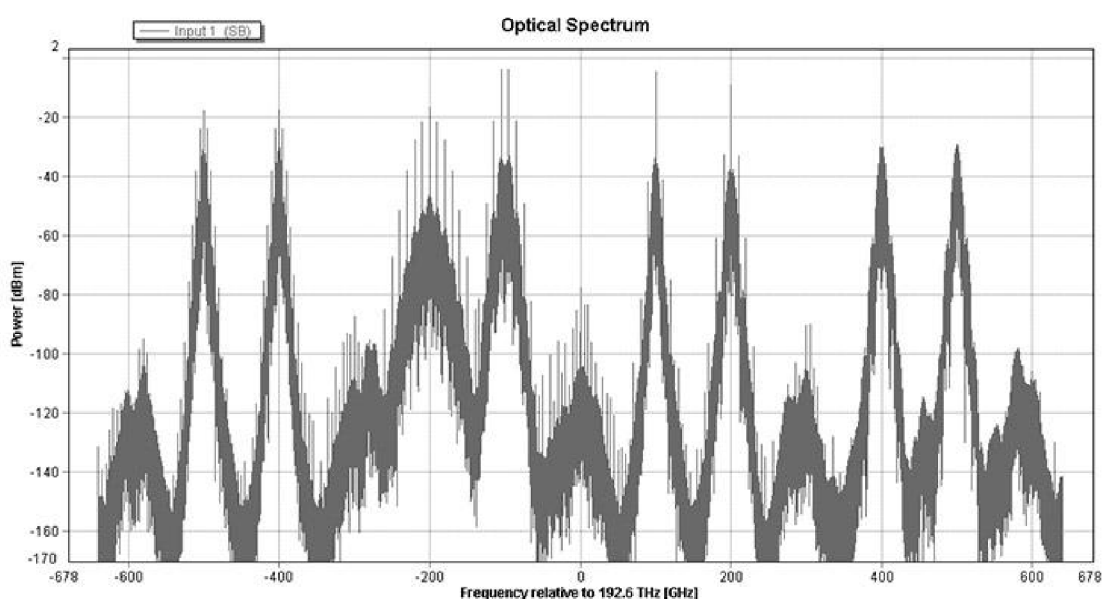


Obr. 7.2: Model DWDM siete pre 8 kanálov

Tento model obsahuje ideálne parametre multiplexorov a demultiplexorov. Na demultiplexore je nastavená hodnota Insertion Loss na 0,0 dB. Demultiplexor filtruje signál na základe filtra s použitím Gaussovej prenosovej funkcie. V modeli je použité špeciálne kaskádové zapojenie multiplexorov. Toto zapojenie je zvolené z dôvodu lepšej prehľadnosti v nastaveniach rôznych parametrov a z dôvodu lepšieho fungovania modelu. Na modeli bola overená funkčnosť jednotlivých simulácií a zmeny hodnôt

BER v závislosti od dĺžky prenosovej cesty. Z dôvodu lepšieho fungovania demodulátorov na prijímacej strane, je na každom kanále pred modulátorom zapojený filter s Gaussovou prenosovou funkciou. Filter slúži na odfiltrovanie nežiaduceho spektra signálu. Každý filter má nastavenú presnú frekvenciu vysielača podľa tabuľky 7.1. Filter odstraňuje všetky postranné signály s nastavenou šírkou pásma 100 GHz, presne na každej nastavenej frekvencii. Presný priebeh signálu napomáha ku kvalitnejšej demodulácii signálu a tým aj k zníženiu bitovej chybovosti. Pred samotným analyzátorom je na kanále zapojený obvod clock recovery. Obvod slúži na obnovu dátového a synchronizačného signálu. Bez použitia clock recovery, demodulátor nedokázal korektné demodulovať prijatý signál, pretože z prijatého signálu nedokázal presne určiť, ktorý modulátor signál poslal. Obvod clock recovery sleduje časovú zmenu medzi prichádzajúcim signálom a originálnym signálom, ktorý je automaticky regenerovaný z logického kanálu.

Vytvorený model bol simulovaný a analyzovaný na rôzne vzdialenosti optickej trasy v rozmedzí od 0 do 50 km. Simulovaný model má nastavenú hodnotu rýchlosti Bit Rate na 10 Gbit/s. Analyzované výsledky sú spracované v tabuľke 7.2 a sú zobrazené v grafe 7.4. Výsledné optické spetktrum vysielačné z vlnového multiplexu je zobrazené na obrázku 7.3.



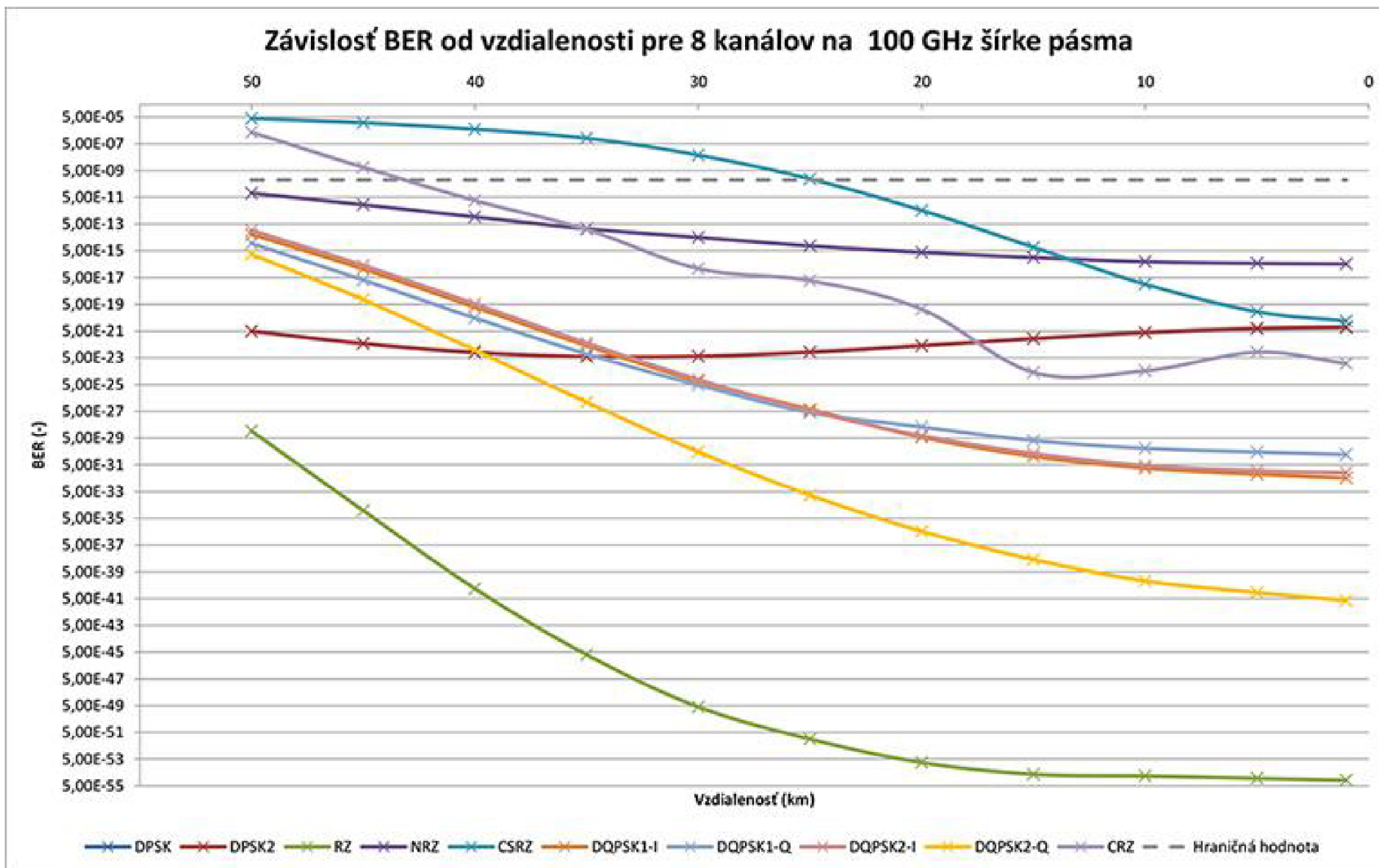
Obr. 7.3: Optické spetktrum pre 8 kanálov

Zo závislosti chybovej bitovosti BER od vzdialenosti 7.4 vyplýva, že najnižšiu bitovú chybovosť má RZ modulácia. Veľmi dobré výsledky preukazuje aj DQPSK modulácia. Naopak nevyhovujúce hodnoty bitovej chybovosti preukazuje CSRZ modulácia, pretože pri vzdialenosti 25 km má modulácia príliš vysokú hodnotu bitovej

Tab. 7.1: Rozdelenie kanálov v navrhnutej DWDM sieti pre šírku pásma 100GHz

Kanál	Modulácia	Frekvencia (THz)
TX 1	DPSK	193,10
TX 2	DPSK	193,00
TX 3	RZ	192,80
TX 4	NRZ	192,70
TX 5	CSRZ	192,50
TX 6	CRZ	192,40
TX 7	DQPSK	192,20
TX 8	DQPSK2	192,10

chybovosti BER. Pri vzdialenosti 50 km je teda modulácia nepoužiteľná, pretože prijatý signál obsahuje príliš veľa chybných bitov. Medzi nevyhovujúce modulácie patrí aj CRZ modulácia. Vo vzdialenosti približne 45 km hodnoty bitovej chybovosti prekračujú limitnú hodnotu. Vysoká hodnota bitovej chybovosti môže byť spojená aj s rušením susedného kanála. Vzhľadom k faktu, že susedné modulácie CRZ a CSRZ majú široké optické spektrum, môže dochádzať k vzájomnej interferencii optických spektier. Všetky ostatné modulácie majú uspokojivé hodnoty bitovej chybovosti BER. Všetky namerané hodnoty bitových chybovostí pre kanálov s použitím šírky pásma 100GHz sú zhrnuté v tabuľke 7.2. Z výsledkov vyplýva, že model je funkčný a modulácie pracujú správne.



Obr. 7.4: Závislost BER od vzdialenosti pre šírku pásma 100GHz



Tab. 7.2: Hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti pre šírku pásma 100GHz

Modulácia	50 km	45 km	40 km	35 km	30 km
DPSK	4,7795e-21	5,6366e-22	1,2541e-22	6,1795e-23	6,4929e-23
DPSK2	5,0037e-21	5,8306e-22	1,2650e-22	6,1414e-23	6,5106e-23
RZ	1,6614e-28	1,8927e-34	2,7495e-40	3,1608e-45	3,9620e-49
NRZ	1,0123e-10	1,3887e-11	1,7020e-12	2,2336e-13	5,0402e-14
CSRZ	3,8218e-5	1,8418e-5	6,1651e-6	1,2993e-6	7,1628e-8
CRZ	3,6321e-6	8,7699e-9	2,8696e-11	1,9587e-13	2,3241e-16
DQPSK1-I	8,7246e-14	2,1659e-16	3,0714e-19	4,0244e-22	8,4464e-25
DQPSK1-Q	1,7618e-14	3,2722e-17	4,6808e-20	9,6107e-23	4,5828e-25
DQPSK2-I	1,7000e-13	4,0554e-16	5,3088e-19	6,2782e-22	1,1724e-24
DQPSK2-Q	2,7287e-15	1,1182e-18	1,8279e-22	2,3714e-26	4,6588e-30
Modulácia	25 km	20 km	15 km	10 km	5 km
DPSK	1,3188e-22	3,9941e-22	1,3072e-21	3,7245e-21	7,3624e-21
DPSK2	1,3445e-22	4,0662e-22	1,3816e-21	3,9956e-21	8,2751e-21
RZ	1,5522e-51	2,7521e-53	3,6973e-54	2,7574e-54	1,8294e-54
NRZ	1,1726e-14	3,8554e-15	1,5761e-15	7,6659e-16	5,7330e-16
CSRZ	1,1822e-9	5,2165e-12	9,2281e-15	1,5710e-17	1,4077e-19
CRZ	2,9151e-17	2,1162e-19	4,0326e-24	5,3263e-24	1,3118e-22
DQPSK1-I	6,9674e-27	5,9368e-29	2,1509e-30	2,8418e-31	9,9689e-32
DQPSK1-Q	4,0358e-27	3,3724e-28	3,2632e-29	8,5844e-30	4,5322e-30
DQPSK2-I	5,2681e-27	7,4307e-29	3,5068e-30	4,4070e-31	1,7822e-31
DQPSK2-Q	2,6767e-33	5,3441e-36	4,1443e-38	1,0320e-39	1,3964e-40

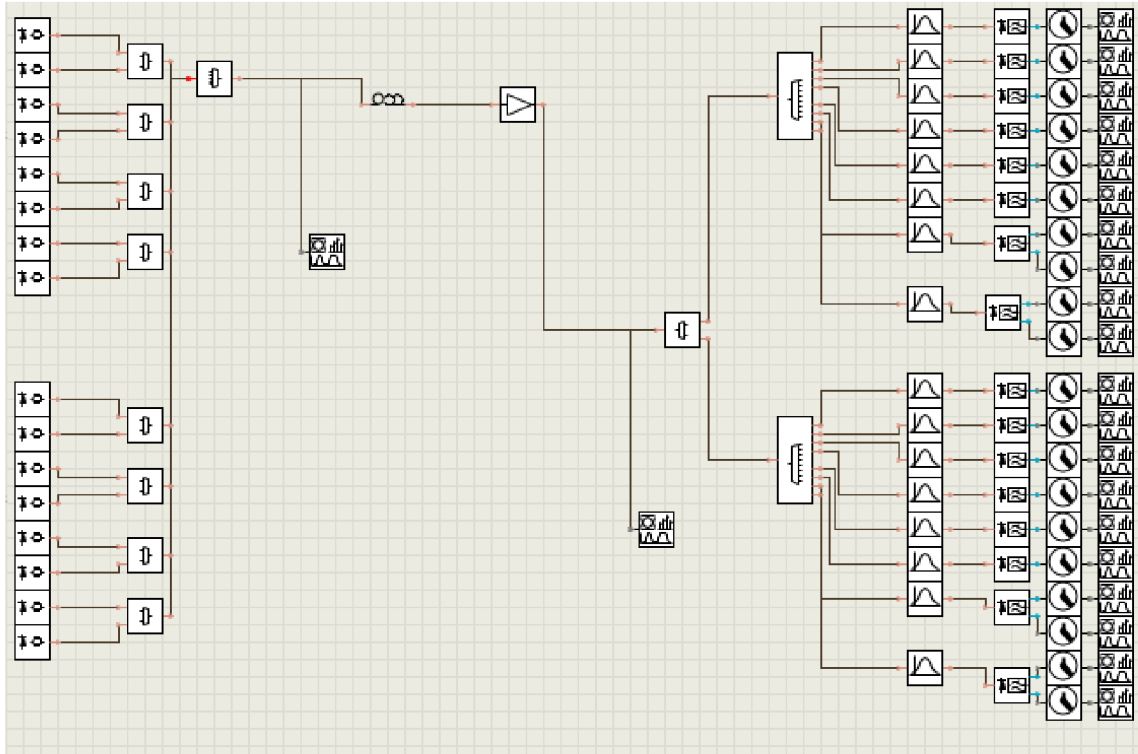
Po overení funkčnosti DWDM optického modelu s 8 kanálmi a šírkou pásma 100 GHz je model rozšírený a upravený. Do modelu je pridaných 8 kanálov, na celkový počet 16 kanálov. Šírka pásma je upravená na 50 GHz a prenosová rýchlosť je nezmenená, teda 10 Gbit/s. Pri zmenenej šírke pásma sú zmenené aj frekvencie jednotlivých kanálov, hodnoty frekvencií sú v tabuľke 7.3. Hodnoty frekvencií sú priradené podľa doporučenia ITU-T G 694.1. Celá optická sieť je navrhnutá s ideálnymi vlastnosťami multiplexorov a demultiplexorov. Optická sieť je testovaná na vzdialenosť 50 kilometrov s odstupom 5 kilometrov. Z analýzy simulovaného modelu DWDM optickej siete je získaný výsledný graf optického spektra pre šírku pásma 50 GHz zobrazený na obrázku 7.6. Namerané hodnoty bitovej chybovosti BER sú zapísané v tabuľke 7.4 a zobrazené v grafe 7.9. Z nameraných hodnôt vyplýva, že najnižšie hodnoty bitovej chybovosti BER má RZ modulácia, preto je z pohľadu nízkej bitovej chybovosti najvhodnejšia. Nevyhovujúce hodnoty bitovej chybovosti

preukazuje CSRZ modulácia, pretože pri vzdialenosti 25 km má modulácia príliš vysokú hodnotu bitovej chybovosti BER, prekračuje limitné hodnoty bitovej chybovosti. Pri vzdialenosti 50 km je teda modulácia nepoužiteľná, pretože prijatý signál obsahuje príliš veľa chybných bitov. Medzi nevyhovujúce modulácie patrí aj CRZ modulácia. Vo vzdialenosti približne 45 km, hodnoty bitovej chybovosti prekračujú limitnú hodnotu. Vysoká hodnota bitovej chybovosti môže byť spojená aj s rušením susedného kanála. Vzhľadom k faktu, že susedné modulácie CRZ a CSRZ majú široké optické spektrum, môže dochádzať k vzájomnej interferencii optických signálov. Všetky ostatné modulácie majú uspokojivé hodnoty bitovej chybovosti BER, to znamená, že je možné ich použiť v DWDM optickej sieti.

Tab. 7.3: Rozdelenie kanálov v navrhnutjej DWDM sieti pre šírku pásma 50GHz

Kanál	Modulácia	Frekvencia (THz)
TX 1	DPSK	193,10
TX 2	DPSK	193,05
TX 3	RZ	193,00
TX 4	NRZ	192,95
TX 5	CSRZ	192,90
TX 6	CRZ	192,85
TX 7	DQPSK	192,80
TX 8	DQPSK	192,75
TX 9	DPSK	192,70
TX 10	DPSK	192,65
TX 11	RZ	192,60
TX 12	NRZ	192,55
TX 13	CSRZ	192,50
TX 14	CRZ	192,45
TX 15	DQPSK	192,40
TX 16	DQPSK	192,35

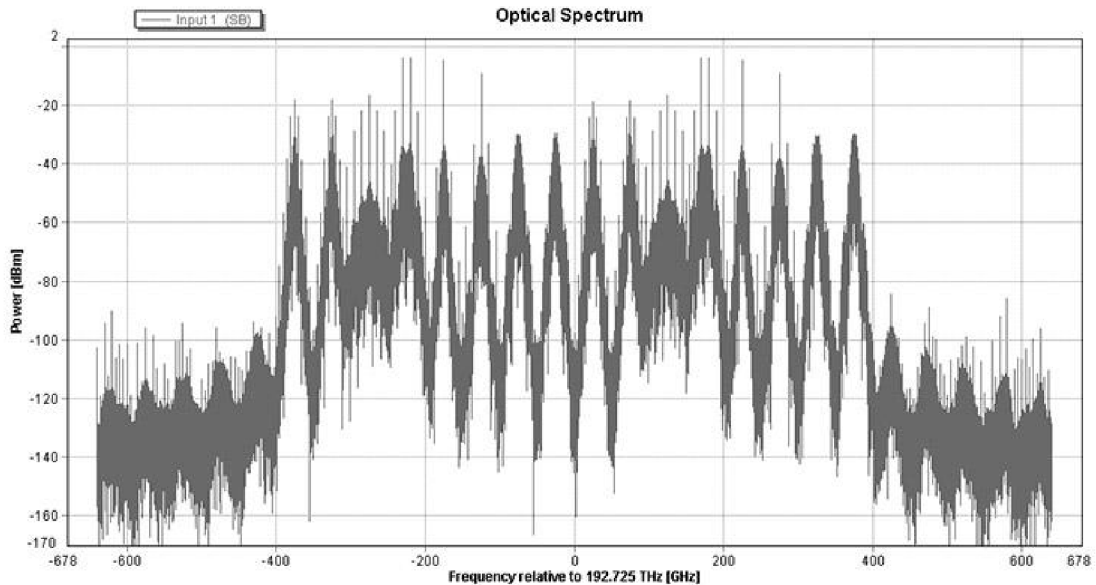
Po úspešnom overení funkčnosti DWDM optického modelu s ideálnymi parametrami sú do prvkov modelu vložené reálne parametre. Reálne parametre multiplexora a demultiplexora sú získané z katalógu vybraného modelu [5]. Parametre sú nasledovné: Insertion Loss na demultiplexoroch je nastavený na hodnotu 3,2 dB. Insertion Loss na multiplexoroch je nastavený na hodnotu 2.0 dB, Channel spacing je nastavený na 100 GHz podľa výrobcu [5]. Hodnota šírky pásma je nezmenená, teda 50 GHz, hodnota Bit Rate je tiež nezmenená, teda 10 Gbit/s. Z dôvodu reálnych hodnôt je do simulačného modelu vložený optický zosilňovač. Optický zosilňovač má



Obr. 7.5: Model DWDM siete

nastavenú hodnotu Gain na 10 dB. Navrhnutý a upravený model je znovu simulovaný a analyzovaný. Z výsledkov simulácie reálneho modelu DWDM optickej siete sú viditeľné len minimálne zmeny nameraných hodnôt bitovej chybovosti BER v porovnaní s výsledkami z analýzy s ideálnymi parametrami. Najmenšiu hodnotu bitovej chybovosti BER má modulácia RZ, ktorá má rádovo nižšie hodnoty ako druhá najlepšia modulácia – DQPSK. Modulácia DPSK má v celej meranej dĺžke takmer konštantné hodnoty bitovej chybovosti BER. Pri dĺžke trasy 50 km sa modulácia NRZ približuje k hraničným hodnotám. Pri použití trasy nad 50 km je pravdepodobné, že bude NRZ modulácia nepoužiteľná. Podobne ako pri simulácií s ideálnymi parametrami, tak aj pri simulácií s reálnymi parametrami má modulácia CSRZ pri dĺžke trasy nad 25 km vysoké hodnoty bitovej chybovosti BER. Z nameraných hodnôt sa dá povedať, že CSRZ modulácia nie je vhodná na dlhšie vzdialenosti. Modulácia CRZ má pri dĺžke trasy približne 45 km vysoké hodnoty bitovej chybovosti BER. To znamená, že modulácia CRZ nie je vhodná na použitie na vyššie vzdialenosti. Všetky ostatné simulované modulačné techniky majú uspokojivé hodnoty bitovej chybovosti BER.

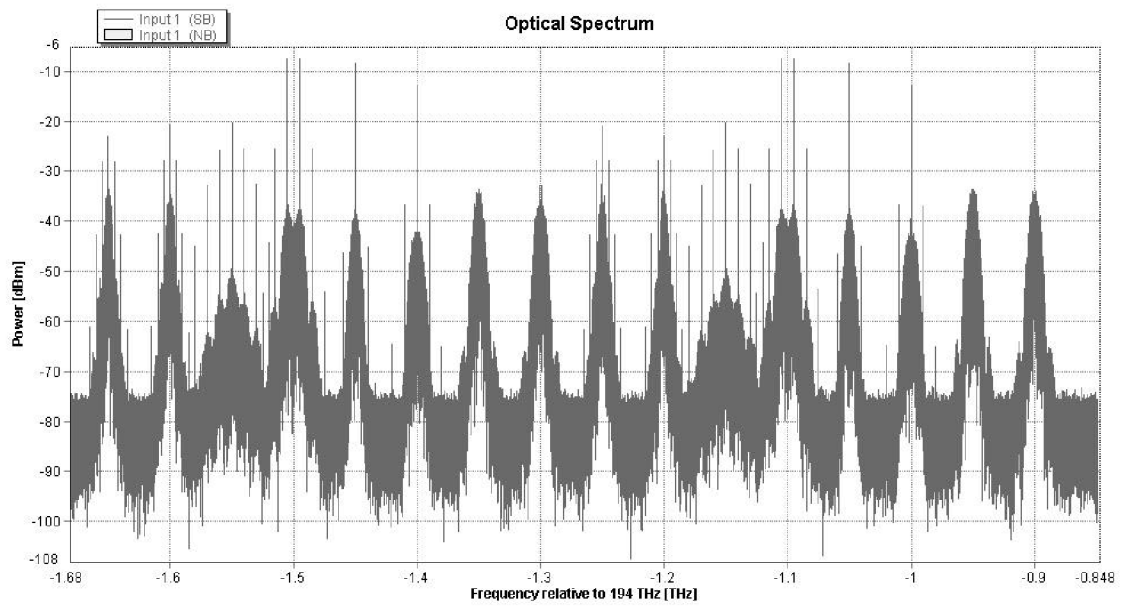
Zo simulácií vyplýva, že optické spektrum sa v priebehu optickej trasy mení. Rôzne šumy, interferencia ostatných kanálov a ďalšie elementy menia optické spek-



Obr. 7.6: Optické spektrum pre 16 kanálov so šírkou pásma 50 GHz.

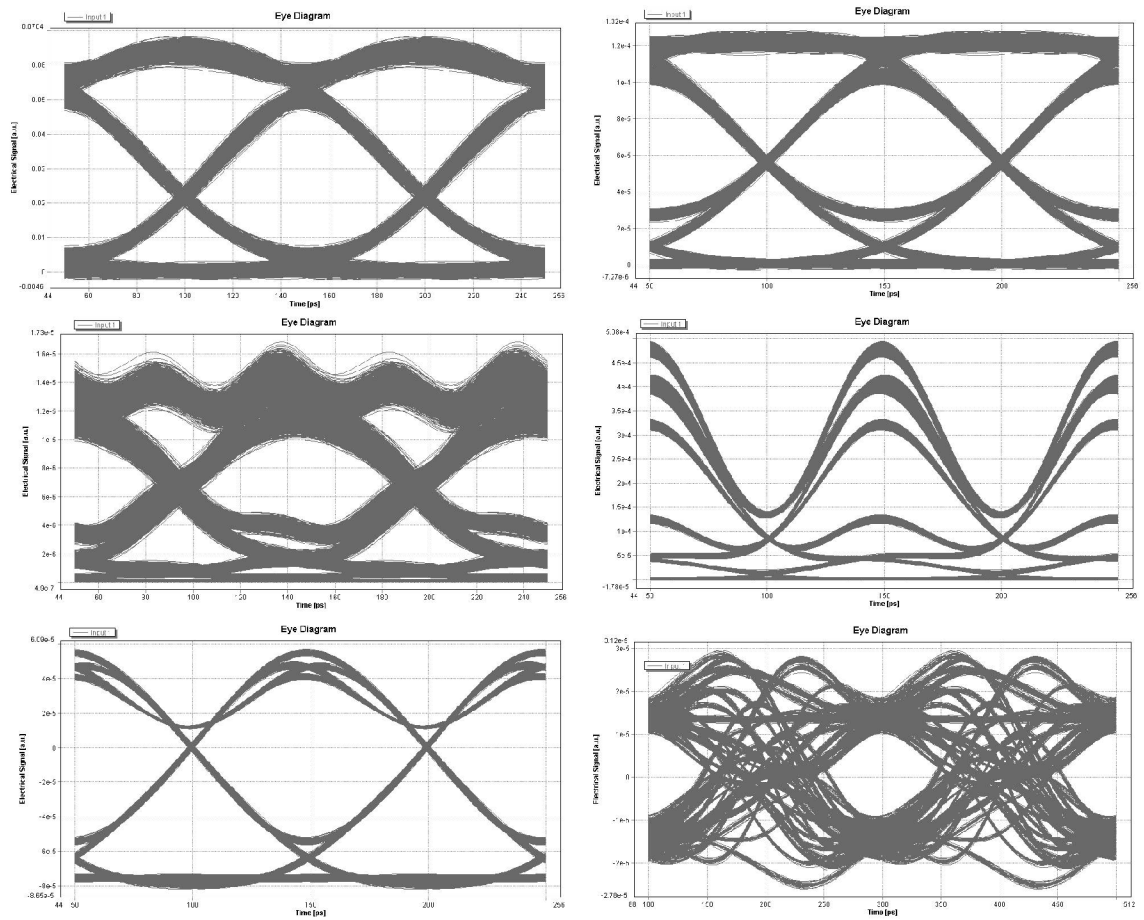
trum a ovplyvňujú výslednú kvalitu signálu. Na obrázku 7.7 sú znázornené diagramy oka analyzované s reálnymi hodnotami na dĺžke trasy 50 km. Pri porovnaní s diagramami oka znázornenými v kapitole 6 je vidieť veľký rozdiel. Z analýzy vyplýva, že optické spektrum sa menilo u každej modulácie rôzne. Najmenšie zmeny v spektre signálu znázornené v diagrame oka sú viditeľné pri DPSK modulácií, pretože DPSK modulácia je nastavená na prvom kanále, čiže rušivé vplyvy sú menšie. Najväčšie zmeny v spektre signálu znázornené v diagrame oka sú pri CRZ modulácií. Zo simulácie DWDM vyplýva, že CRZ modulácia má v každej simulácii najhoršie výsledky zo všetkých použitých modulácií. Menej vyhovujúce výsledky CRZ modulácie môžu byť spôsobené rôznymi optickými javmi, ktoré môžu vzniknúť. Je potrebné poznamenať, že pri viditeľnej zmene optického spektra signálu sa bitová chybovosť u väčšiny modulácií rapídne nezmenila. Hlavným vypovedajúcim parametrom je preto bitová chybovosť BER. Z analýzy optického spektra z obrázku 7.7 získaného na vzdialenosti 50 km sa dá potvrdiť zvýšenie šumu. Hodnota šumu sa pohybuje približne na hodnotách -75 dBm. Pri simulácii modelu s ideálnymi parametrami prvkov sa hodnota šumu pohybuje pod -100 dBm.

Zo simulácií uvedených modulačných techník vyplýva, že všetky simulované modulačné techniky sa dajú použiť pri vzdialenosti približne 25 km. Pri vyšších vzdialenostiach je potrebné nahradiť CSRZ a CRZ moduláciu inými vhodnými moduláciami alebo rôznymi technikami znížiť bitovú chybovosť BER. Ostatné analyzované modulačné metódy sú vhodné na použitie vo WDM optických sieťach. V prípade, ak

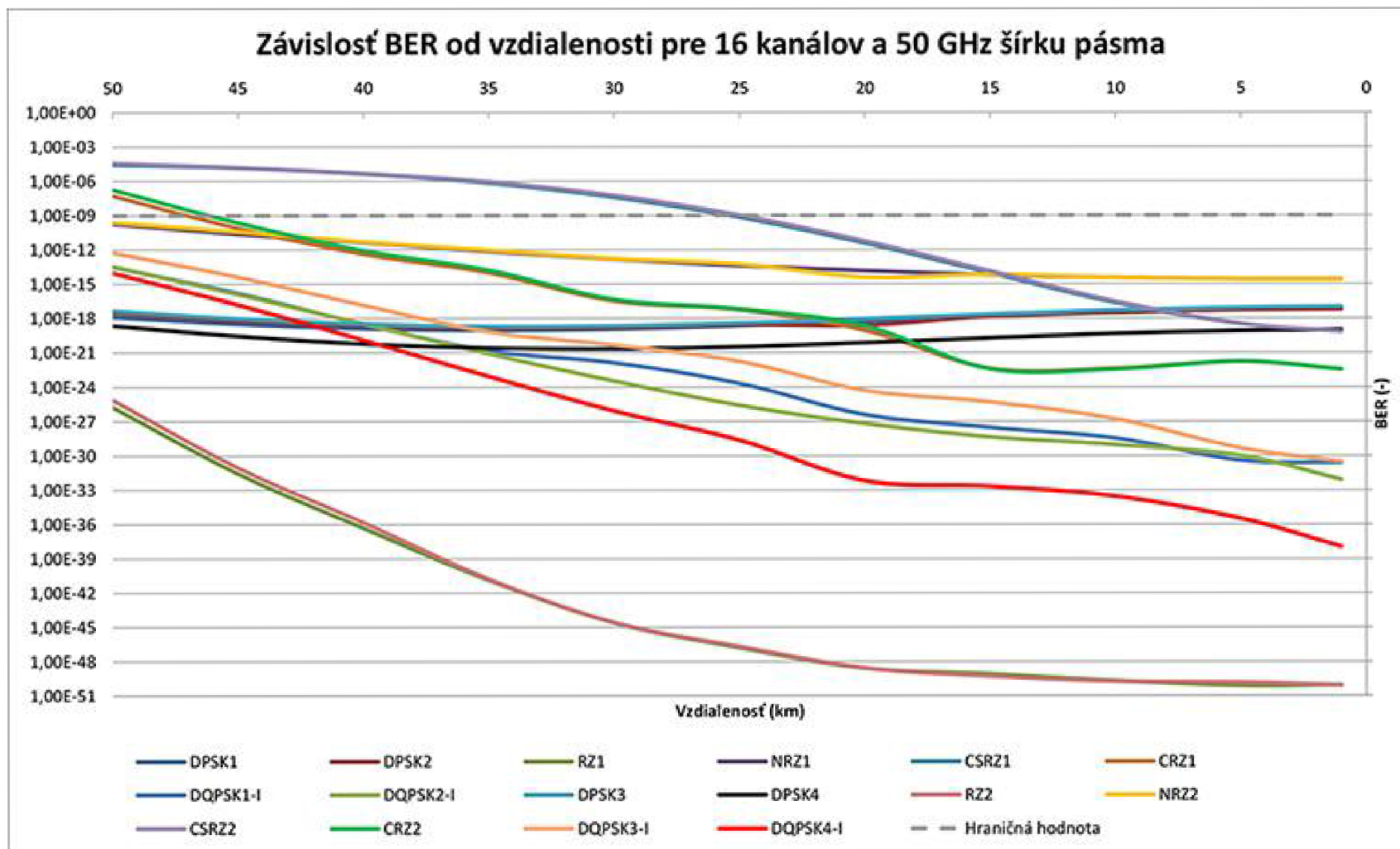


Obr. 7.7: Optické spektrum analyzované na dĺžke 50 km.

by boli použité v simulovanom modeli iné modulačné techniky, výsledky z modulácií môžu byť odlišné. Odlišné výsledky sa dajú teoreticky získať aj iným rozložením modulácií v jednotlivých kanáloch. Testovaním rôznych kombinácií by sa mohla zvýšiť efektivita a kvalita DWDM modelu.



Obr. 7.8: Porovnanie diagramov oka modulácií RZ, NRZ, CRZ, CSRZ, DPSK a DQPSK pri vzdialenosti 50 kilometrov.



Obr. 7.9: Závislosť BER od vzdialenosti pre šírku pásma 50GHz s ideálnymi parametrami

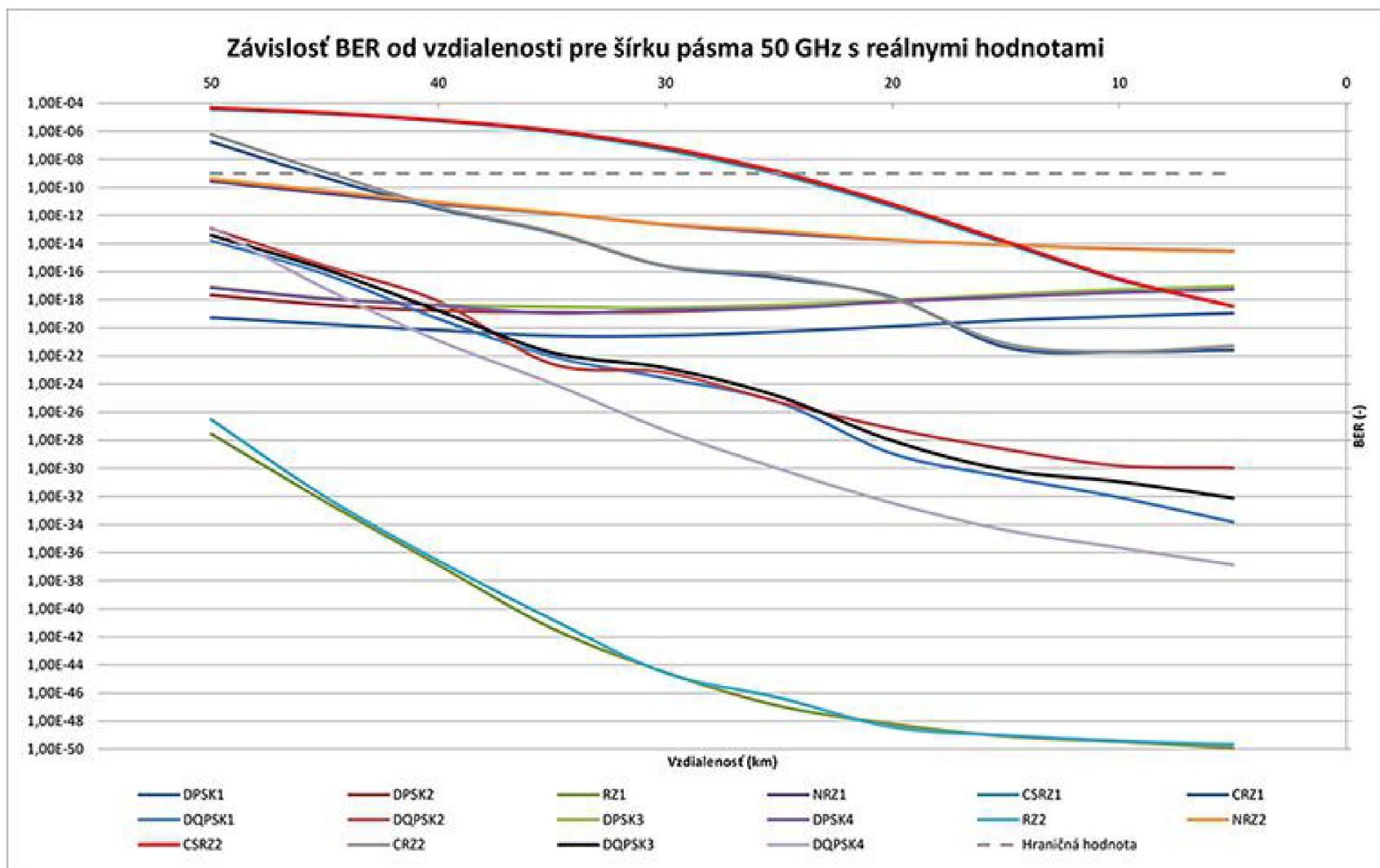
Tab. 7.4: Hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti pre šírku pásma 50GHz s ideálnymi parametrami

	50 km	45 km	40 km	35 km	30 km	25 km	20 km	15 km	10 km	5 km
DPSK1	1,335e-18	3,266e-19	1,318e-19	9,552e-20	1,197e-19	2,303e-19	5,576e-19	1,386e-18	3,106e-18	5,346e-18
DPSK2	3,222e-18	6,747e-19	2,347e-19	1,471e-19	1,630e-19	2,761e-19	2,432e-19	1,456e-18	3,112e-18	5,185e-18
RZ1	1,703e-26	2,674e-32	4,706e-37	1,317e-41	2,464e-45	1,601e-47	2,593e-49	8,001e-50	2,045e-50	8,058e-51
NRZ1	1,847e-10	2,437e-11	4,468e-12	7,317e-13	1,530e-13	3,980e-14	1,446e-14	6,166e-15	3,627e-15	2,682e-15
CSRZ1	2,722e-5	1,418e-5	4,365e-6	7,044e-7	3,881e-8	6,885e-10	3,800e-12	9,208e-15	2,241e-17	3,114e-19
CRZ1	5,285e-8	7,966e-11	4,293e-13	9,810e-15	3,302e-17	5,650e-18	8,788e-20	4,105e-23	4,123e-23	1,653e-22
DQPSK1-I	3,169e-14	1,595e-16	3,254e-19	1,467e-21	1,319e-22	2,027e-24	3,854e-27	2,817e-28	3,214e-29	3,701e-31
DQPSK1-Q	4,249e-16	5,956e-19	1,999e-22	4,409e-25	2,370e-26	3,599e-29	1,500e-32	2,527e-33	1,963e-35	2,430e-38
DQPSK2-I	3,610e-14	1,272e-16	3,274e-19	8,255e-22	3,356e-24	2,514e-26	6,238e-28	4,196e-29	8,766e-30	9,466e-31
DQPSK2-Q	6,885e-14	3,487e-16	1,609e-18	7,471e-21	5,886e-23	9,144e-25	3,387e-26	4,576e-27	9,901e-28	6,107e-29
DPSK3	4,653e-18	9,597e-19	3,294e-19	1,954e-19	2,173e-19	3,767e-19	8,978e-19	2,195e-18	4,935e-18	8,464e-18
DPSK4	2,337e-19	2,916e-20	6,089e-21	2,630e-21	2,174e-21	3,246e-21	7,395e-21	1,885e-20	4,581e-20	7,978e-20
RZ2	7,290e-26	9,586e-32	1,415e-36	1,606e-41	2,614e-45	2,029e-47	2,748e-49	5,161e-50	1,827e-50	1,477e-50
NRZ2	2,491e-10	3,780e-11	4,985e-12	9,022e-13	1,664e-13	5,404e-14	1,425e-15	6,676e-15	3,568e-15	2,556e-15
CSRZ2	3,897e-5	1,546e-5	4,542e-6	8,889e-7	5,558e-8	1,039e-9	5,523e-12	1,295e-14	2,857e-14	3,253e-19
CRZ2	1,780e-7	2,292e-10	8,406e-13	1,619e-14	4,512e-17	6,486e-18	2,109e-19	3,682e-23	3,514e-23	1,690e-22
DQPSK3-I	5,595e-13	4,187e-15	1,435e-17	6,760e-20	4,725e-21	1,728e-22	4,904e-25	4,685e-26	1,546e-27	4,329e-30
DQPSK3-Q	3,598e-14	2,057e-16	4,994e-19	3,900e-21	5,048e-22	1,117e-23	5,287e-26	9,368e-27	2,607e-28	9,220e-31
DQPSK4-I	9,649e-15	1,542e-17	1,284e-20	8,638e-24	8,145e-27	2,220e-29	6,401e-31	2,039e-33	2,700e-34	3,055e-36
DQPSK4-Q	3,850e-15	5,111e-18	4,227e-21	3,724e-24	5,708e-27	2,324e-29	2,403e-31	9,455e-33	1,137e-33	7,733e-36



Tab. 7.5: Hodnoty BER v závislosti od vzdialenosti pre šírku pásma 50GHz s reálnymi parametrami

	50 km	45 km	40 km	35 km	30 km	25 km	20 km	15 km	10 km	5 km
DPSK1	5,396E-20	1,863E-20	6,735E-21	2,760E-21	2,829E-21	5,272E-21	1,276E-20	3,375E-20	6,440E-20	1,142E-19
DPSK2	2,167E-18	4,402E-19	1,727E-19	1,331E-19	1,441E-19	2,977E-19	7,069E-19	1,618E-18	3,672E-18	5,744E-18
RZ1	2,777E-28	4,399E-33	1,326E-37	4,098E-42	2,994E-45	1,226E-47	6,275E-49	8,165E-50	3,465E-50	1,218E-50
NRZ1	2,843E-10	3,828E-11	6,450E-12	1,426E-12	2,256E-13	5,747E-14	1,784E-14	8,001E-15	4,314E-15	2,937E-15
CSRZ1	3,701E-05	1,805E-05	5,288E-06	8,864E-07	4,602E-08	8,307E-10	4,322E-12	1,017E-14	2,609E-17	3,454E-19
CRZ1	1,773E-07	5,085E-10	3,044E-12	6,118E-14	2,447E-16	3,581E-17	1,490E-18	4,165E-22	1,918E-22	2,594E-22
DQPSK1-I	1,637E-14	6,855E-17	4,422E-20	9,406E-23	2,634E-24	4,992E-26	1,133E-29	2,393E-31	8,420E-33	1,503E-34
DQPSK1-Q	1,565E-14	8,863E-17	1,770E-19	1,105E-21	7,817E-23	3,397E-25	1,042E-27	5,072E-29	1,619E-30	4,248E-32
DQPSK2-I	1,144E-13	2,645E-16	7,938E-19	2,741E-23	6,728E-24	5,443E-26	6,673E-28	2,230E-29	1,511E-30	1,051E-30
DQPSK2-Q	6,471E-16	4,897E-19	1,682E-22	3,522E-26	1,747E-29	1,852E-32	7,555E-35	2,964E-37	1,393E-38	1,864E-39
DPSK3	7,886E-18	1,289E-18	4,476E-19	3,152E-19	2,748E-19	4,498E-19	9,366E-19	2,382E-18	5,411E-18	9,316E-18
DPSK4	7,201E-18	1,189E-18	3,882E-19	1,153E-19	1,956E-19	2,472E-19	7,522E-19	1,626E-18	3,261E-18	5,343E-18
RZ2	2,901E-27	9,550E-33	2,588E-37	1,798E-41	2,754E-45	4,626E-47	3,735E-49	9,818E-50	3,799E-50	2,173E-50
NRZ2	4,139E-10	5,993E-11	8,558E-12	1,575E-12	2,428E-13	7,917E-14	1,861E-14	8,238E-15	3,962E-15	2,632E-15
CSRZ2	4,713E-05	2,093E-05	6,096E-06	1,160E-06	6,931E-08	1,282E-09	6,467E-12	1,404E-14	3,074E-17	3,487E-19
CRZ2	5,987E-07	1,268E-09	4,185E-12	6,958E-14	2,689E-16	5,408E-17	1,230E-18	7,665E-22	2,066E-22	5,134E-22
DQPSK3-I	3,866E-14	1,483E-16	1,694E-19	1,754E-22	1,374E-23	1,305E-25	9,225E-29	7,715E-31	1,108E-31	7,699E-33
DQPSK3-Q	5,223E-16	5,813E-19	3,895E-23	7,224E-26	2,427E-27	5,074E-30	4,243E-34	1,215E-36	2,705E-38	1,713E-40
DQPSK4-I	1,202E-13	9,839E-18	3,828E-21	1,048E-24	2,903E-28	3,744E-31	2,137E-33	1,694E-35	6,259E-37	8,391E-38
DQPSK4-Q	1,431E-13	6,546E-18	1,249E-21	1,113E-24	5,067E-28	9,259E-31	3,358E-33	3,995E-35	2,212E-36	1,369E-37



Obr. 7.10: Závislost BER od vzdialenosti pre šírku pásma 50GHz s reálnymi parametrami

## 8 ZÁVER

Účelom diplomovej práce bolo zoznámiť čitateľov so základnými technikami konštrukcie optických vlákien. Na základe popísaných vlastností boli uvedené fyzikálne javy a procesy, ktoré sa v optických prenosoch vyskytujú. V diplomovej práci boli popísané základné modulačné techniky používané v optických prenosových sieťach. Jednotlivé modulačné techniky boli simulované v programe VPI Photonics. Najprv bola každá modulačná technika simulovaná a analyzovaná samostatne. Zo získaných výsledkov bola určená funkčnosť modulácií a predpoklad na možné použitie v DWDM optickej sieti. Následne boli funkčné modulácie vložené do simulačného modelu DWDM siete, kde prebehli komplexné simulácie celého modelu DWDM siete. Model DWDM optickej siete bol simulovaný pre 8 a 16 kanálov, s použitím šírky pásma 100 GHz a 50 GHz s ideálnymi parametrami multiplexorov a demultiplexorov aj s reálnymi parametrami multiplexorov a demultiplexorov. V modeli je použitých 6 funkčných modulačných techník, ktoré boli testované do dĺžky optickej trasy až 50 km. Ďalšie dve modulačné techniky (QAM a BPSK) sa nepodarilo dostať do funkčného stavu, preto neboli použité vo výslednom modeli DWDM optickej siete.

Zo simulácií všetkých modulačných techník vo výslednom modeli DWDM optickej siete vyplýva, že všetky použité modulácie je možné použiť do dĺžky trasy približne 25 km. Pri dlhších trasách sa hodnoty bitovej chybovosti zvyšujú. Z dôvodu vysokých hodnôt bitovej chybovosti pri dlhších trasách, použitie modulačných techník CRZ a CSRZ nie je vhodné. Modulácia NRZ pri dĺžke optickej trasy 50 km má hodnoty bitovej chybovosti tesne na hranici použitia.

Aby sa predišlo neuspokojivým výsledkom nameraných hodnôt bitovej chybovosti, je možné nahradiť modulácie CRZ a CSRZ inými modulačnými technikami, ktoré by mali nižšie hodnoty bitovej chybovosti a ich použitie by bolo prínosné.

## LITERATÚRA

- [1] *Bezvláknova optika* [online]. Praha: Root.cz, 2002 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/bezvlaknova-optika-2/>
- [2] BOHÁČ, L. Optické zdroje záření - parametry a užití. *KATEDRA TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY* [online]. ČVUT FEL, 2009 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.comtel.cz>
- [3] BOHÁČ, L. Optické detektory - parametry a užití. *KATEDRA TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY* [online]. ČVUT FEL, 2009 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.comtel.cz>
- [4] ČERTÍK, Filip. Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu. *Posterus*. 2011, 4(9). ISSN 1338-0087. Dostupné také z: <http://www.posterus.sk/?p=11599>
- [5] *Dense Wavelength Division Multiplexer*. 1. HUBER+SUHNER Cube Optics AG: Cube Optics AG, 2016.
- [6] DUFFEK, Luděk. *Modulátor QAM*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vedoucí práce Radim Číž.
- [7] *Fiber-Optics* [online]. 2015 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: [http://www.fiber-optics.info/fiber\\_optic\\_glossary/self-phase\\_modulation](http://www.fiber-optics.info/fiber_optic_glossary/self-phase_modulation)
- [8] FILKA, Miloslav. *Optické přenosy informací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Brno: VUT FEKT, 2014. ISBN 978-80-214-5064-6.
- [9] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Centa, 2009, 369s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [10] G694.1. *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. Geneva: ITU-T, 2012.
- [11] G.694.2. *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*. ITU-T, 2003. Dostupné také z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/>
- [12] GHATAK, A., K. THYAGARAJAN. *Optical Waveguides and Fibers. Fundamentals of photonics*. Bellingham, 2008, ISBN 9780819471284. Dostupné z: <https://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2007.pdf>.
- [13] *IHS Engineering* [online]. 2004 [cit. 2015-11-1]. Dostupné z: <http://www.globalspec.com/reference/21710/160210/chapter-2-13-2-chromatic-dispersion>

- [14] LAFATA, P.: Pasivní optické síte WDM-PON.[online].2009, ČVUT Praha, [cit. 2015-11-2 ]. dostupné z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>.
- [15] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. Technická univerzita Ostrava, verzia:2.1.3, 2006. cit. 2012-10-25]. 172 s. Dostupné z:<<http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>
- [16] MUKHERJEE, B. *Optical WDM Networks*. New York: Springer Science, 2006. ISBN 978-0387-29055-3.
- [17] MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R.; TEJKAL, V.; FILKA, M. *The Influence of Binary Modulations in OTDM Networks*. In Research in Telecommunication Technologies. Žilina: University of Žilina, 2012. s. 193-196. ISBN: 978-80-554-0569-8.
- [18] PASCHOTTA, Rüdiger. *RP Photonics Enclypodeia* [online]. 2015 [cit. 2015-12-5]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/continuous\\_wave\\_operation.html](https://www.rp-photonics.com/continuous_wave_operation.html)
- [19] POOLE, Ian. Avalanche photodiode. In: *Radio Electronics* [online]. UK: Adrio Communications Ltd, 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/data/semicond/photo-diode/avalanche-photodiode.php>
- [20] PORVAZ, Maroš. *Modulačné schémy v plne optických komunikačných systémoch*. TUKE, 2014. Dostupné také z: <http://kemt.fei.tuke.sk/wp-content/uploads/Diplomova%20praca%20seminar/2014/Porvaz.pdf>
- [21] ŠIFTA, Radim, Petr MÜNSTER a Tomáš HORVÁTH. Přesnost měření disperzí CD / PMD. *Electrorevue*. 2013, **2013**(5). ISSN 1213-1539. Dostupné také z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/presnost-mereni-disperzi-cd-pmd-accuracy-of-cd-pmd-dispersion-measurement-/>
- [22] SÝKORA, J.: Princip WDM.[online].2004, CVUT Praha, [cit. 2013-11-5 ]. dostupné z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072805>.
- [23] Teorie Sdělování. In: *ZÁKLADNÍ KLÍČOVACÍ TECHNIKY* [online]. 2014 [cit. 2015-11-1]. Dostupné z: <http://www.utko.feec.vutbr.cz/cizr/tsd/pr/Pr5.pdf>
- [24] Multiplexy. In: *ZÁKLADNÍ KLÍČOVACÍ TECHNIKY* [online]. 2014 [cit. 2015-11-1]. Dostupné z: <http://www.utko.feec.vutbr.cz/cizr/tsd/pr/Pr11.pdf>
- [25] VIVEK, Alwayn. *Optical Network Design and Implementation*. USA: Cisco Press, 2004. ISBN 1-58705-105-2.

- [26] VPI Photonics. [Simulačný program] Berlin, Nemecko, 2013.  
<http://vpiphotonics.com/index.php>

# ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

- ASK amplitúdové kľúčovanie - Amplitude Shift Keying
- BER bitová chybovosť - Bit Error Rate
- BPSK binárne fázové kľúčovanie - Binary Phase Shift Keying
- CDM kódový multiplex - Code Division Multiplex
- CRZ rozmiataná modulácia s návratom k nule - Chirped Return to Zero
- CSRZ Modulácia s potlačenou nosnou - Carrier-Suppressed Return-to-Zero
- CWDM hrubý vlnový multiplex - Coarse Wavelength Multiplex
- CW laser laser s trvalou vlnou - Continuous Wave
- DBR distributed Bragg reflector - laser s rozprestrenými Braggovými reflektormi
- DPSK diferenčné fázové kľúčovanie - Differential Phase-Shift Keying
- DQPSK diferenčné kvadrátne fázové kľúčovanie - Differential Quadrature phase-shift keying
- DWDM hustý vlnový multiplex - Dense Wavelength division multiplex
- FDM frekvenčný multiplex - Frequency Division Multiplex
- FWM štvorvlnné zmiešavanie - Four Wave Mixing
- ITU-T Medzinárodná telekomunikačná únia - International Telecommunication Union
- LED luminiscenčná dióda - Light Emitting Diode
- MMF multimódové vlákno - Multimode fiber
- MZM Mach-Zhender modulator - Mach-Zhenderov modulátor
- NRZ modulácia s nenávratnou hodnotou k nule - Non Return to Zero
- OFA optický vláknový zosilňovač - Optical Fiber Amplifier
- OTDM optický časový multiplex - Optical Time Division Multiplex
- PSK fázové kľúčovanie - Phase Shift Keying
- PRBS Pseudonáhodná bitová postupnosť - Pseudo Random Bit Sequence

QAM kvadrátúrne amplitúdové kľúčovanie - Quadrature Amplitude Keying

QPSK kvadrátúrne kľúčovanie - Quadrature Phase Shift Keying

RZ modulácia s návratovou hodnotou k nule - Return to Zero

SMF jednovidové vlákno - Single Mode Fiber

SOA polovodičový optický zosilňovač - Semiconductor Optical Amplifier

SPM vlastná fázová modulácia - Self Phase Modulation

TDM časový multiplex - Time Division Multiplex

XPM krížová modulácia - Cross-Phase Modulation

WDM vlnový multiplex - Wavelength division multiplex