

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky



## Modelování optických systémů v programu Optsim

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Lucki, Ph.D.

**Diplomant:** Bc. Lukáš Engler

Praha, květen 2018

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 25. 5. 2018

.....

Bc. Lukáš Engler

## **Anotace:**

Tato diplomová práce blíže zkoumá aktuální problémy optických přenosových systémů. Zaměřuje se na problematiku významného omezujícího faktoru optických přenosových systémů, a sice na vliv chromatické disperze, respektive na její kompenzaci. Simulovány jsou tři přístupy pro potlačení tohoto jevu, a to na dvou různých systémech, aby bylo možné považovat výsledky v omezené míře za obecně platné. Následně se věnuje jevu čtyřvlnného směšování a způsobům, jak jej kompenzovat, např. pomocí změny polarizace kanálů. Na základě simulací v programu Optsim, jsou doporučeny metody a parametry pro zefektivnění simulovaných systémů s ohledem na aktuální vývoj v oblasti přenosových technologií.

## **Klíčová slova:**

DWDM, Polarizace, Optsim, Čtyřvlnné směšování, Chybovost BER, Optické vlákno, PM-QPSK

## **Summary:**

This thesis deals with the current problems in fibre-optic transmission systems. One of the topics addressed is conceptualization of the limiting factors, such as chromatic dispersion and its suppression. Variety of approaches is used in order to systematize dispersion compensation, as they are simulated for different systems so that the results can be regarded as credible. Last but not least, the thesis shows that the consequences of four wave mixing in systems with wavelength division multiplexing can be avoided by setting appropriate polarization. Based on the simulations performed by using Optsim software tool, eligible approaches and verified parameters are recommended with respect to current developments in the field of transmission technology.

## **Keywords:**

DWDM, Polarization, Optsim, Four-wave Mixing, Bit Error Rate, Optical Fiber, PM-QPSK



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	<b>Engler</b>	Jméno: <b>Lukáš</b>	Osobní číslo: <b>392794</b>
Fakulta/ústav:	<b>Fakulta elektrotechnická</b>		
Zadávající katedra/ústav:	<b>Katedra telekomunikační techniky</b>		
Studijní program:	<b>Elektronika a komunikace</b>		
Studijní obor:	<b>Komunikační systémy a sítě</b>		

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Modelování optických systémů v programu Optsim**

Název diplomové práce anglicky:

**Simulation of optical systems in Optsim**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je prozkoumat možnosti implementace optického systému pro dané požadavky na přenosovou kapacitu a počty koncových zařízení. Dílčím cílem je eliminace jevů omezujících optický přenos (disperze, PMD, nelineární jevy) a optimalizace přenosu (regenerace signálu, volba topologie, upgrade technologie - CWDM, DWDM, PON, AON, úprava rozestupu vlnových délek či výkonových úrovní, použití modernějších rozbočovačů) za účelem dosažení vyšších přenosových rychlostí. Simulace provádějte v programu Optsim. Finálním výsledkem je parametrizovaný návrh optické přípojky (fyzická vrstva), který co nejlépe popisuje chování reálné trasy a nejlépe splňuje požadavky pro optický přenos za daných podmínek.

Seznam doporučené literatury:

[1] ITU-T G-series Supplement 39: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. ITU Recommendation, 2012.  
[2] Udalcovs, A.; Monti, P.; Bobrovs, V.; Schatz, R.; Wosinka, L.; Ivanovs, G.: Spectral and Energy Efficiency Considerations in Mixed-line Rate WDM Networks with Signal Quality Guarantee. 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2013.  
[3] Alam, J.; Alam, R.; Hu, G.; Mehrab, Z.: Bit Error Rate Optimization in Fiber Optic Communications. International Journal of Machine Learning and Computing, Vol. 1, No. 5. 2011.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Michal Luckí, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **04.01.2018** Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Michal Luckí, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc. podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## Poděkování

Na tomto místě děkuji panu Ing. Michalu Luckimu, Ph.D. za odborné vedení po celou dobu zpracování této práce, za vstřícnost a ochotu projevovanou při konzultacích a množství cenných rad, které napomohly k vypracování této práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>11</b>
1.1	Cíle práce.....	11
1.2	Organizace práce.....	11
<b>2</b>	<b>Aktuální stav problematiky.....</b>	<b>12</b>
2.1	Systémy s vlnovým multiplexem WDM .....	12
2.1.1	Hrubý vlnový multiplex CWDM.....	12
2.1.2	Hustý vlnový multiplex DWDM .....	12
2.2	Faktory limitující optické přenosové systémy.....	13
2.3	Optické modulace.....	17
2.4	Polarizace jako nástroj pro potlačení FWM .....	18
2.5	Metodika.....	18
2.5.1	BER.....	19
2.5.2	Detekční oko.....	19
<b>3</b>	<b>Simulace.....</b>	<b>21</b>
3.1	Simulace kompenzace chromatické disperze.....	21
3.1.1	Pre-, post- a symetrická kompenzace .....	21
3.1.2	Kompenzace v aktivní optické síti AON .....	23
3.1.3	Kompenzace v pasivní optické síti na bázi WDM .....	26
3.2	Simulace vysokorychlostního WDM systému.....	28
3.3	Simulace vlivu FWM v DWDM.....	33
3.3.1	Vyhodnocení vlivu FWM u DWDM.....	34
3.3.2	Vliv přebuzení systému na chybovost.....	39
3.4	Simulace závislosti FWM na polarizaci .....	40
3.4.1	Závislost FWM na polarizaci ve dvoukanálovém systému .....	42
3.4.2	Závislost FWM na polarizaci v 8kanálovém systému.....	47
<b>4</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>53</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>55</b>

# Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Schéma WDM systému.....	13
Obr. 2.2 – Závislost měrného útlumu a disperze na vlnové délce různých druhů vláken.[8] .....	17
Obr. 2.3 – Toleranční maska detekční oblasti diagramu oka rozhodnutí. Parametr $\mu_{0,1}$ představuje střední hodnotu vyhodnocovaných symbolů 0, potažmo 1 a $\sigma_{0,1}$ představuje rozptyl hodnot vyhodnocovaných symbolů 0 a 1 .....	20
Obr. 3.1 – Schéma vysílací části na straně OLT – PRBS generátor, NRZ ovladač, CW laser a Mach-Zehnderův modulátor. ....	21
Obr. 3.2 – Schéma jednokanálového systému s výkonovým optickým zesilovačem. Před hlavním úsekem vlákna je použit EDFA průběžný zesilovač, SMF vlákno podle ITU-T G.652 délky 120 km, a podle konkrétního typu kompenzace, kompenzační DCM modul před hlavním úsekem vlákna nebo za ním.....	22
Obr. 3.3 – Schéma 32kanálového systému, vycházejícího z WDM, s výkonovým či průběžným zesilovačem, NZDSF vláknem podle ITU-T G.654 s koeficientem chromatické disperze 4 ps/nm/km délky 200 km. Podle konkrétního typu kompenzace, se DCM modul nachází buď před hlavním úsekem vlákna, na obou koncích nebo za ním. ...	22
Obr. 3.4 – Schéma přijímací části na straně ONU/ONT – filtr Raised-Cosine pásmová propust v optické oblasti, PIN dioda, Besselův filtr v elektrické oblasti.....	23
Obr. 3.5 – Schéma bloku vláken pro simulaci pre-kompenzace. 24km DCM vlákno s průběžným zesilovačem následované hlavním úsekem 120km vlákna taktéž s průběžným zesilovačem. Blok je v simulaci použit dvakrát za sebou. ....	23
Obr. 3.6 – Výsledný diagram oka pro pre-kompenzaci disperze pro výkonovou zesilovací úroveň 5dBm (vlevo) a pro 10dBm (vpravo). ....	24
Obr. 3.7 – Schéma bloku vláken pro simulaci post-kompenzace. Hlavní 120km úsek vlákna s průběžným zesilovačem, následovaný DCM modulem s 24km kompenzujícím vláknem, též s průběžným zesilovačem. Blok je v simulaci opět použit dvakrát za sebou.....	24
Obr. 3.8 – Výsledný diagram oka pro post-kompenzaci disperze pro výkonovou zesilovací úroveň 5dBm (vlevo) a pro 10dBm (vpravo). Při navýšení výkonové úrovně došlo ke snížení oblasti oka rozhodnutí, potažmo chybovosti, na hodnoty blízké se stanovené hranici pro akceptovatelný BER. ....	25
Obr. 3.9 – Schéma bloku pro simulaci symetrické kompenzace. Začátek a konec je tvořen DCM modulem s průběžnými zesilovači a uprostřed je připojen dvakrát hlavní 120km úsek vlákna s průběžnými zesilovači. Blok je v simulaci použit pouze jednou.....	25
Obr. 3.10 – Výsledný diagram oka pro symetrickou kompenzaci disperze pro zesilovací výkon a ) 5dBm a pro b ) 10dBm. Tato kompenzace nevyžaduje nalezení optimálního nastavení výkonových úrovní zesilovačů.....	26
Obr. 3.11 – Vstupní spektrum optického signálu systému na bázi WDM s 32 kanály s 50GHz odstupem, bez kompenzace. ....	28
Obr. 3.12 – Výstupní spektrum optického signálu systému na bázi WDM s 32 kanály s 50GHz odstupem. Vlákno délky 200 km je kompenzováno DCM modulem s BGF. Vliv nelineárního efektu FWM je patrný po stranách spektra. ....	28
Obr. 3.13 – Schéma pro simulaci WDM systému s využitím PM-QPSK.....	29

Obr. 3.14 – Schéma vysílací části. Čtyři fázově posunuté datové toky, jejichž polarizace je v optické oblasti rotována o 180°. Vše probíhá v bloku „polmux_qpsk1“.....	30
Obr. 3.15 – Schéma bloku pro část operace pro modulaci QPSK a multiplexaci odlišně polarizovaných optických signálů „polmux_qpsk1“ ve vysílací části.....	30
Obr. 3.16 – Vstupní a výstupní spektrum signálu pro vysokorychlostní WDM systém...	31
Obr. 3.17 – Graf počtu chyb FEC, vypočtených v DSP bloku CMA, v závislosti na délce vlákna pro datové toky 1 -4 v kanále č . 5 .....	32
Obr. 3.18 – Graf chybovosti BER, vypočtené v DSP bloku CMA, v závislosti na délce vlákna pro datové toky 1 -4 v kanále č . 5 .....	32
Obr. 3.19 – Schéma modelu systému pro simulaci.....	33
Obr. 3.20 – Schéma simulace FWM.....	34
Obr. 3.21 – Vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 12,5 GHz. Jedná se o spektrum zachycené před vstupem do 100km úseku vlákna a jev FWM tedy není viditelný. ....	34
Obr. 3.22 – Optické spektrum na výstupu demultiplexoru pro kanálový rozestup 12,5 GHz. Zde jsou již patrné jednotlivé intermodulační FWM produkty. ....	35
Obr. 3.23 – Vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 25 GHz. Jedná se o spektrum zachycené před vstupem do 100km úseku vlákna a jev FWM tedy není tak patrný, jako na demultiplexoru.....	35
Obr. 3.24 – Výstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 25 GHz. Intermodulační produkty nejsou patrné, avšak analýza výkonové úrovně na odpovídajících frekvencích FWM produktů a také hodnoty chybovosti BER poukazují na jejich vliv na systém.....	36
Obr. 3.25 – Vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 50 GHz.....	36
Obr. 3.26 – Výstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 50 GHz.....	37
Obr. 3.27 – Vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 100 GHz.....	37
Obr. 3.28 – Výstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 100 GHz.....	38
Obr. 3.29 – Diagramy oka rozhodnutí pro kanálový rozestup a) 12,5; b) 25; c) 50 a d) 100 GHz. Kvůli vlivu FWM je kvalita přenosu negativně ovlivněna a hodnota BER je pro a) pod stanovenou hranicí pro DWDM systém, konkrétně 1,15·10 <sup>-5</sup> avšak pro b), c) i d) jsou už výsledky přípustné. ....	38
Obr. 3.30 – Vyobrazena jsou výstupní spektra pro hodnoty zisku výkonového a průběžného zesilovače a) 0, b) 17, c) 20 a d) 25 dB. Navyšování zisku optických zesilovačů či příliš velký výkon laserů může způsobit horší rozlišení jednotlivých kanálů mezi sebou na výstupu demultiplexoru, a tedy nárůst chybovosti. ....	40
Obr. 3.31 – Schéma pro simulaci závislosti FWM na polarizaci na dvoukanálovém DWDM systému s dvěma 100km kompenzovanými úseky SMF vlákna. ....	41
Obr. 3.32 – Schéma pro simulaci závislosti FWM na polarizaci na 8kanálovém DWDM systému s dvěma 100km kompenzovanými úseky DSF vlákna. Pro simulaci byly použity 50GHz a 25GHz kanálový odstup. ....	42
Obr. 3.33 – Spektrum vstupního signálu dvoukanálového DWDM systému. Před navázáním do hlavního úseku vlákna nejsou přítomny intermodulační FWM produkty...	42
Obr. 3.34 – Výstupní spektrum signálu v prvním kroku simulace. Je patrný významný vliv FWM produktů po stranách spektra.....	43
Obr. 3.35 – Výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, přítomných v optickém signálu dvoukanálového DWDM systému po průchodu 200km vláknem. Simulováno bylo 5 kroků s neměnnou hodnotou polarizace druhého kanálu.....	44



Obr. 3.36 – Výstupní spektrum signálu ve druhém kroku simulace. Změna polarizace osy S2 druhého kanálu o a) 45°, b) 90°, c) 135° a konečně d) 180° postupně potlačila intermodulační FWM produkty.....	44
Obr. 3.37 – Klesající výkonová úroveň intermodulačních produktů FWM, pro změny polarizace od 0° do 180° v pěti krocích. Oba kanály jsou v posledním kroku navzájem ortogonální, čili vliv výkonová úroveň FWM produktů je minimální.....	45
Obr. 3.38 – Hodnoty BER, pro změny polarizace od 0° do 180° v pěti krocích. Je patrné, že chybovost klesá s rostoucí změnou v úhlu polarizace druhého kanálu, potažmo se snižující se výkonovou úrovní intermodulačních produktů FWM.....	46
Obr. 3.39 – Graf výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, pro změny polarizace od 0° do 360° v pěti krocích po 90°. Při hodnotě 180° ve třetím kroku jsou oba kanály vůči sobě ortogonální a vliv FWM je tedy minimální. ....	47
Obr. 3.40 – Výstupní spektra signálu. Změna polarizace osy S2 kanálů 5-8 o a) 0°, b) 45°, c) 90°, d) 135° a konečně e) 180° postupně potlačuje intermodulační FWM produkty. Kanálový odstup je 50 GHz.....	48
Obr. 3.41 – Graf výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, pro změny polarizace od 0° do 180° v pěti krocích po 45°. Obrázek a) pro změny polarizace na kanálech 5 -8 a obrázek b) pro změny polarizace pro sudé kanály. Kanálový odstup je 50 GHz.....	49
Obr. 3.42 – Graf hodnot chybovosti BER pro 8kanálový systém s DSF vláknem potvrzuje příznivý vliv změny polarizace na chybovost systému (chybovost zaznamenána na kanále č. 5, srovnatelné hodnoty byly dosaženy na ostatních kanálech). Kanálový odstup je 50 GHz.....	49
Obr. 3.43 – Výstupní spektra signálu pro 8kanálový systém s 25GHz kanálovými odstupy. Změna polarizace osy S2 kanálů 5-8 o a) 0°, b) 45°, c) 90°, d) 135° a konečně e) 180° postupně potlačuje intermodulační FWM produkty.....	50
Obr. 3.44 – Graf výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, pro změny polarizace od 0° do 180° v pěti krocích po 45° (v 8kanálovém systému pro kanály 5 -8). Kanálový odstup je 525 GHz. ....	51
Obr. 3.45 – Graf BER 5. kanálu v 8kanálovém DWDM systému, pro změny polarizace od 0° do 180° v pěti krocích po 45°. Kanálový odstup je 25 GHz.....	51

# Seznam tabulek

<i>Tab. 3.1 – Přehled hodnot chybovosti BER pro různé přístupy kompenzace pro jednokanálový AON systém. Nejlepších výsledků dosahuje jednoznačně symetrická kompenzace.</i>	26
<i>Tab. 3.2 – Přehled hodnot chybovosti BER pro různé přístupy kompenzace pro systém, vycházející z WDM s výkonovým zesilovačem.</i>	27
<i>Tab. 3.3 – Přehled hodnot chybovosti BER pro různé přístupy kompenzace pro systém, vycházející z WDM s průběžným zesilovačem.</i>	27
<i>Tab. 3.4 – Přehled hodnot chybovosti BER a <math>Q</math>-faktoru pro různé kanálové rozestupy.</i>	39

# 1 Úvod

Optické přenosové systémy zcela jistě převzaly vedoucí pozici na poli přenosových médií v přístupových a páteřních sítích. Aktivní prvky disponují už běžně SFP+ (angl. Small Form-factor Pluggable Transciever), respektive QSFP (angl. Quad SFP) moduly, provozovatelé telekomunikační infrastruktury začali ve velké míře nasazovat FTTC (angl. Fiber to the Curb) a samotná hranice dosažitelné přenosové rychlosti je v rámci prvku dnes již limitována spíše možnostmi integrovaných elektronických obvodů, provádějících zpracování datového provozu.

I tak ale existuje řada dalších faktorů, omezujících dosažitelné přenosové rychlosti a obecně výkon optických přenosových systémů. Jsou jimi například disperze, nelineární jevy, použití méně efektivních modulací, a na druhé straně i přístup k návrhu optických přenosových systémů. Přestože pro první skupinu existuje mnoho zdokumentovaných a popsanych způsobů, jak tyto jevy potlačit či eliminovat, v oblasti návrhu a optimalizace optických přenosových systémů lze jistě najít další způsoby, jak datové přenosy dále zefektivnit.

## 1.1 Cíle práce

Cílem práce je prozkoumat možnosti implementace optického systému pro dané požadavky na přenosovou kapacitu a počty koncových zařízení při použití různých modulačních formátů, přičemž se zaměřím na vliv nelineárních jevů v navržených implementacích. Dílčím cílem je analýza přenosových vlastností systému při použití různě polarizovaného zdroje záření, za účelem dalšího navýšení přenosové rychlosti.

Simulace jsou prováděny v programu Optsim. Finálním výsledkem je parametrizovaný návrh optické přípojky (fyzická vrstva), který popisuje chování reálné trasy a nejlépe splňuje požadavky pro optický přenos za daných podmínek. Výběr vhodné topologie a použitých prvků pro simulaci vychází ze současných trendů a využívá aktuální poznatky v této oblasti.

## 1.2 Organizace práce

Úvodní část se věnuje cílům a rozvržení práce, rekapituluje současný stav problematiky optických přenosových systémů a možností, jak v souvislosti se zaměřením práce navýšit přenosovou kapacitu. Dále seznamuje s použitou metodikou simulace, výběrem a požadavky na simulovaný přenosový systém. Následuje oddíl s vyhodnocením provedených simulací a prezentace doporučení na základě zjištěných výsledků.

## 2 Aktuální stav problematiky

### 2.1 Systémy s vlnovým multiplexem WDM

Systémy vlnového multiplexu WDM vycházejí z myšlenky použít pro přenos na určitou vzdálenost jedno jednovidové optické vlákno, případně dvě pro oba směry přenosu, do kterého lze sdružit více optických kanálů, jež byly dříve přenášeny každé samostatným vláknem, a to i obousměrně, na základě vlnového (potažmo frekvenčního) dělení. Počet jednotlivých kanálů závisí na použité technologii vlnového multiplexu, ale vždy mezi sebou mají určitý kanálový odstup. Realizace takového systému vyžaduje použití optických transceiverů, tedy vysílačů a přijímačů (dnes nejčastěji v komerční sféře SFP moduly s rychlostmi 1, 10, 40 a 100 Gb/s), nastavených na vlnovou délku konkrétního kanálu a páru prvků optický multiplexor/demultiplexor, které sdružují jednotlivé kanály a na druhé straně rozdělují kanály na jednotlivé. Aktivní alternativa systému může zahrnovat navíc zesilovače optického signálu. Z hlediska protokolů je systém WDM transparentní, čili jedná se o řešení čistě na fyzické vrstvě. Z toho pramení i snadná škálovatelnost, kterou lze provést pomocí Add/Drop multiplexorů.

#### 2.1.1 Hrubý vlnový multiplex CWDM

Řídký vlnový multiplex (Coarse Wavelength Division Multiplex) je jedna ze dvou technologií WDM, konkrétně podle ITU-T G.694.2 [15] s rozhraními definovanými v ITU-T G.695 [16]. Vyznačuje se použitím až 18 kanálů s rozestupem 20 nm v pásmu 1 271 nm až 1 611 nm, přenosem na vzdálenosti až 500 km (po jednovidovém vlákně bez nutnosti zesílení) a rychlostí obvykle do 2,5 Gb/s. Větší kanálové rozestupy dovolují použít optické zdroje záření s větší šířkou vyzařovaného spektra, potažmo s méně stabilní hodnotou vyzařované vlnové délky. V praxi se od této technologie vzhledem k nižší spektrální efektivitě upouští, avšak díky nižší ceně systému se s ní stále setkáváme.

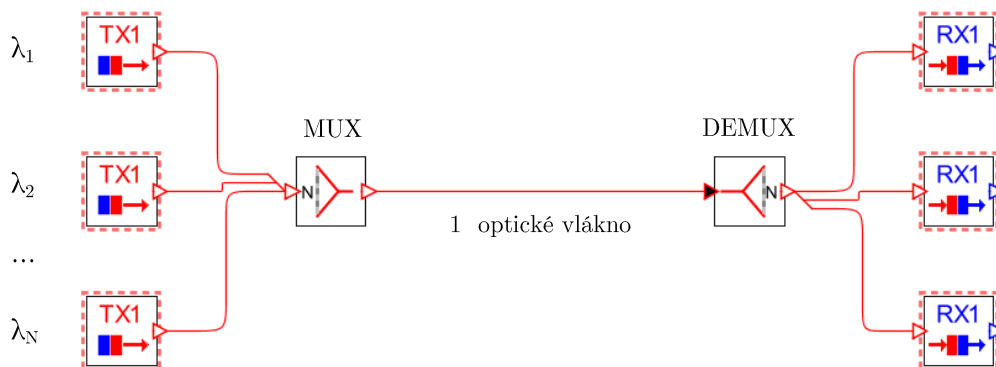
#### 2.1.2 Hustý vlnový multiplex DWDM

Hustý vlnový multiplex je definován v ITU-T G.671 [17]. Frekvenční rastr se podle ITU-T G.694.1 [18] vyznačuje vyšší spektrální efektivitou, na rozdíl od řídké varianty. Používá telekomunikační pásmo C, konkrétně od 1 528,77 nm do 1 560,61 nm, nebo pásmo L od 1 565 nm až 1 625 nm. Použití zmíněných pásem vychází z nízké hodnoty útlumu pro standardní optické vlákno v tomto pásmu. Kanálový rozestup podle doporučení umožňuje několik variant, a sice 12,5; 25; 50; 100 GHz s definovanými nosnými frekvencemi. Navíc je uvedena možnost flexibilního DWDM gridu, umožňující rozlišení násobků kanálového rozestupu 12,5 GHz a centrální nosné frekvence (v THz) podle:

$$193,1 + n \cdot 0,00625 \quad (2.1)$$

kde  $n$  je celočíselná hodnota (kladná i záporná včetně nuly) a 0,00625 je rozlišení pro nosnou frekvenci na kanál (v THz). Díky tomuto řešení lze použít různé šířky

kanálů v rámci jednoho DWDM systému, a tedy různých přenosových rychlostí či modulačních formátů. Co se týká přenosové kapacity systému, lze dnes přenášet až desítky Tb/s .



Obr. 2.1 – Schéma WDM systému.

## 2.2 Faktory limitující optické přenosové systémy

Optické přenosové systémy se skládají s aktivních či pasivních prvků a optických vláken, která obvykle tvoří většinu optické trasy. Porozumění jevům ve vláknech a jejich vlivu na přenosovou rychlost je kritický faktor při optimalizaci návrhu těchto systémů. Zásadní vliv na efektivitu systému má útlum optického vlákna. Samotný útlum má několik složek, které jsou popsány v následujícím odstavci, spolu s jejich fyzikálními příčinami a vlivem na optické přenosové systémy. Porozumění druhům rozptylu, ohybům či absorpci je věnován následující stručný výčet.

Rayleighův rozptyl je důsledek kolizí fotonů s molekulami materiálu jádra optického vlákna. Dochází tak k všesměrovému odrazu a část optického výkonu se odráží mimo původní směr záření. Jedná se o dominantní rozptyl v pásmu vlnových délek do 1 700 nm [1]. Popisuje jej koeficient níže:

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

Je tedy ovlivněn jak vlnovou délkou optického záření, tak indexem lomu vlákna. Mieův rozptyl vzniká na nehomogenitách o velikostech srovnatelných s vlnovou délkou použitého světelného záření, jako jsou bublinky v materiálu jádra vlákna. Dále může být způsoben kolísáním průměru jádra vlákna, tahovým napětím vlákna. Tento rozptyl roste, pokud geometrické vady překročí desetinu vlnové délky. Ramanův rozptyl je jev nelineární a dochází při něm k interakci fotonů optického

záření s rotačními a vibračními stavy molekul jádra vlákna, což ústí v rozptyl, způsobující posun vlnové délky optického záření na hodnoty okolo původních. V některých situacích se jevu však využívá (zejména v Ramanových zesilovačích) [2]. Brillouinův rozptyl vzniká kvůli interakci fotonů s akustickými vlnami v jádře vlákna, přičemž způsobený rozptyl je zpětný. Frekvence zpětně odraženého záření je nezávislá na teplotě [3].

Jevy, které jsou následkem přílišného ohybu vlákna do té míry, že již není dodržena podmínka totálního odrazu, a dochází tedy ke zvýšení chybovosti BER (angl. Bit Error Rate), se dají eliminovat již při pokládce vláken, potažmo při správné realizaci strukturované kabeláže a dodržení hodnot uvedených výrobcem. Kompenzace nebo eliminace zmíněných jevů umožňuje dosáhnout vyšší přenosové rychlosti v optickém vlákne potažmo přenosovém systému. Ztráty ohybem lze obecně rozdělit na mikroohyby a makroohyby. Mikroohyby souvisí se zakřivením menším, než je průměr vlákna. Makroohyby mohou způsobit změny disperzních vlastností vlákna. Dochází k tomu pro konkrétní vlákna a pro specifický poloměr ohybu [4]. Hlavním negativním důsledkem ohybů je útlum, vyjádřen koeficientem ohybových ztrát v rovnici (2.3).

$$a_R = c_1 (R) \cdot e^{-c_2 (R) \cdot R} \quad (2.3)$$

kde  $R$  je poloměr zakřivení vlákna. Makro-ohyby jdou eliminovat již při návrhu optické trasy. Pro optická vlákna je zavedena veličina kritický poloměr zakřivení. Při takovém zakřivení dojde ke zvýšení hodnoty chybovosti BER, či optický výkon klesne natolik, že jeho přítomnost není na přijímači detekována. Kritický poloměr, potažmo výrobcem udávaný minimální poloměr zakřivení vlákna, jehož dodržení by mělo být zaručeno správné vedení optického záření vlákem, je závislý na průměru jádra a materiálu, ze kterého je jádro vyrobeno.

Pomineme-li důsledky nedokonalostí při výrobě optického vlákna, zbývá soustředit se na eliminaci či snížení vlivu nelineárních jevů a disperze. Průchod optického pulzu ideálním vláknem bez útlumu a nelinearit je popsán rovnicí (2.4).

$$E(z, t) = A(t) \cdot e^{j\omega_0 t} \cdot e^{-j\omega\beta(\omega)z} \quad (2.4)$$

kde  $E(z, t)$  je intenzita elektrického pole jako funkce času  $t$  a pozice v prostoru  $z$ ,  $\omega$  je úhlová frekvence a  $\beta$  fázová konstanta. Nelineární vztah fázové konstanty  $\beta$  a úhlové frekvence  $\omega$  lze dále popsat Taylorovou řadou (2.5) (pro dostatečně pomalé změny).

$$\beta(\omega) = \beta_0(\omega_0) + \frac{\partial\beta_0}{\partial\omega}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2\beta_0}{\partial\omega^2}(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.5)$$

Fázová rychlost  $v_f$  optické nosné s úhlovou rychlostí  $\omega_0$  je dána právě fázovým posunem  $\beta_0$  v (2.6).

$$v_f = \frac{\beta_0}{\omega_0} = \frac{c}{n_{eff}} \quad (2.6)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $n_{eff}$  je efektivní index lomu. Fázová rychlost, zejména pak skupinová fázová rychlost, je důležitý parametr v optickém přenosovém médiu, jelikož pomáhá popsat jev chromatické disperze CD (angl. Chromatic Dispersion). Ze tří druhů disperze hraje chromatická disperze v optických přenosových systémech nejzásadnější roli. Její hodnota roste s délkou optické trasy nebo s přenosovou rychlostí. Chromatická disperze se projevuje roztažením pulzu na přijímací straně a lze ji popsat rovnicí (2.7).

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \frac{\partial^2 \beta_0}{\partial \omega_0^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \beta_2 \quad (2.7)$$

kteřá popisuje roztažení pulzu šířícího se vlnovodem na jednotku vlnové délky, v souvislosti s optickými vlákny je určena koeficientem chromatické disperze (2.8)

$$D(\lambda) = \frac{d t_g}{d\lambda} \quad (2.8)$$

a u DWDM systémů se sleduje také sklon spektrální charakteristiky chromatické disperze (2.9)

$$S(\lambda) = \frac{dD(\lambda)}{d\lambda} \quad (2.9)$$

Pro vlnovou délku 1 550 nm, má klasické SMF vlákno hodnotu chromatické disperze rovnu 16 ps/nm/km, zatímco jedna z prvních konvenčních kompenzačních vláken DCF měla zápornou hodnotu, typicky -80 ps/nm/km (přičemž efektivní plochy jádra vláken mohou být různé, např. 20  $\mu\text{m}^2$  a 80  $\mu\text{m}^2$ ). Dnes však již existují efektivnější řešení například v podobě vláken, která představují mnohem nižší koeficient záporné disperze nebo v podobě širokopásmových kompenzátorů na bázi mikrostrukturních vláken [6][6]. V souvislosti s WDM (angl. Wavelength Division Multiplex) systémy se její hodnoty liší i pro jednotlivé kanály, proto je obtížné efektivně kompenzovat její vliv pro WDM systém jako celek. Kromě chromatické disperze, označované někdy jako disperze druhého řádu, a jejíž kompenzace je obvykle dostačující pro systémy s přenosovými rychlostmi do 10 Gb/s, jednoduše použitím DCM (angl. Dispersion Compensating Module) modulu, se ale můžeme setkat i s chromatickou disperzí třetího řádu – sklonem spektrální charakteristiky chromatické disperze (dále jen S), jehož vliv je o to patrnější zejména v systémech s rychlostmi nad 10 Gb/s. Zejména v případě DWDM (angl. Dense WDM) systémů je efektivní CD symetricky kompenzovat pomocí DCF a S kompenzovat prostřednictvím FBG (angl. Fiber Bragg Grating) [6].

V kombinaci s použitím, místo klasických SMF (angl. Single-mode Fiber) vláken podle ITU-T G.652 [9], vlákna s nenulovou disperzí NZDSF (angl. Non-zero Dispersion-shifted Fiber) podle ITU-T G.655 [10], se dá navíc snížit hodnota

BER, a to v rozmezí až několika řádů. Pro účely simulace této práce se budou dle výše zmíněného kompenzovat jak CD, tak S.

Kompenzace CD na hodnotu nula však může napomoci vzniku jevu čtyřvlnného směšování FWM (angl. Four-wave Mixing). K tomuto jevu dojde, jsou-li fotony z jedné nebo více hladin pohlceny, vytvoří se fotony nové, avšak na jiných frekvencích, přičemž podmínka zákona zachování energie a hybnosti je dodržena [13]. Ve spektrálním analyzátoru toto intermodulační zkreslení, způsobené nelineárními vlastnostmi optického vlákna, pak můžeme pozorovat, jsou-li do vlákna navázána záření o různých frekvencích  $f_1, f_2, f_3$  a o dostatečném výkonu. Výsledkem je generace záření na nových frekvencích  $\pm f_1, \pm f_2, \pm f_3$ . Pro určení počtu intermodulačních produktů  $M$  na základě počtu použitých kanálů  $N$  v systému lze vyjít z následující rovnice (2.10)[14].

$$M = \frac{(N^3 - N)}{2} \quad (2.10)$$

Optický výkon intermodulačního produktu na frekvenci  $f_{123}$  lze vyjádřit jako (2.11):

$$P_{123} = \eta \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \left( \frac{D X_{1111} L_{eff}}{A_{eff}} \right)^2 P_1 P_2 P_3 e^{-\alpha L} \quad (2.11)$$

kde:

- $P_1, P_2, P_3$ : vstupní výkony optického záření
- $\alpha$  : koeficient útlumu vlákna
- $n$  : index lomu jádra vlákna
- $X_{1111}$ : susceptibilita nelinearity třetího řádu
- $\lambda$  : centrální vlnová délka:
- $c$  : rychlost světla ve vakuu
- $L_{eff}$  : efektivní délka vlákna dána v (2.12):

$$L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha \quad (2.12)$$

- $A_{eff}$  : efektivní plocha jádra
- $D$  : degenerační faktor ( $D=3$  pro  $i=j$ ,  $D=6$  pro  $i \neq j$ )
- $\eta$  : účinnost FWM definována jako (2.13):

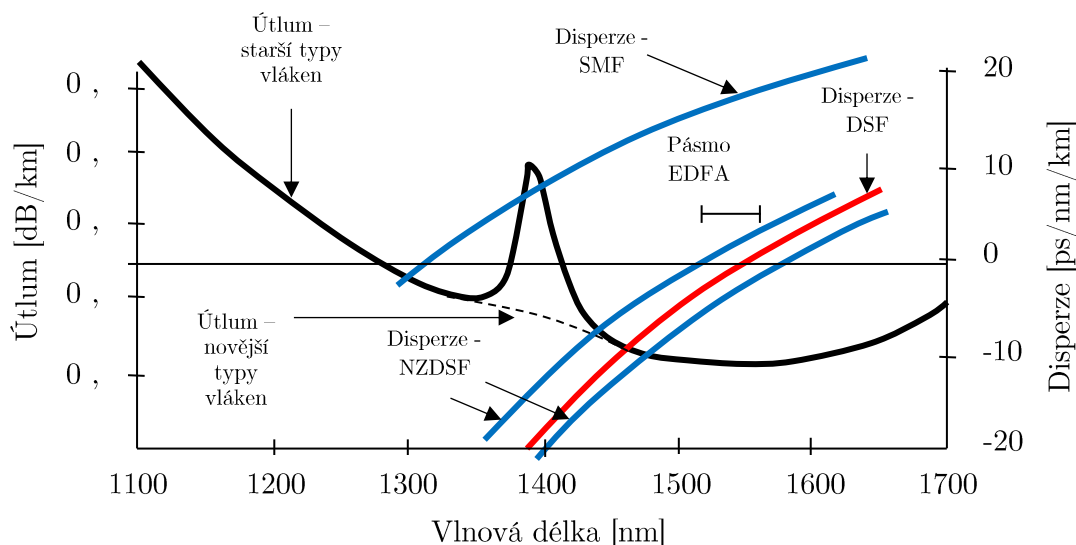
$$\eta = \frac{a^x}{a^x + \Delta \beta^2} \left[ 1 + \frac{4 e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta \beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \quad (2.13)$$

FWM způsobuje přeslechy a nežádoucí přenos energie mezi kanály, což se projevuje po splnění podmínky fázového souladu (když hodnota disperze se blíží nule). FWM je jev ovlivňující chybovost BER, což v důsledku ovlivňuje přenosovou rychlost, a je také závislý na odstupu jednotlivých kanálů, na hodnotě disperze a na výkonu optického záření. Pokud mají kanály systému konstantní rozestupy, vzniklé



intermodulační produkty mohou interferovat s původními kanály, což má za následek mezisymbolovou interferenci ISI, projevující se zvýšením chybovosti BER. V případě rozdílných rozestupů kanálů se produkty mohou nacházet i mimo původní kanály, což se projeví jako šum, potažmo snížením hodnoty OSNR (angl. Optical Signal to Noise Ratio).

Východiskem je například opět použití NZDSF vláken, která mají nenulovou hodnotu chromatické disperze, zvětšení či nerovnoměrné rozmístění rozestupů mezi kanály [21], snížení výkonu nebo použití jiných modulačních formátů [22]. Náhled na typy vláken je vidět na Obr. 2.2, který ukazuje vlastnosti vláken SMF podle G.652, DSF podle G.653 a NZDSF podle G.655.



Obr. 2.2 – Závislost měrného útlumu a disperze na vlnové délce různých druhů vláken.[10]

Co se týká délky optické trasy použité v simulaci, v případě 10Gb/s systémů se udává doporučená maximální délka optického vlákna 60 km. V případě 40Gb/s už je to kvůli nelineárním jevům jako SPM (angl. Self-phase Modulation), XPM (angl. Cross-phase Modulation), FWM, jen 4 km [12].

## 2.3 Optické modulace

Výzkumu optických přenosových systémů s hustým vlnovým multiplexem se dnes stále věnuje poměrně mnoho dokumentů. Je zřejmé, že využití SSMF vlákna dnes stále převažuje a bude tomu tak i do budoucna, neboť mnohavidová vlákna se v praxi většinou používají buď z historických důvodů, nebo z důvodů ekonomických (neboť cena za MM SFP je násobně menší, než za jeho SM variantu), zpravidla v data centrech apod. Srovnání různých modulačních formátů a jejich druhů bylo provedeno v souvislosti se systémy DWDM poměrně mnoho. Srovnání duobinární, RZ-DPSK, RZ-DQPSK modulace pro 40Gb/s systém s kanálovým rozestupem 50 GHz byl proveden v [23] a OOK, DPSK a DQPSK zde [24], přičemž nejpriznivějších výsledků dosáhla právě duobinární modulace. V [25] bylo experimentálně ověřeno, že použitím dikódové a duobinární modulace lze

v DWDM systému výrazně zredukovat výkonovou úroveň intermodulačních produktů FWM. Podobných výsledků se dostalo i při porovnání NRZ, RZ, CSRZ a duobinární modulace s ohledem na nestejněměrné kanálové rozestupy a různé velikosti výkonu laserů v sousedních kanálech [26]. Srovnání DP-QPSK, DP-QDB, DP-16QAM při použití DSP modulu pro kompenzaci chromatické disperze a nelinearit pro aktivní DWDM systém s kanálovým rozestupem 25 GHz, poukázalo na výhody použití kvadraturní duobinární varianty jak s ohledem na spektrální efektivitu, tak na odolnost proti nelinearitám [27]. Kromě srovnání NRZ-OOK, DB, NRZ-DBPSK, RZ-DQPSK modulací, i metodika pro výběr vhodné modulace je prošetřena v [28], ve prospěch poslední varianty zejména díky 50% navýšení překlenutelné vzdálenosti pro danou spektrální efektivitu. Pro systémy o rychlostech 100 Gb/s, a až 400 Gb/s byly porovnány modulace PDM-64QAM, PAM4 a DMT, přičemž DMT se ukázala jako nejefektivnější řešení zvláště z hlediska odolnosti proti chromatické disperzi [33]. V [29] byla srovnána schopnost modulací RZ-DPSK a CSRZ-DPSK potlačit disperzi a Kerrův jev, značně ve prospěch první z uvedených. Tolerance chromatické disperze se liší v závislosti na použitém systému či výrobci, přičemž studie 100Gb/s systémů je zpracována v [30].

## 2.4 Polarizace jako nástroj pro potlačení FWM

V předchozí kapitole byly některé modulační formáty založené na duální polarizaci a jejich společným znakem byla mimo jiné schopnost redukovat nelineární jevy ve vláknech. V [31] je popsána metoda pro potlačení jevu čtyřvlňného směšování, založená na DPDDMZ (angl. Dual Port Dual Drive Mach-Zehnder Modulator) modulátoru a na kruhové polarizaci CP (angl. Circular Polarization). DPDDMZ používá na vstupu dva elektrické modulační signály posunuté vůči sobě o  $90^\circ$  a jeden optický nosný signál. Samotné použití tohoto přístupu k modulaci dosahuje oproti MZ-CP modulaci zlepšení efektivity v potlačení jevu FWM a současně disponuje silnějším optickým signálem až o hodnotu 2 dB [30][31]. Další technika založená nikoliv na specifické modulaci, ale na polarizaci vybraných kanálů WDM systému, je prezentována v [32]. V tomto případě byl simulován WDM systém s šesti kanály s odstupem 100 GHz, a na různých výkonových úrovních vysílací části systému byl porovnán vliv  $90^\circ$  změny polarizace posledních tří kanálů, přičemž výsledky naznačují snížení výkonové úrovně FWM produktů.

## 2.5 Metodika

Společnost RSoft vyvinula program OptSim za účelem návrhu a simulace optických komunikačních systémů především v souvislosti s fyzickou vrstvou. Změnou parametrů navrženého modelu v simulaci lze získat představu o vlivu daného parametru na přenosové vlastnosti systému a odhalit tak případné nedostatky v návrhu. Program pracuje ve dvou módech – sample a block. Sample mód dělí data procházející simulací na jednotlivé vzorky, které složí celou simulaci.

Block mód prezentuje simulační signály jako celý blok celkového simulačního času. Pro simulaci je využit plně časový režim Variable Bandwidth Simulation (VBS), schopný simulovat reálné jevy jako šum atd. Optsim využívá k řešení nelineárních, částečně rozdílých rovnic metodu TDSS (angl. Time Domain Split-step), tedy pseudo-spektrální číselnou metodu, založenou na Fourierově transformaci, která provádí výpočty pro lineární (zde frekvenční oblast výpočtu) a nelineární (zde časová oblast výpočtu) rovnice po krocích a odděleně.

## 2.5.1 BER

Chybovost umožňuje kvalitativně srovnat více systémů či kanálů mezi sebou. Je definována jako (2.14).

$$BER \approx \frac{N_e}{N_b} \quad (2.14)$$

kde  $N_e$  je počet chybně vyhodnocených bitů a  $N_b$  počet všech přenesených bitů. V simulačním prostředí je chybovost BER počítaná na základě Gaussova rozdělení pro funkci hustoty pravděpodobnosti přijímaného signálu podle (2.15).

$$BER = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{m_1 - V_{th}}{\sqrt{2} \sigma_1} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{V_{th} - m_0}{\sqrt{2} \sigma_0} \right) \right] \quad (2.15)$$

kde  $V_{th}$  je práh rozhodnutí mezi „0“ a „1“ a  $\operatorname{erfc}$  je komplementární chybová funkce [19].

## 2.5.2 Detekční oko

Oko rozhodnutí (angl. Eye-diagram) slouží k analýze chybovosti. Lze jej chápat jako plochu, která je vymezena v uvažovaném jednotkovém intervalu posloupností všech možných kombinací korigovaných signálových prvků. Je pro něj definována rozhodovací úroveň, přičemž, pokud rušení v kanálu přesáhne kritickou hranici, dojde k chybnému vyhodnocení symbolu, a tedy vzniku chyby. Rezerva pro rozhodnutí je maximálně polovina výšky oka a snižuje se se zvyšující se mírou rušení a chybnou časovou polohou prvku. Z diagramu oka rozhodnutí se odvozují parametry střední hodnoty a rozptyl hodnot vyhodnocovaných symbolů  $\mu_{0,1}$  a  $\sigma_{0,1}$ . Z těchto hodnot se počítá Q-faktor podle rovnice (2.16).

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.16)$$

potažmo OSNR (angl. Optical Signal to Noise Ratio) v (2.17).

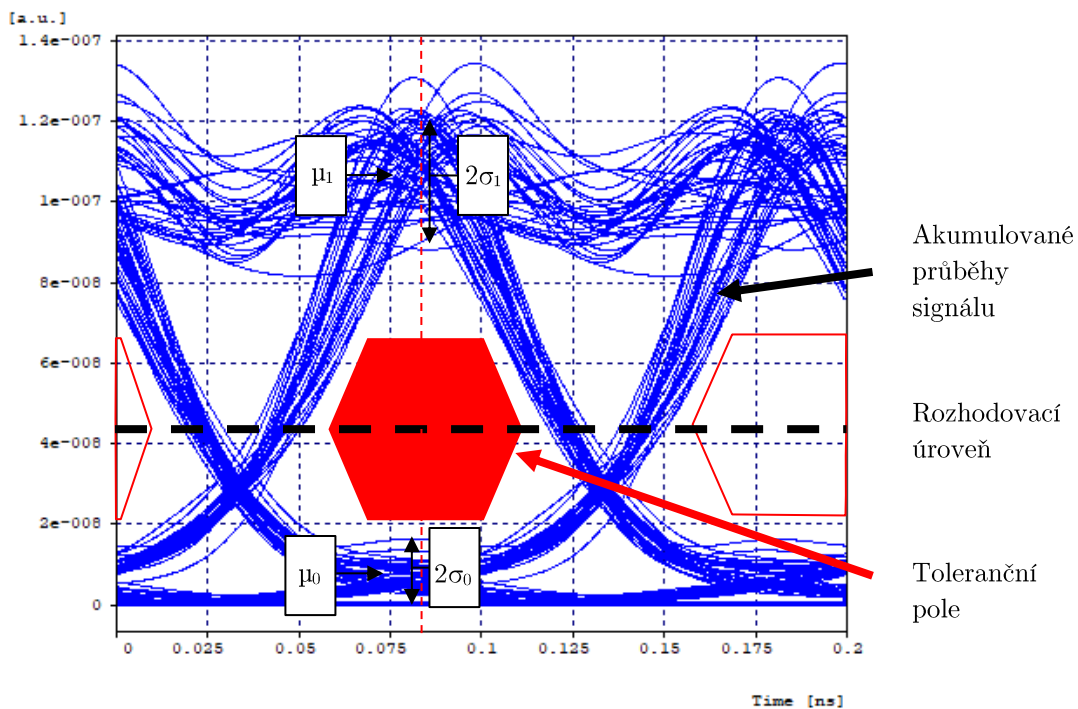
$$OSNR = 20 \log(Q) \quad (2.17)$$

Q-faktor je využit pro vyhodnocení některých simulací. K tomu slouží modul *Electrical Scope*, který umí zobrazit diagram oka rozhodnutí, průběh

amplitudy elektrického signálu, nebo histogram optimálních okamžiků vzorkování nebo výkonové spektrum elektrického signálu. Odstup optického signálu od šumu je vyjádření poměru střední hodnoty výkonu užitečného signálu  $S$  a střední hodnoty výkonu šumu  $N$  v optickém kanálu, udávaný v dB, a je definován jako (2.18).

$$OSNR = 10dB \cdot \log_{10}\left(\frac{S}{N}\right) \quad (2.18)$$

Výpočet je proveden v simulačním prostředí pomocí (2.17).



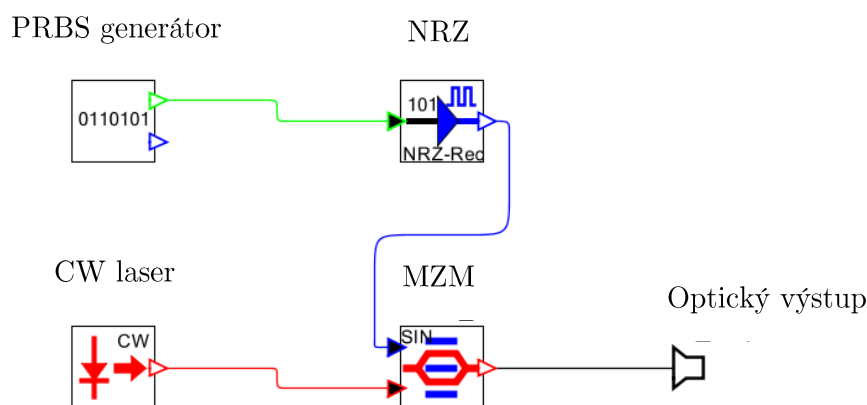
Obr. 2.3 – Toleranční maska detekční oblasti diagramu oka rozhodnutí. Parametr  $\mu_{0,1}$  představuje střední hodnotu vyhodnocovaných symbolů 0, poťážmo 1 a  $\sigma_{0,1}$  představuje rozptyl hodnot vyhodnocovaných symbolů 0 a 1.

## 3 Simulace

### 3.1 Simulace kompenzace chromatické disperze

#### 3.1.1 Pre-, post- a symetrická kompenzace

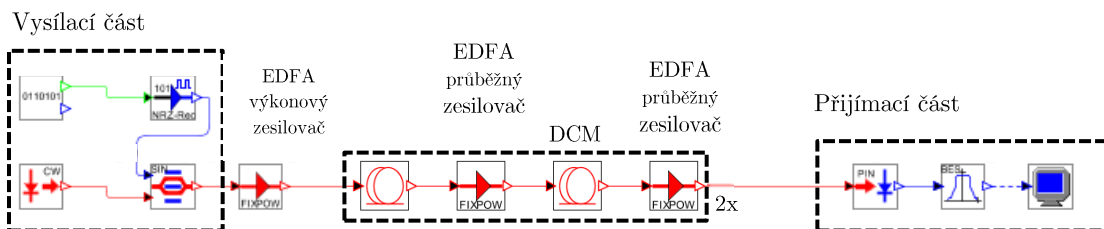
V této části je simulováno srovnání tří metod pro kompenzaci chromatické disperze pomocí DCM modulu na bázi DCF nebo BGF – pre-kompenzace, post-kompenzace a symetrické kompenzace a to pro dva optické přenosové systémy. Vyhodnocení výsledků simulace je provedeno na základě hodnoty chybovosti BER, jejíž prahová hodnota je určena podle [19] jako  $BER_{\text{Threshold}} = 10^{-10}$ . K této hodnotě je třeba uvést, že názory na ni se různí, neboť pro systémy s přenosovými rychlostmi pod 10 Gb/s je někdy uvedena jako prahová hodnota chybovosti BER v řádech  $10^{-12}$ . K simulaci je využit jednokanálový aktivní optický přenosový systém, a 32kanálový systém vycházející z WDM (angl. Wavelength Division Multiplex), jehož fyzický dosah je v simulaci prodloužen nad standardních 20 km, až na 200 km. Pro oba systémy jsou použity vysílací a přijímací části se stejnými vlastnostmi a stavbou. Obr. 3.1 ukazuje stavbu vysílací části, OLT (angl. Optical Line Termination), která se skládá z generátoru pseudonáhodné bitové posloupnosti PRBS (angl. Pseudo-random Bit Sequence), NRZ (angl. Non-return-to-Zero) ovladače, CW (angl. Continuous Wavelength) laseru a externího Mach-Zehnderova modulátoru. Vstupní tok pseudonáhodných dat je kódován externí NRZ o bitové rychlosti 10 Gb/s .



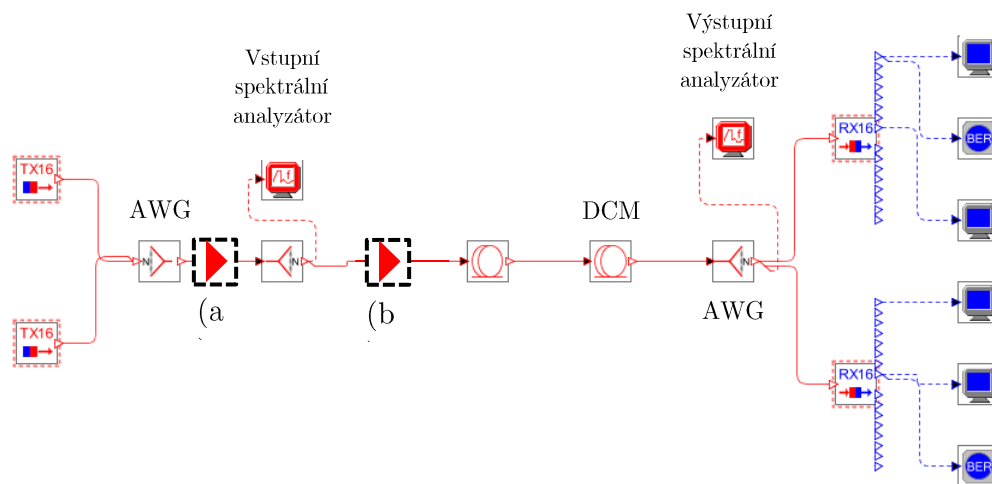
Obr. 3.1 – Schéma vysílací části na straně OLT – PRBS generátor, NRZ ovladač, CW laser a Mach-Zehnderův modulátor.

Pro navázání jednotlivých kanálů je v případě systému, založeného na WDM, použit AWG (angl. Arrayed Waveguide Grating) multiplexor se simulovaným útlumem 3 dB. Následně je signál opticky zesílen zesilovačem, za účelem kompenzace vstupního útlumu multiplexoru, útlumu zesilovače a útlumu kompenzačního modulu a navázán do smyčky optického vlákna NZDSF podle ITU-T G.655, které má, oproti běžnému jednovidovému vláknu SMF, posunutou

hodnotu koeficientu chromatické disperze. Pro zjištění vlivu výkonového zesilovače na výslednou hodnotu BER pro každý typ kompenzace, je pro srovnání výkonový zesilovač vyměněn za jeden průběžný zesilovač. V simulaci je použita hodnota koeficientu chromatické disperze vlákna  $4 \text{ ps/nm/km}$  pro systém na bázi WDM s délkou optického vlákna  $200 \text{ km}$  a  $16 \text{ ps/nm/km}$  pro jednokanálový systém s délkou vlákna  $120 \text{ km}$ . Obr. 3.2 ukazuje jednokanálový systém a na Obr. 3.3 je znázorněn simulovaný systém na bázi WDM s prodlouženým fyzickým dosahem pro zjištění potenciálních hranic výkonnosti systému. Na obou systémech je simulována pre-, post-, a symetrická kompenzace.

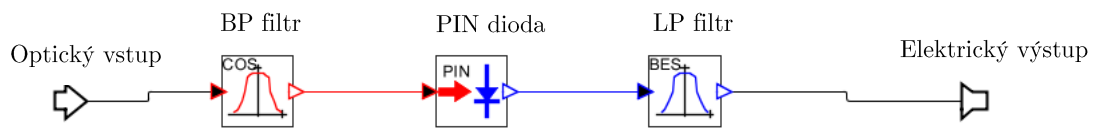


Obr. 3.2 – Schéma jednokanálového systému s výkonovým optickým zesilovačem. Před hlavním úsekem vlákna je použit EDFA průběžný zesilovač, SMF vlákno podle ITU-T G.652 délky  $120 \text{ km}$ , a podle konkrétního typu kompenzace, kompenzační DCM modul před hlavním úsekem vlákna nebo za ním.



Obr. 3.3 – Schéma 32kanálového systému, vycházejícího z WDM, s výkonovým či průběžným zesilovačem, NZDSF vláknem podle ITU-T G.654 s koeficientem chromatické disperze  $4 \text{ ps/nm/km}$  délky  $200 \text{ km}$ . Podle konkrétního typu kompenzace, se DCM modul nachází buď před hlavním úsekem vlákna, na obou koncích nebo za ním.

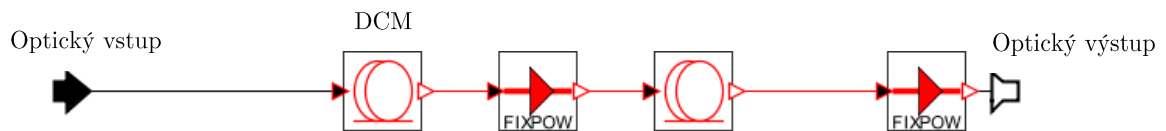
Na straně ONU/ONT přijímače, jehož stavba je na Obr. 3.4, je použita PIN (angl. Positive-intrinsic-negative) dioda a Besselův filtr typu dolní propust s pěti póly a šířkou pásma na  $-3\text{dB}$  výkonové úrovni  $8 \text{ GHz}$ .



Obr. 3.4 – Schéma přijímací části na straně ONU/ONT – filtr Raised-Cosine pásmová propust v optické oblasti, PIN dioda, Besselův filtr v elektrické oblasti.

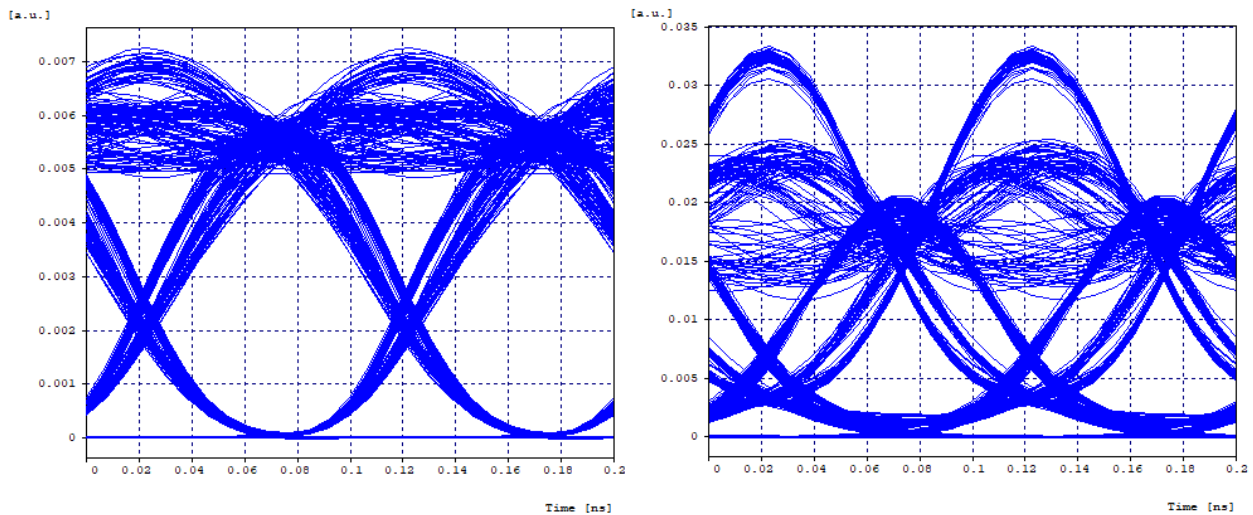
### 3.1.2 Kompenzace v aktivní optické síti AON

Simulace pre-kompenzace na jednocanálovém aktivním optickém systému s několika zesilovači na optické trase, se skládá z vysílací a přijímací části, přičemž mezi nimi se nachází dvakrát blok s 24km úsekem kompenzujícího vlákna s hodnotou  $D = -80$  ps/nm/km s průběžným zesilovačem EDFA, a poté s 120km úsekem vlákna, taktéž s průběžným zesilovačem EDFA. Vnitřní stavbu tohoto bloku přibližuje Obr. 3.5. V simulaci jsou uvaženy dvě různé výkonové úrovně průběžných zesilovačů, a sice 5 dBm, a poté s 10 dBm.



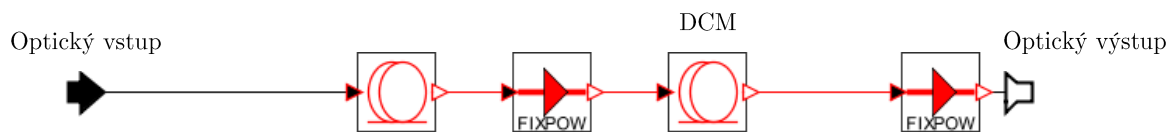
Obr. 3.5 – Schéma bloku vláken pro simulaci pre-kompenzace. 24km DCM vlákno s průběžným zesilovačem následované hlavním úsekem 120km vlákna taktéž s průběžným zesilovačem. Blok je v simulaci použit dvakrát za sebou.

Výsledky simulace jsou patrné na Obr. 3.6 a srovnání všech výsledků kompletně zobrazuje Tab. 3.1 níže. Je vidět, že pro 10dBm výkonovou úroveň průběžných zesilovačů došlo ke zhoršení hodnoty BER. Proto by v praxi bylo třeba každý systém odladit a nastavit hodnoty čerpání zesilovačů optimálně pro daný systém.



Obr. 3.6 – Výsledný diagram oka pro pre-kompensaci disperze pro výkonovou zesilovací úroveň 5dBm (vlevo) a pro 10dBm (vpravo).

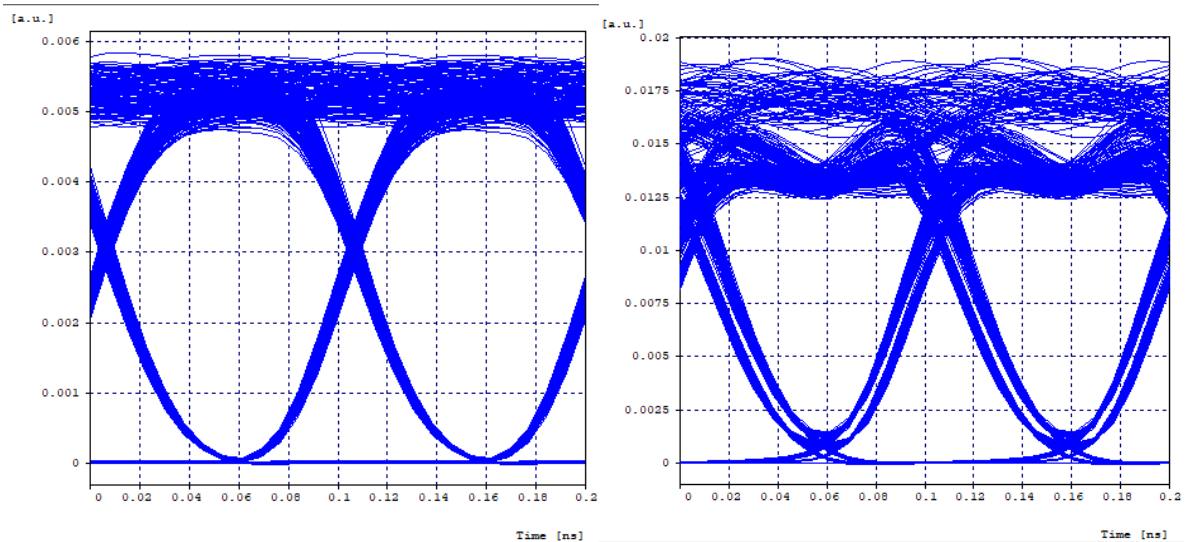
Post-kompensace má uvnitř smyčky nejdříve 120km úsek vlákna s průběžným zesilovačem EDFA, a poté 24km úsek kompenzujícího vlákna s hodnotou  $D = -80$  ps/nm/km s průběžným zesilovačem EDFA jako na Obr. 3.7.



Obr. 3.7 – Schéma bloku vláken pro simulaci post-kompensace. Hlavní 120km úsek vlákna s průběžným zesilovačem, následovaný DCM modulem s 24km kompenzujícím vláknem, též s průběžným zesilovačem. Blok je v simulaci opět použit dvakrát za sebou.

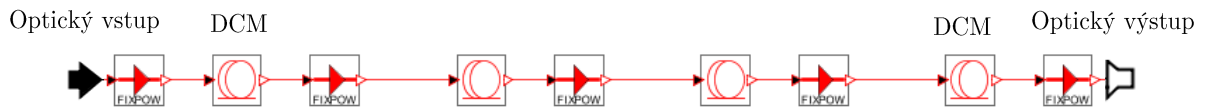
Výsledky simulace zobrazuje Obr. 3.8. Pro 10dBm výkonovou úroveň průběžných zesilovačů opět došlo ke zhoršení hodnoty BER téměř o 30 řádů, ale i tak nepřekročila stanovený práh pro potenciální DWDM systém. Lze tedy předpokládat, že první dva přístupy jsou náročné na optimalizaci nastavení výkonů zesilovačů.





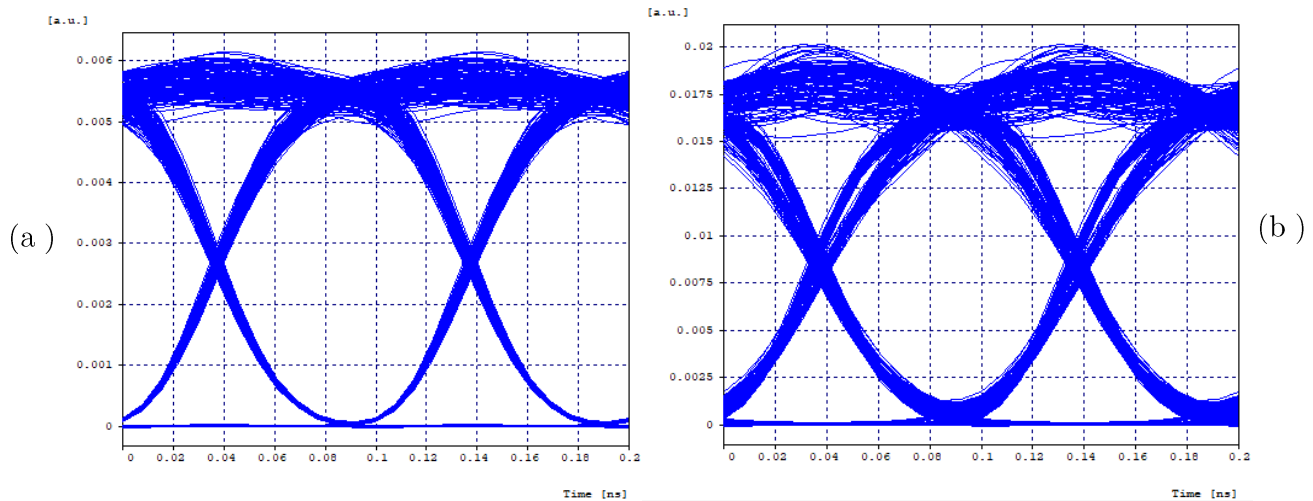
Obr. 3.8 – Výsledný diagram oka pro post-kompensaci disperze pro výkonovou zesilovací úroveň 5dBm (vlevo) a pro 10dBm (vpravo). Při navýšení výkonové úrovně došlo ke snížení oblasti oka rozhodnutí, potažmo chybovosti, na hodnoty blízké se stanovené hranici pro akceptovatelný BER.

Symetrická kompenzace kombinuje oba předchozí případy. Tedy nejdříve je úsek 24km vlákna s průběžným zesilovačem, poté 120km úsek s průběžným zesilovačem a následuje totéž v opačném pořadí jako na Obr. 3.9.



Obr. 3.9 – Schéma bloku pro simulaci symetrické kompenzace. Začátek a konec je tvořen DCM moduly s průběžnými zesilovači a uprostřed je připojen dvakrát hlavní 120km úsek vlákna s průběžnými zesilovači. Blok je v simulaci použit pouze jednou.

U symetrické kompenzace se ukázalo, že zvýšení výkonu se téměř neprojevovalo ani na diagramu oka rozhodnutí, a tedy ani na chybovosti BER. Pro zajímavost bylo provedeno ještě třetí měření, které navýšilo výkon na 12 dBm, kde se chybovost zvýšila, ještě však byla únosná v rámci stanovených mezí.



Obr. 3.10 – Výsledný diagram oka pro symetrickou kompenzaci disperze pro zesilovací výkon a ) 5dBm a pro b ) 10dBm. Tato kompenzace nevyžaduje nalezení optimálního nastavení výkonových úrovní zesilovačů.

Tab. 3.1 – Přehled hodnot chybovosti BER pro různé přístupy kompenzace pro jednokanálový AON systém. Nejlepších výsledků dosahuje jednoznačně symetrická kompenzace.

Typ kompenzace	BER (5dBm)	BER (10dBm)	BER (12dBm)
Pre	$3,89 \cdot 10^{-40}$	$1,64 \cdot 10^{-10}$	-
Post	$1,79 \cdot 10^{-40}$	$1,17 \cdot 10^{-11}$	-
Symetrická	$1,041 \cdot 10^{-40}$	$1,013 \cdot 10^{-40}$	$1,098 \cdot 10^{-16}$

Výsledky pro simulované druhy kompenzace jsou uvedeny v Tab. 3.1. Jasně z ní vyplývá, že symetrická kompenzace je, na rozdíl od předchozích variant, schopna dosáhnout vysoké efektivity přenosu i pro vyšší hodnoty výkonových úrovní zesilovačů. V praxi se dnes na interkontinentální úrovni, pro trasy běžně dosahující i 5 000 km, používají 100-150km bloky s DCM moduly odpovídající délky a průběžnými zesilovači (EDFA zesilovače, ale také Ramanův zesilovač). Symetrická kompenzace by takto mohla napomoci ke zjednodušení realizace těchto tras z pohledu nastavení zesilovačů.

### 3.1.3 Kompenzace v pasivní optické síti na bázi WDM

V simulacích lze pozorovat tři různé přístupy ke kompenzaci chromatické disperze pomocí jak DCM modulu s vláknem DCF, tak vláknem BGF. Tato část se zaměřuje na optický DWDM systém se 32 kanály s jen jedním zesilovačem (buď průběžným, nebo výkonovým, simulace jsou provedeny pro oba případy), k přivedení datových toků do koncových bodů je použit systém na bázi PON, avšak celková překlenutelná vzdálenost simulovaného systému přesahuje hranici 20 km podle standardu, s cílem najít případnou hranici fyzického dosahu pro 200km systém. Simulace uvažuje dvě hodnoty zisků zesilovače, a sice 10 dB a 15 dB.

Vysílací a přijímací část je totožná jako v předchozí kapitole. Rozdíl je v typu použitého vlákna, neboť zde je použito NZDSF o délce 200 km. Odstup jednotlivých kanálů je 50 GHz a centrální nosná frekvence systému je 193,45 THz, přičemž výkonová úroveň laserů ve vysílací části OLT je podle nastavena na 0 dBm. V klasické PON síti se pro rozdělení optických tras používají optické rozbočovače, jejichž vložný útlum roste s rozbočovacím poměrem. V případě simulovaného řešení je použita směrová odbočnice, která vyděluje jednotlivé vlnové délky na principu AWG. Oproti optickému rozbočovači se vložný útlum AWG odbočnice pohybuje okolo 5 dB nezávisle na počtu kanálů (optický rozbočovač s rozbočovacím poměrem 1 :32 má typicky vložný útlum 17,3 dB). Následující tabulky shrnují dosažené výsledky, kdy nejnižší hodnoty chybovosti jsou pro přehlednost zvýrazněny modrou barvou, naopak nejvyšší červenou. *Tab. 3.2* odpovídá použití jednoho výkonového optického zesilovače a *Tab. 3.3* naopak jednoho průběžného optického zesilovače. Ukázalo se, že výhody mezi použitím DCM modulu na bázi BGF nebo DCF jsou závislé na použití výkonových či průběžných zesilovačů. Například pro systém s výkonovým zesilovačem se osvědčila prekompenzace s DCF modulem, naopak za použití průběžného zesilovače se více hodí DCM modul na bázi BGF v postkompenzačním zapojení.

*Tab. 3.2 – Přehled hodnot chybovosti BER pro různé přístupy kompenzace pro systém, vycházející z WDM s výkonovým zesilovačem.*

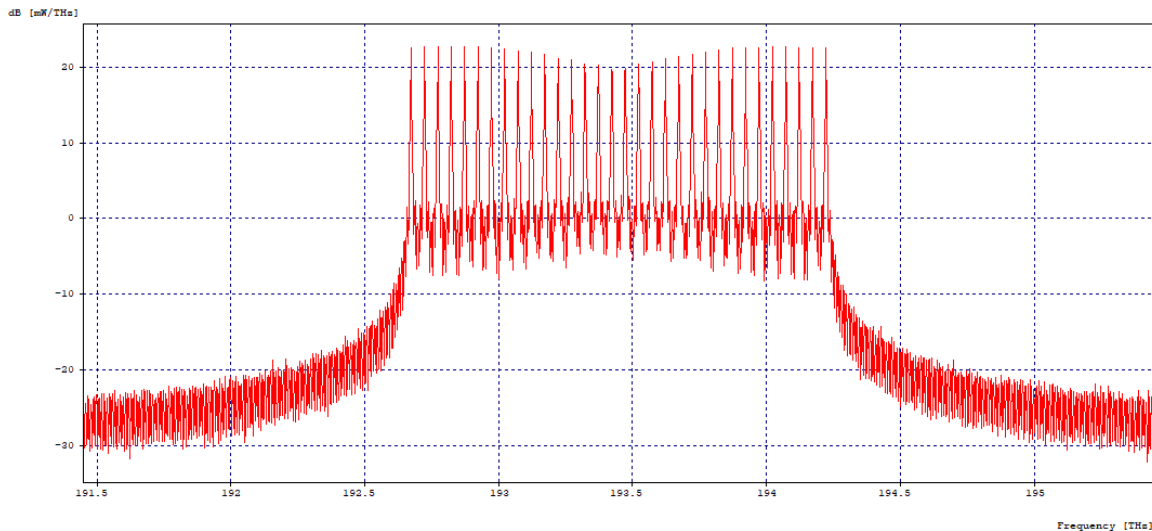
Typ kompenzace	Typ DCM	BER (10 dB)	BER (15 dB)
Bez kompenzace	-	$2,30 \cdot 10^{-10}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$
Pre	DCF	$1,27 \cdot 10^{-36}$	$9,03 \cdot 10^{-19}$
	BGF	$8,78 \cdot 10^{-26}$	$2,75 \cdot 10^{-14}$
Post	DCF	$7,26 \cdot 10^{-27}$	$1,30 \cdot 10^{-17}$
	BGF	$2,76 \cdot 10^{-30}$	$7,13 \cdot 10^{-19}$
Symetrická	DCF	$2,57 \cdot 10^{-36}$	$2,02 \cdot 10^{-19}$
	BGF	$4,32 \cdot 10^{-26}$	$1,17 \cdot 10^{-13}$

*Tab. 3.3 – Přehled hodnot chybovosti BER pro různé přístupy kompenzace pro systém, vycházející z WDM s průběžným zesilovačem.*

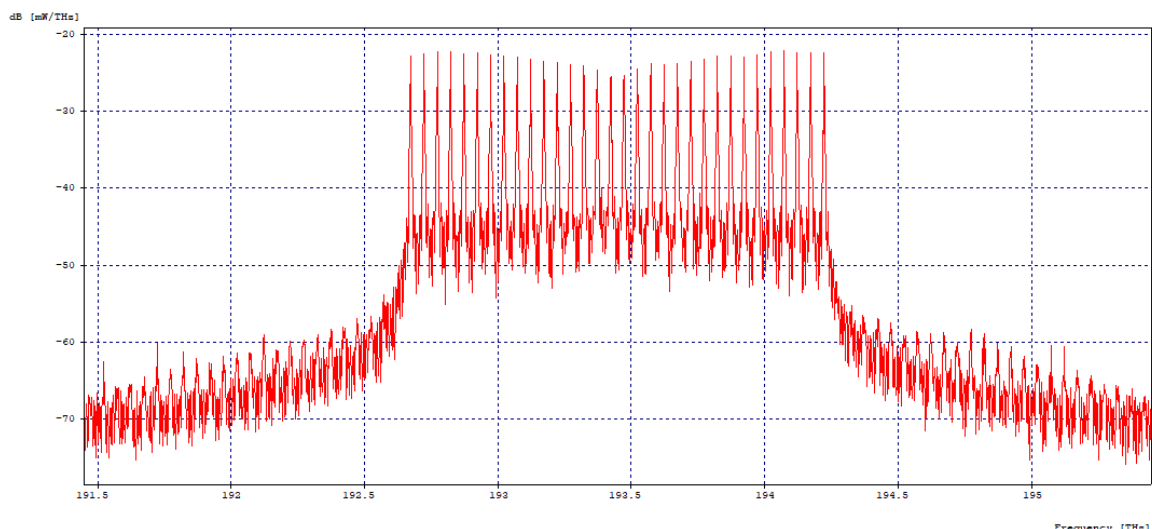
Typ kompenzace	Typ DCM	BER (10 dB)	BER (15 dB)
Bez kompenzace	-	$5,12 \cdot 10^{-12}$	$5,83 \cdot 10^{-12}$
Pre	DCF	$1,28 \cdot 10^{-27}$	$1,29 \cdot 10^{-26}$
	BGF	$5,16 \cdot 10^{-31}$	$2,06 \cdot 10^{-30}$
Post	DCF	$7,14 \cdot 10^{-26}$	$1,09 \cdot 10^{-24}$
	BGF	$4,57 \cdot 10^{-37}$	$2,01 \cdot 10^{-34}$
Symetrická	DCF	$7,54 \cdot 10^{-27}$	$1,73 \cdot 10^{-27}$
	BGF	$4,74 \cdot 10^{-32}$	$5,02 \cdot 10^{-30}$

Na obrázku níže je zobrazeno vstupní spektrum signálu bez kompenzace chromatické disperze. Pod ním, na *Obr. 3.12*, je vidět výstupní spektrum po průchodu 200km úsekem vlákna bez kompenzace, kde je mimo jiné patrný vliv efektu FWM, avšak díky použití NZDSF vlákna a 50GHz rozestupu kanálů, je

výkon intermodulačních produktů minimální a BER se pohybuje v rámci přípustných hodnot.



Obr. 3.11 – Vstupní spektrum optického signálu systému na bázi WDM s 32 kanály s 50GHz odstupem, bez kompenzace.

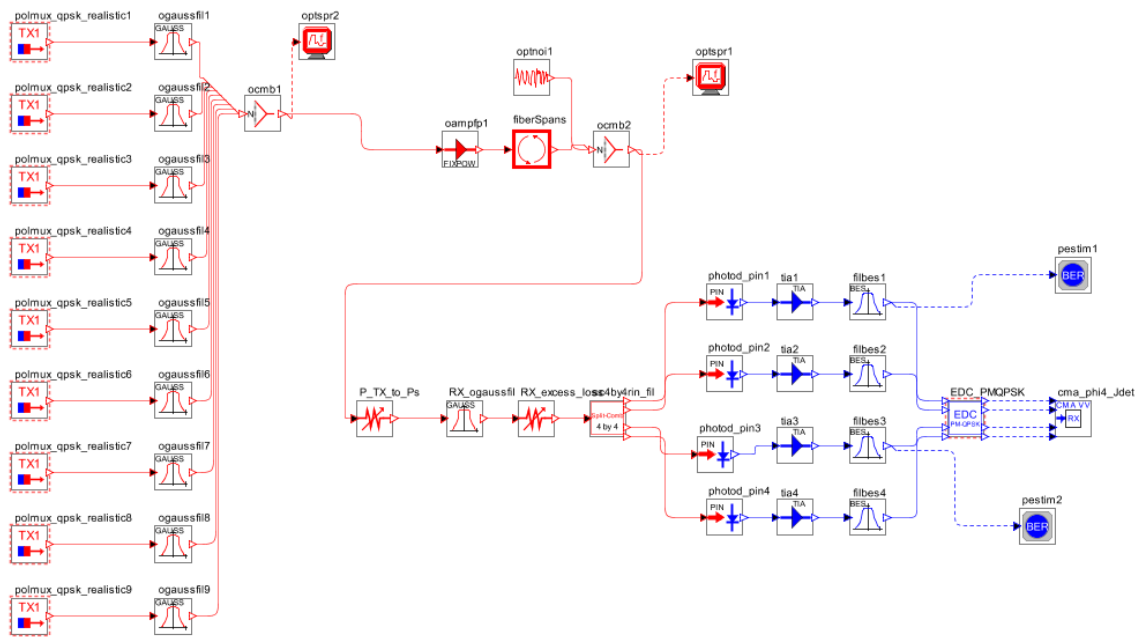


Obr. 3.12 – Výstupní spektrum optického signálu systému na bázi WDM s 32 kanály s 50GHz odstupem. Vlákno délky 200 km je kompenzováno DCM modulem s BGF. Vliv nelineárního efektu FWM je patrný po stranách spektra.

## 3.2 Simulace vysokorychlostního WDM systému

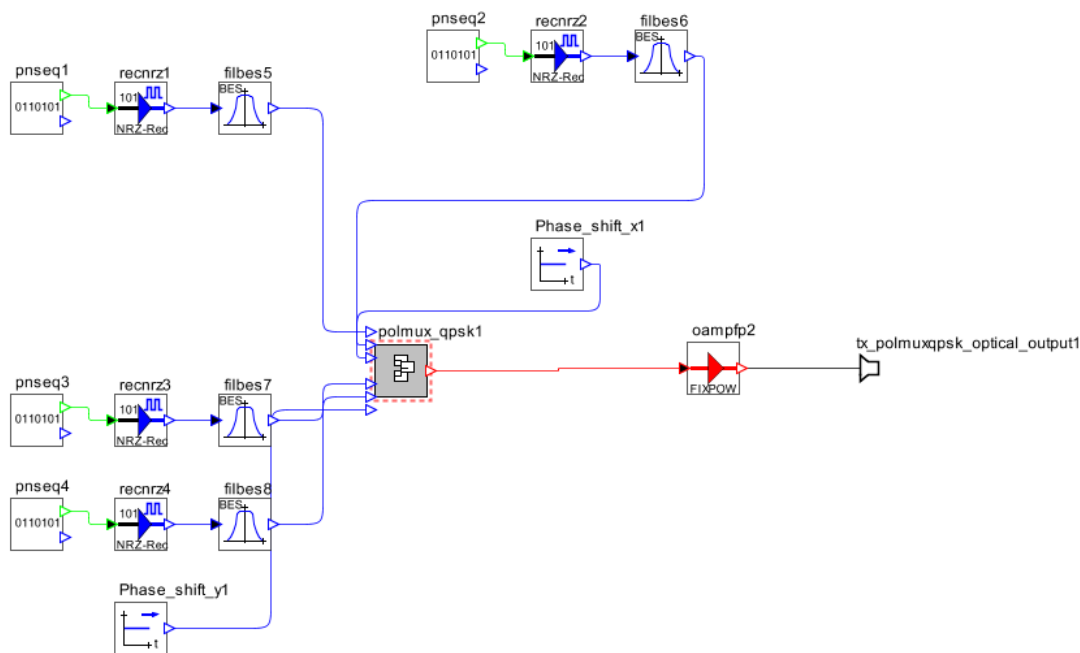
Pro vysokorychlostní přenosové systémy lze na dnes na trhu najít modulární WDM řešení s 100Gb/s nebo až 400Gb/s transceivery a kapacitou přenosové rychlosti až 3,2 Tb/s /RU (angl. Rack Unit)[36]. Realizace systému s takovými rychlostmi je ale možná i kombinací složitějších modulačních formátů, koherentních vysílačů a polarizačního multiplexování PM (angl. Polarization

Multiplexing). V této části je simulován systém založený na PM-QPSK modulaci. Náhled simulovaného systému je na obrázku níže.

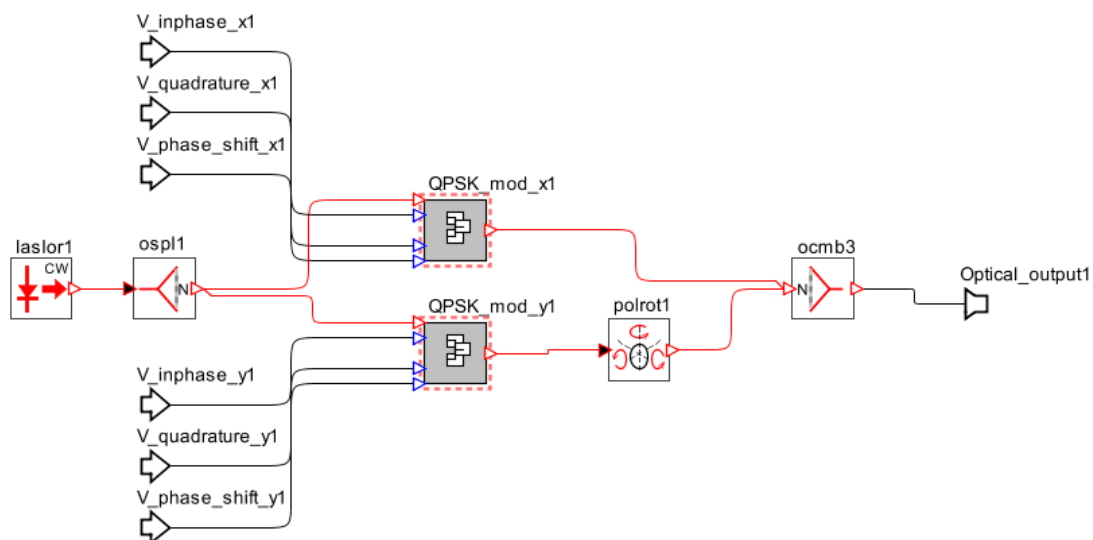


Obr. 3.13 – Schéma pro simulaci WDM systému s využitím PM-QPSK.

Vysílací části pro kanály na jednotlivých vlnových délkách obsahují pro každý kanál čtyři generátory pseudonáhodné bitové posloupnosti PRBS, které se multiplexují v bloku polarizačního multiplexoru, kde probíhá kvadrurní fázová modulace a rotace polarizace o  $180^\circ$ . Tyto datové toky reprezentované elektrickými signály jsou tedy modulovány do jednoho optického signálu. Schéma vysílací části je podrobně vyobrazeno níže na Obr. 3.14 a Obr. 3.15.



Obr. 3.14 – Schéma vysílací části. Čtyři fázově posunuté datové toky, jejichž polarizace je v optické oblasti rotována o 180°. Vše probíhá v bloku „polmux\_qpsk1“.



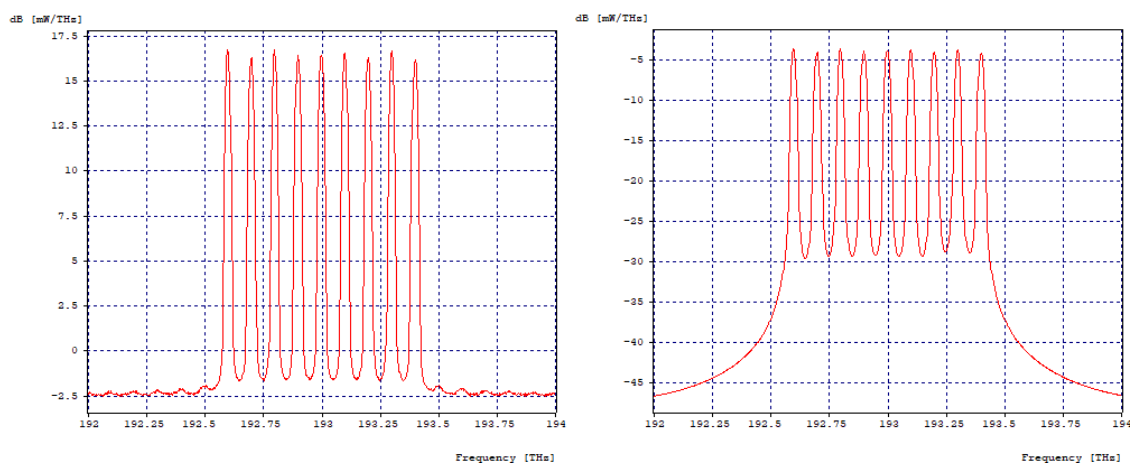
Obr. 3.15 – Schéma bloku pro část operace pro modulaci QPSK a multiplexaci odlišně polarizovaných optických signálů „polmux\_qpsk1“ ve vysílací části.

Na přijímací straně je třeba použít demodulátor schopný rozlišit v přijímaném optickém signálu jednotlivé datové toky, reprezentované různými polarizacemi a fázemi jednoho optického signálu, čehož je dosaženo díky DSP (angl. Digital Signal Processing) jednotce, která převede optický signál na signály elektrické pro každou polarizaci a fázi, a kromě toho je schopna kompenzovat systém stran chromatické disperze.

V simulovaném modelu je použito devět PM-QPSK vysílačů, každý o čtyřech datových tocích, o rychlosti 27,9 Gb/s každý (zahrnuta režie pro

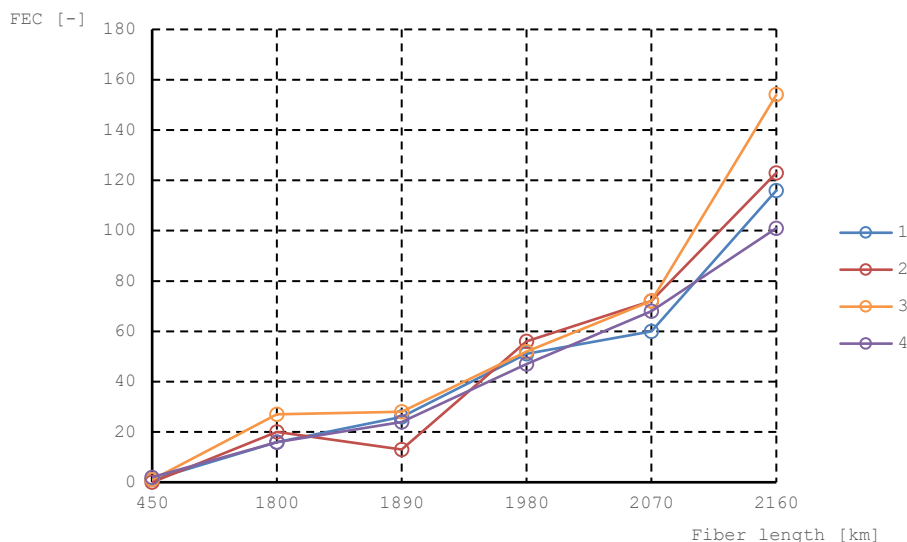
potřeby dopředné korekce chyb FEC, angl. Forward-Error Correction). Vstupní a výstupní spektrum systému lze vidět na *Obr. 3.16*.

Optický signál je poté multiplexován do jednoho úseku vlákna DSF podle ITU-T G.653 ve 20 - 24 blocích obsahujících vlákno délky 90 km bez kompenzace chromatické disperze, opticky zesíleným průběžným zesilovačem v každém bloku. Signál je dále demultiplexován na původních 9 kanálů a každý z nich dále opticky rozbočen na čtyři různé optické signály podle polarizace a fáze pomocí rozbočovače integrovaného v DSP jednotce (v simulaci realizovaným filtrem typu pásmová propust a modulem Rozbočovač/Slučovač 4x4) pro příjem původních datových toků a přijímán pomocí čtyř fotodiod. Následuje DSP blok s EDC funkcí (angl. Electronic Dispersion Compensation) pro kompenzaci chromatické disperze a konečně DCP blok pro polarizační demultiplexaci pomocí algoritmu CMA (angl. Constant Modulus Algorithm) a pro odhad fáze s výpočtem chyb pomocí VV dekodéru (Viterbi-Viterbi).

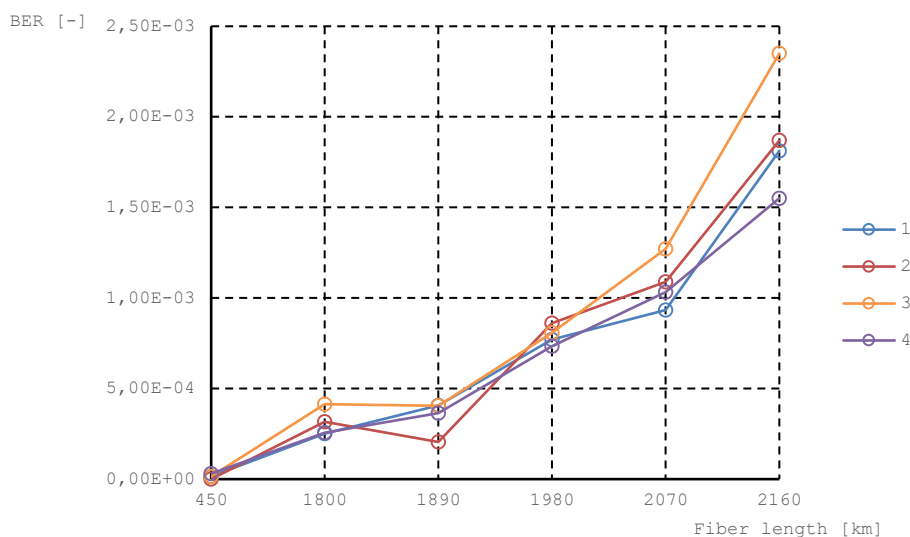


*Obr. 3.16 – Vstupní a výstupní spektrum signálu pro vysokorychlostní WDM systém.*

Vyhodnocení chybovosti BER je provedeno v rámci jedné vlnové délky pro každý ze čtyř přijatých datových toků (tedy pro jeden z devíti původních kanálů, konkrétně kanál č. 5). DSP blok CMA v přijímací části počítá počet chyb FEC jako funkci měrného útlumu vlákna. Na grafech níže je vidět, že pro vzdálenosti do 450 km je chybovost zanedbatelná, ve vzdálenosti 1000 km dosahuje pak stanovené prahové hodnoty. Pro 1 890km trasu se hodnoty chybovosti pohybují v řádech  $10^{-4}$ , pro vzdálenosti nad 2 000 km však chybovost roste na hodnoty v řádu  $10^{-3}$ , což již nevyhovuje stanovené hranici chybovosti.



Obr. 3.17 – Graf počtu chyb FEC, vypočtených v DSP bloku CMA, v závislosti na délce vlákna pro datové toky 1 -4 v kanále č . 5 .



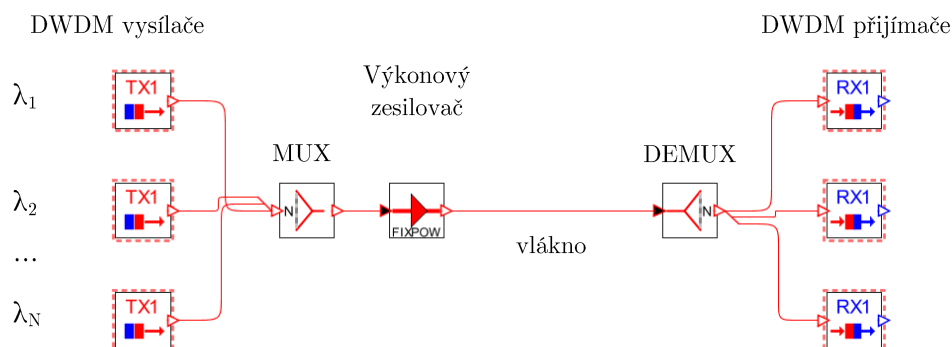
Obr. 3.18 – Graf chybovosti BER, vypočtené v DSP bloku CMA, v závislosti na délce vlákna pro datové toky 1 -4 v kanále č . 5 .

Tento přístup pro realizaci vysokorychlostních optických přenosových systémů by mohl zjednodušit přechod na optické přenosové systémy s vyšší spektrální efektivitou, tedy například z 10Gb/s systémů na 40Gb/s a 100Gb/s bez nutnosti razantní změny v architektuře sítí. Absence kompenzačních DCM modulů a vysílačů a přijímačů se složitou stavbou je nespornou výhodou těchto systémů, používajících pokročilých modulačních formátů v kombinaci s koherentními přijímači s DSP jednotkami, jež jsou schopny převzít široké portfolio úkolů.



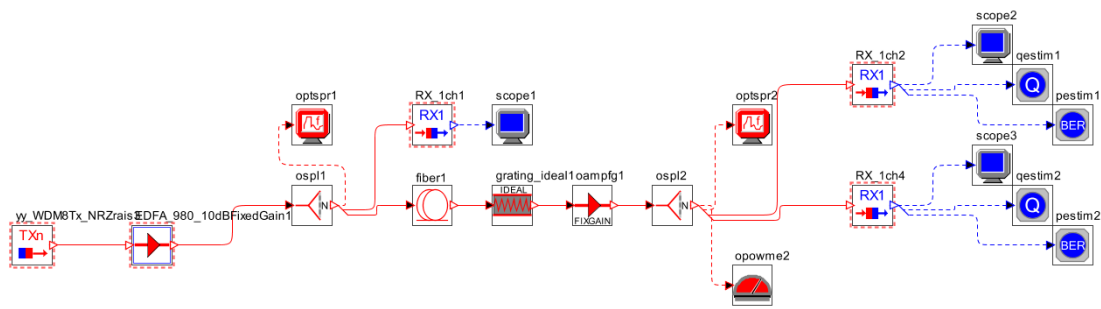
### 3.3 Simulace vlivu FWM v DWDM

Pro demonstraci jevu čtyřvlenného směšování je použita technologie DWDM, jehož schematický model je vidět níže. Na základě modelu byla sestavena topologie pro simulaci v programu Optsim.



Obr. 3.19 – Schéma modelu systému pro simulaci.

K simulaci je využit model optického přenosového systému WDM s 8 kanály, vstupní toky pseudonáhodných dat jsou modulovány externí NRZ modulací o bitové rychlosti 10 Gb/s pro každý kanál. Rozestupy mezi kanály korespondují s doporučením ITU-T G.694, v simulaci jsou kanály rovnoměrně rozloženy po 12,5 GHz a v další simulaci pak po 25, 50 a 100 GHz. První kanál náleží frekvenci 193,1 GHz, od něj se pak odvíjí v zadaných rozestupech dalších 7 kanálů. Data jsou po modulaci multiplexována a k zesílení před vstupem do optického vlákna dochází prostřednictvím optického zesilovače. Následuje 100km úsek optického vlákna s optickou mřížkou pro kompenzaci vlivu chromatické disperze a optický zesilovač. Po demultiplexaci optického signálu je signál filtrován podle daného kanálu, PIN fotodiodou převeden z optické do elektrické oblasti a vyhodnocení probíhá ve spektrálním analyzátoru (který je pro účely referenčních měření umístěn ještě na dalších místech v modelu) a elektrickém analyzátoru, ze kterého zjišťujeme diagram oka rozhodnutí, BER, a Q-faktor.

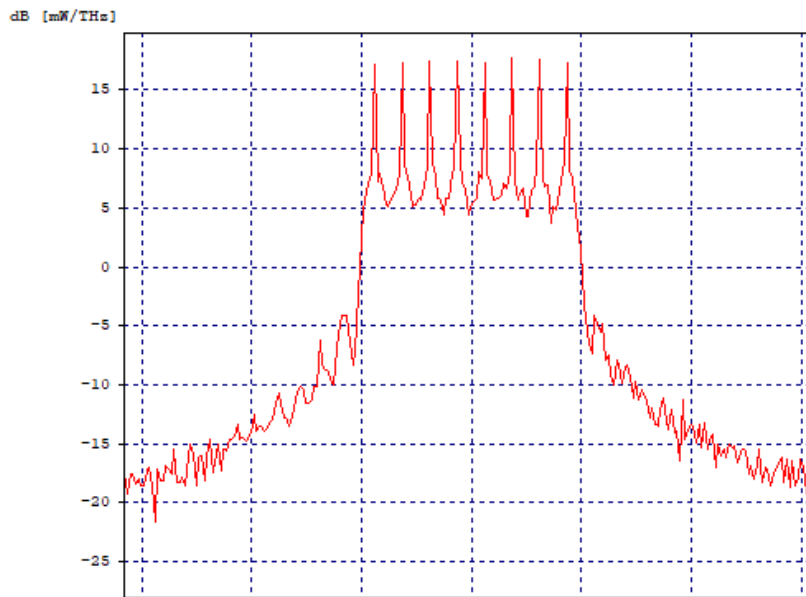


Obr. 3.20 – Schéma simulace FWM.

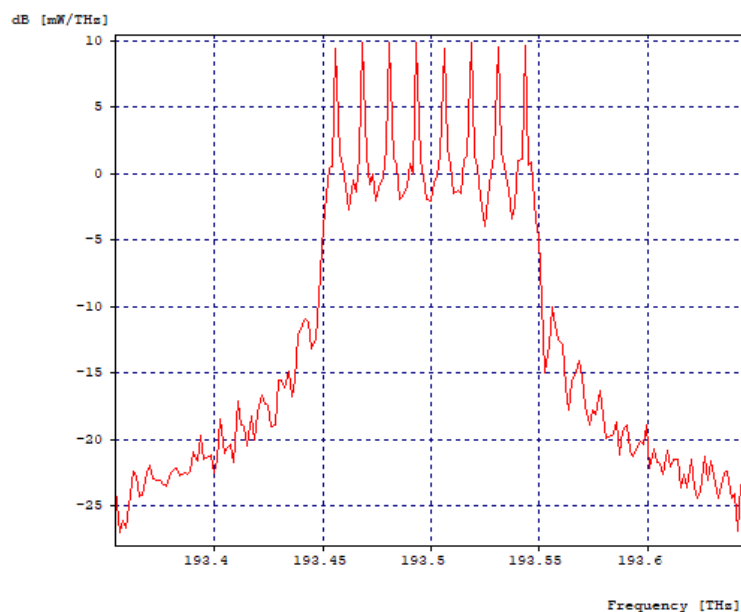
Analýza je prováděna na základě srovnání vstupních a výstupních spekter signálu. Na výstupu je pak brán ohled navíc na diagram oka a hodnotu chybovosti BER a Q -faktor.

### 3.3.1 Vyhodnocení vlivu FWM u DWDM

Na obrázku Obr. 3.21 je vidět vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 12,5 GHz. Je patrné, že na vstupních spektrech nejsou produkty směšování patrné. Na následujících obrázcích jsou potom korespondující spektra výstupních signálů a diagramů oka rozhodnutí pro další rozestupy.

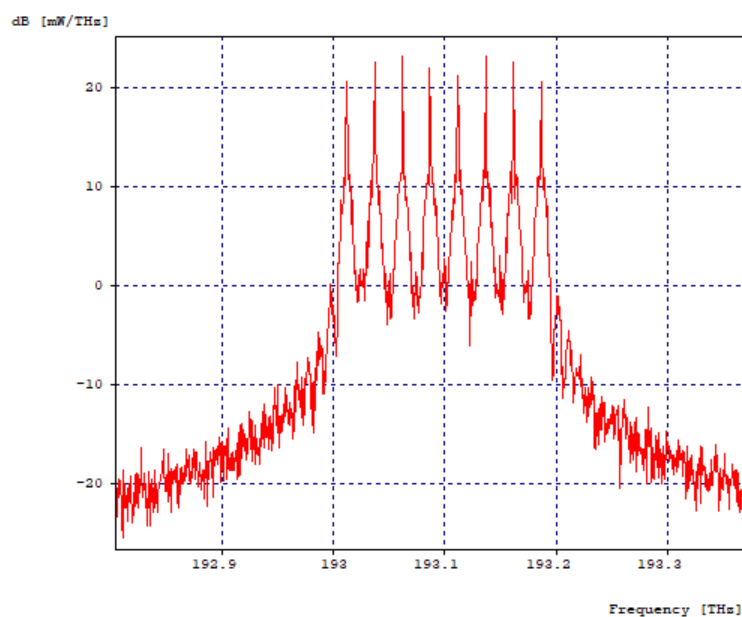


Obr. 3.21 – Vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 12,5 GHz. Jedná se o spektrum zachycené před vstupem do 100km úseku vlákna a jev FWM tedy není viditelný.

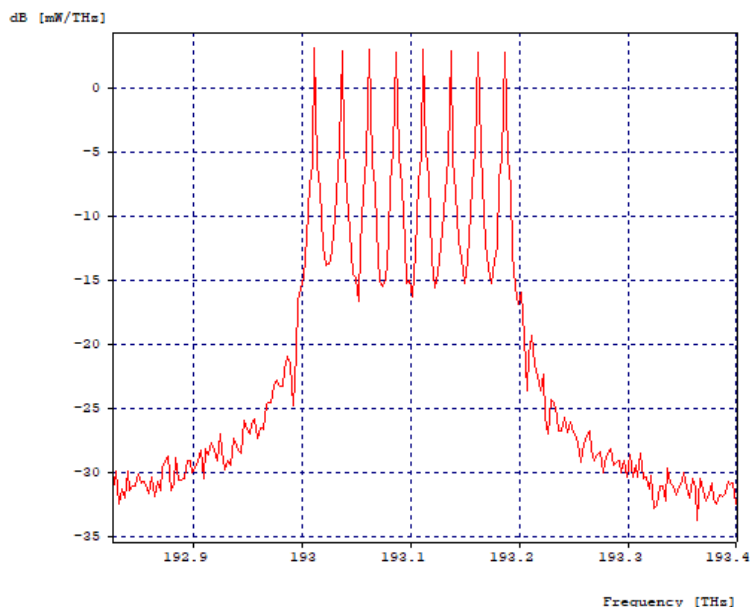


Obr. 3.22 – Optické spektrum na výstupu demultiplexoru pro kanálový rozestup 12,5 GHz. Zde jsou již patrné jednotlivé intermodulační FWM produkty.

Vstupní a výstupní spektrum signálu s odstupem 25 GHz na obrázcích níže. Pro tento odstup se výrazně snížila hodnota chybovosti a to až o 15 řádů.

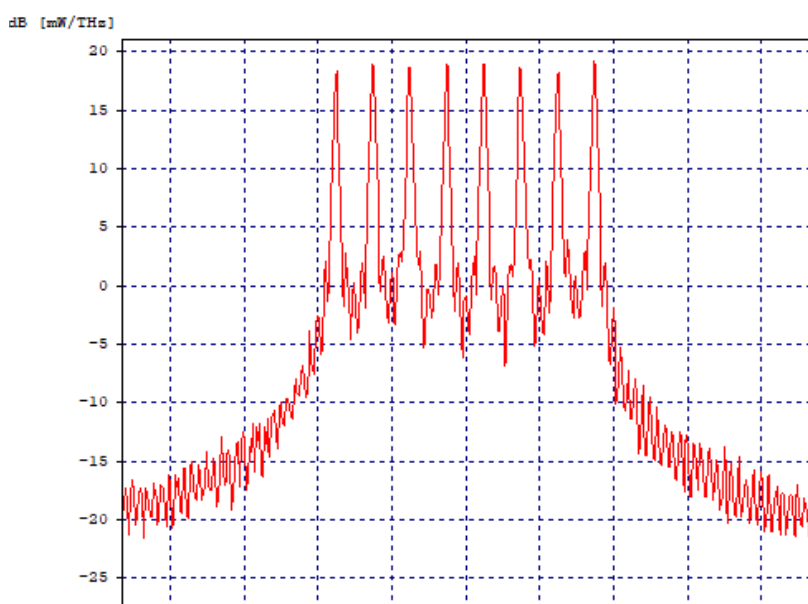


Obr. 3.23 – Vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 25 GHz. Jedná se o spektrum zachycené před vstupem do 100km úseku vlákna a jev FWM tedy není tak patrný, jako na demultiplexoru.



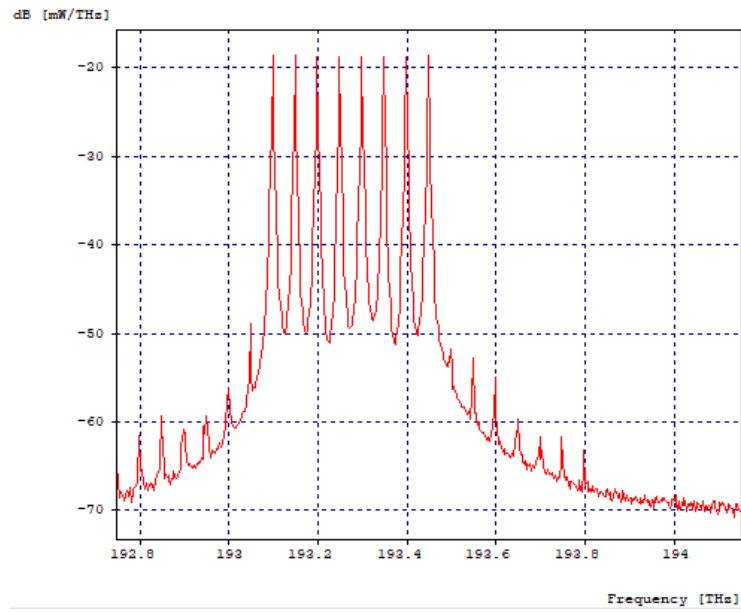
Obr. 3.24 – Výstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 25 GHz. Intermodulační produkty nejsou patrné, avšak analýza výkonové úrovně na odpovídajících frekvencích FWM produktů a také hodnoty chybovosti BER poukazují na jejich vliv na systém.

Vstupní a výstupní spektrum signálu s odstupem 50 GHz na obrázcích níže. Pro tento odstup se opět výrazně snížila hodnota chybovosti a to až od 20 řádů.



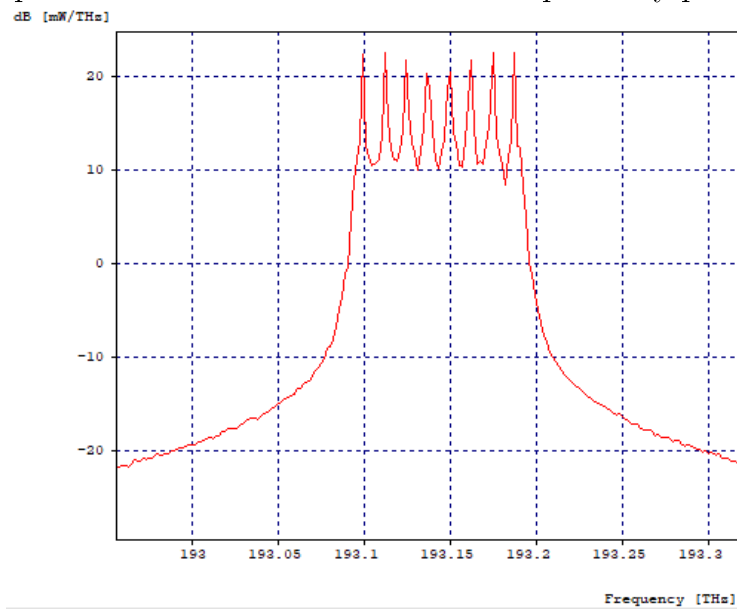
Obr. 3.25 – Vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 50 GHz.

I u odstupu 50 GHz jsou ještě patrné intermodulační FWM produkty, jak je vidět níže. Diagram oka rozhodnutí je již však příznivější, než v přechozích nižších odstupech.

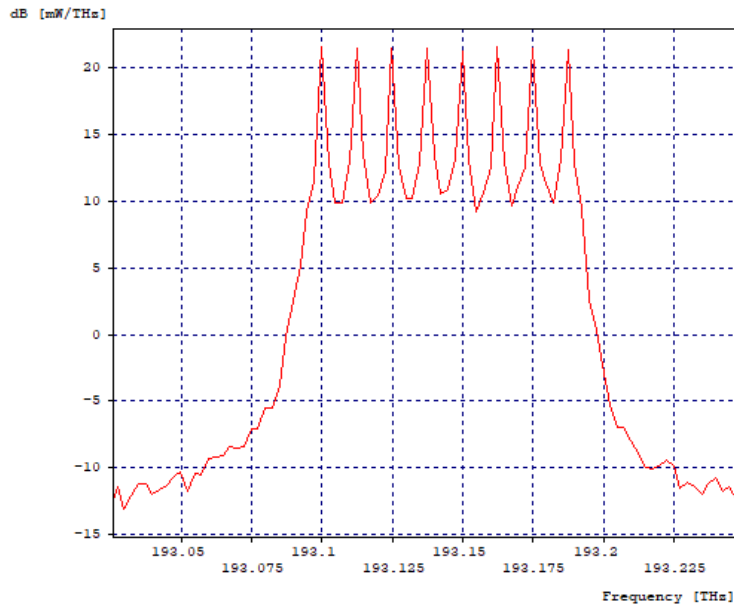


Obr. 3.26 – Výstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 50 GHz.

Pro odstup kanálů 100 GHz už intermodulační produkty patrně nejsou.

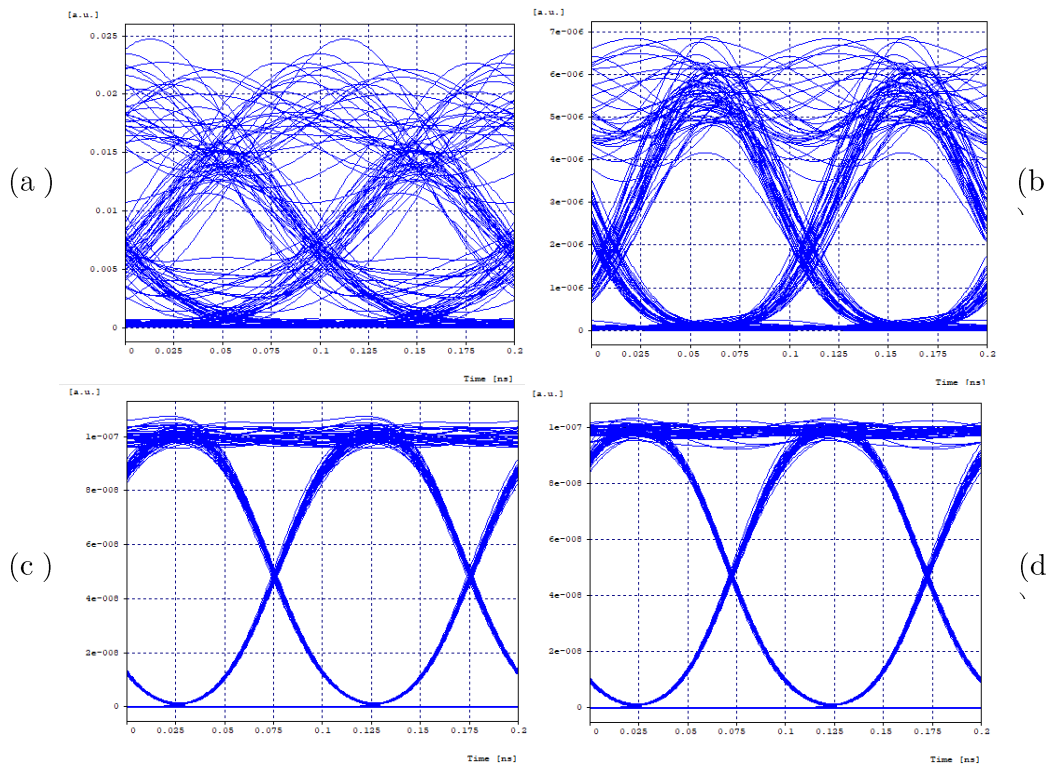


Obr. 3.27 – Vstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 100 GHz.



Obr. 3.28 – Výstupní spektrum signálu pro kanálový odstup 100 GHz.

Na obrázku níže je srovnání diagramů oka rozhodnutí pro simulované kanálové rozestupy.



Obr. 3.29 – Diagramy oka rozhodnutí pro kanálový rozestup a) 12,5; b) 25; c) 50 a d) 100 GHz. Kvůli vlivu FWM je kvalita přenosu negativně ovlivněna a hodnota BER je pro a) pod stanovenou hranicí pro DWDM systém, konkrétně  $1,15 \cdot 10^{-5}$  avšak pro b), c) i d) jsou už výsledky přípustné.

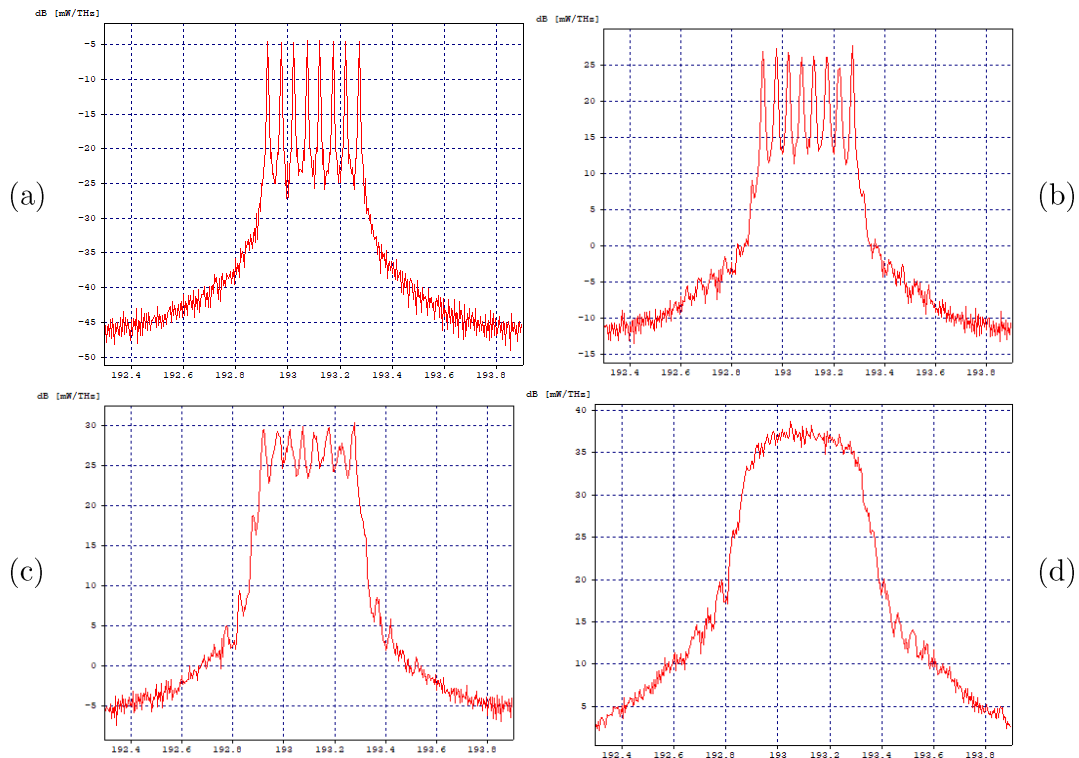
Přehled výsledků simulace podává *Tab. 3.4* níže. Čím větší kanálový odstup je použit, tím menší je nepříznivý vliv FWM, což dokazují hodnoty chybovosti a Q -faktoru. U přenosových systémů dnes stavěných v České Republice, zejména pro DCI (angl. Data Centre Inter-connect) spoje, je šířka pásma prozatím dostatečná, a není tak nutné používat menší kanálové odstupy. Do budoucna je však možné, že s rostoucí poptávkou po přenosové kapacitě či s dynamicky se měnícím trendem povahy provozu v metropolitních sítích, bude aktuální právě otázka použití i menších kanálových rozestupů, oproti dnes rozšířeným 100GHz odstupům.

*Tab. 3.4 – Přehled hodnot chybovosti BER a Q -faktoru pro různé kanálové rozestupy.*

Kanálový rozestup [GHz]	Q -faktor [dB]	BER [-]
12,5	11,374	$1,15 \cdot 10^{-5}$
25	18,78	$3,89 \cdot 10^{-21}$
50	22,634	$9,73 \cdot 10^{-41}$
100	22,254	$9,86 \cdot 10^{-41}$

### 3.3.2 Vliv přebuzení systému na chybovost

Při nastavování hodnot zisků zesilovačů se v některých případech hodnoty chybovosti systému dostaly poměrně vysoko. Po několika testovacích simulacích byl problém objasněn, a sice šlo o příliš vysoké hodnoty zisku optických zesilovačů. Na *Obr. 3.30* je viditelné postupné zhoršení rozlišení jednotlivých kanálů mezi sebou, kdy spodní část spektra kanálů se dostává do vyšších výkonových úrovní a může tak dojít až k nemožnosti rozlišit jednotlivé kanály mezi sebou. Toto je důsledek příliš velkého zisku výkonových a průběžných optických zesilovačů či velkého výkonu laserů či kombinace obojího. Takového výsledku dosahují zejména systémy s oběma typy zesilovačů, neboť při použití jednotlivě pouze výkonového či jen průběžného zesilovače, k tomuto podle simulace nedochází. V takových případech přebuzení hodnoty chybovosti samozřejmě rostou.



Obr. 3.30 – Vyobrazena jsou výstupní spektra pro hodnoty zisku výkonového a průběžného zesilovače a) 0, b) 17, c) 20 a d) 25 dB. Navyšování zisku optických zesilovačů či příliš velký výkon laserů může způsobit horší rozlišení jednotlivých kanálů mezi sebou na výstupu demultiplexoru, a tedy nárůst chybovosti.

V této části práce byl vyšetřován jev čtyřvlenného směšování v systému DWDM v závislosti na rozestupu kanálů. Z výsledků je patrné, že velikost kanálových rozestupů má v systémech DWDM zásadní vliv na vlastnosti systému, zejména na hodnoty chybovosti, potažmo Q-faktoru. Pro hodnoty rozestupu 12,5 GHz v simulovaném systému byla chybovost BER poměrně vysoká, u 25GHz odstupu se však dostala do akceptovatelných řádů a u rozestupů 50GHz a 100 GHz byla již zanedbatelná. 50GHz odstup kanálů v mnoha případech dosáhl nejlepších výsledků, co se týká chybovosti BER. Je možné, že existuje souvislost mezi použitou modulací a odstupem kanálů, a tedy ne vždy 100GHz odstup zaručuje nejlepší výsledky. Graficky to nejlépe znázorňuje diagram oka rozhodnutí pro každý kanálový rozestup či závěrečná tabulka výše (Obr. 3.29, Tab. 3.4). U jevu čtyřvlenného směšování vyšší hodnota rozestupů mezi kanály napomáhá potlačení tohoto jevu.

### 3.4 Simulace závislosti FWM na polarizaci

V této simulaci je zkoumán vliv polarizace na jev čtyřvlenného směšování. Článků věnujících se této problematice není mnoho [30][31][32], proto byla tato problematika zahrnuta do simulací. V této simulaci se zaměřuji na podrobnější popis vlivu změny polarizace určitých kanálů ve WDM systému v souvislosti se velikostí úhlu polarizace a také vlivu vybraných kanálů, jichž se změna týká. Referenční model je použit opět jako v předchozích simulacích. Simulace probíhá

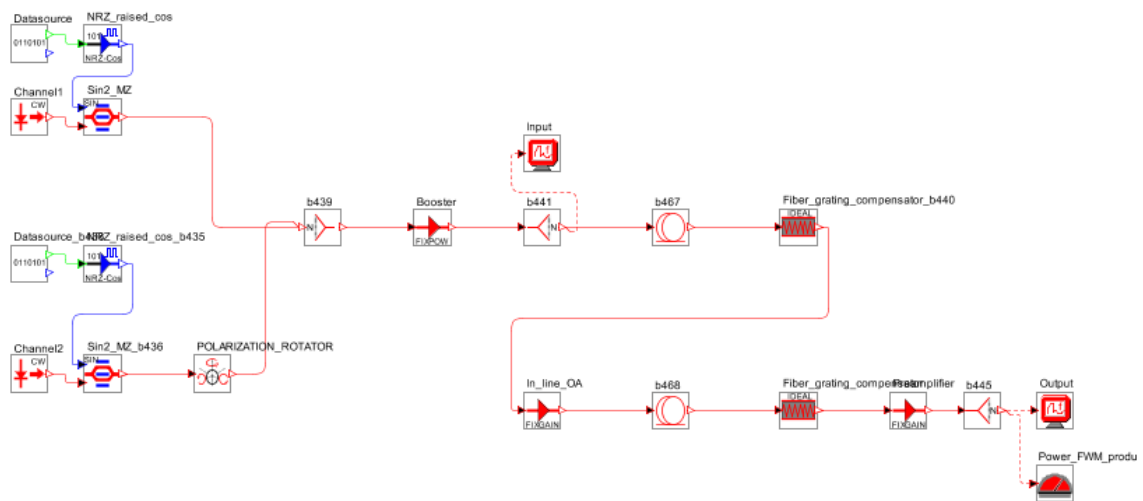


na systému DWDM s 50GHz odstupem kanálů a to se dvěma kanály na frekvencích 193,025 THz a 193,075 THz a pro srovnání také na 8kanálovém DWDM systému s odstupem kanálů nejprve 25 GHz, a poté 50 GHz.

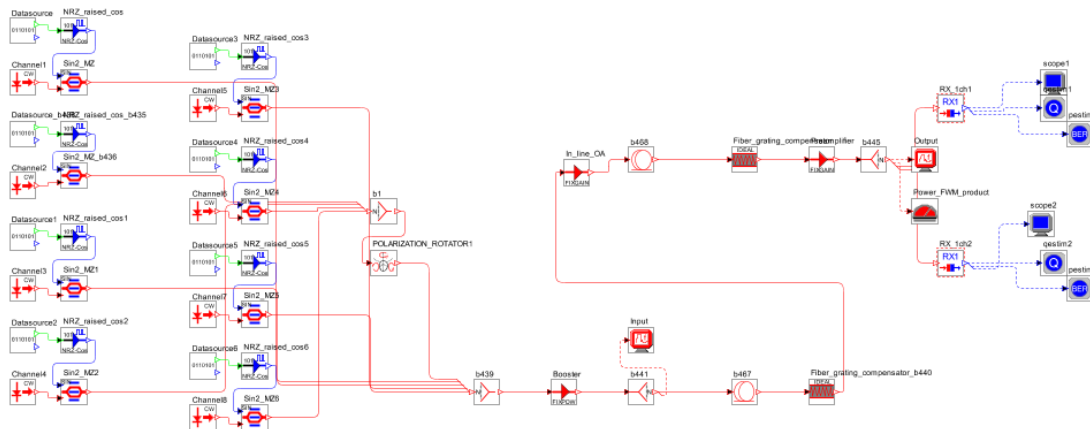
U laserového vysílače druhého kanálu, je měněn parametr polarizace optického paprsku pomocí modulu pro rotaci polarizace, který umožňuje v několika krocích po sobě změnit polarizaci laseru v jedné či ve dvou osách tzv. Poincarého koule. Na začátku simulace mají oba lasery stejnou výchozí polarizaci. V druhém kroku simulace je změněna polarizace osy S2 Poincarého koule. Ve třetím kroku je změněna dvojnásobně. Díky parametrickému běhu simulace jsou změny polarizace v krocích po 45 stupních. V případě 8kanálového systému je simulován nejdříve 50GHz odstup mezi kanály, s prvními 4 kanály bez změny polarizace a s kanály 5 -8 se změnou polarizace v krocích jako v předchozí simulaci, tedy 45°. A pro srovnání je provedena simulace, kdy změnou polarizace jsou postiženy jen sudé kanály. Poslední simulace je pro 25GHz kanálový odstup.

Oba kanály dvoukanálového systému jsou navázány do optického vlákna podle ITU-T G.652 o dvou úsecích po 100 km, kde jsou pomocí DCM modulů kompenzovány, a pak jsou výstupní optické signály analyzovány spektrálním analyzátozem. Pro 8kanálový systém jsou použita DSF (angl. Dispersion-shifted Fiber) podle ITU-T G.653 pro účely modelovat reálné trasy, nejedná se tedy v tomto případě o doporučení.

Vyhodnocení vlivu polarizace na efekt FWM je provedeno porovnáním výkonových úrovní intermodulačních produktů a pomocí výsledků analýzy BER. Schémata simulací obou systémů jsou popsány na obrázcích níže.



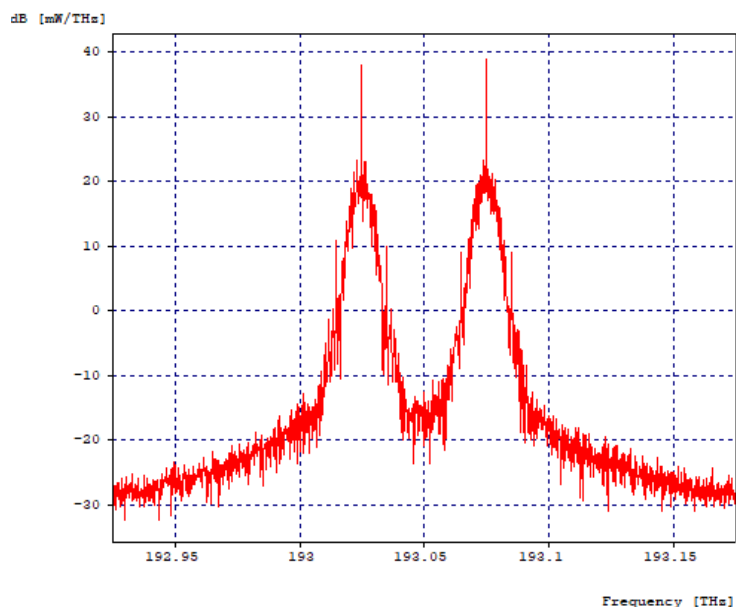
Obr. 3.31 – Schéma pro simulaci závislosti FWM na polarizaci na dvoukanálovém DWDM systému s dvěma 100km kompenzovanými úseky SMF vlákna.



Obr. 3.32 – Schéma pro simulaci závislosti FWM na polarizaci na 8kanálovém DWDM systému s dvěma 100km kompenzovanými úseky DSF vlákna. Pro simulaci byly použity 50GHz a 25GHz kanálový odstup.

### 3.4.1 Závislost FWM na polarizaci ve dvoukanálovém systému

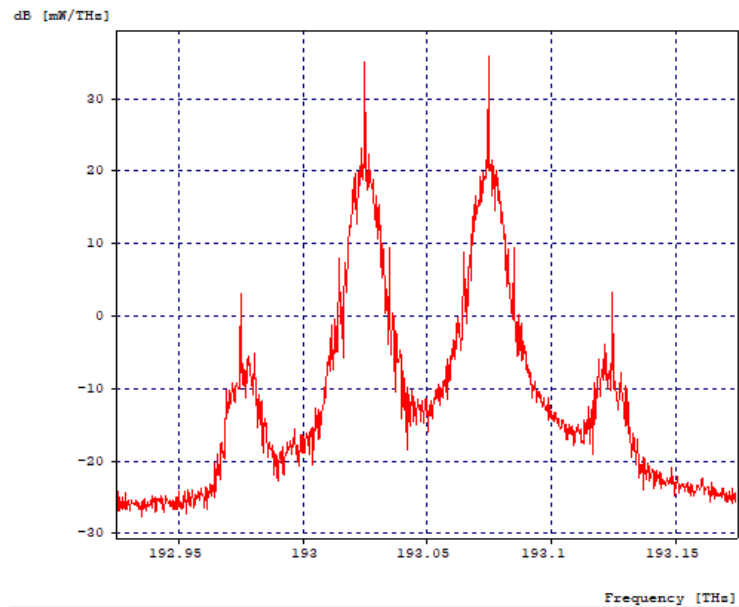
Spektrum vstupního signálu je vidět na Obr. 3.33. Jsou přítomny dva kanály, a jelikož se jedná o spektrum před navázáním do hlavního úseku vlákna, nejsou patrné žádné intermodulační FWM produkty.



Obr. 3.33 – Spektrum vstupního signálu dvoukanálového DWDM systému. Před navázáním do hlavního úseku vlákna nejsou přítomny intermodulační FWM produkty.

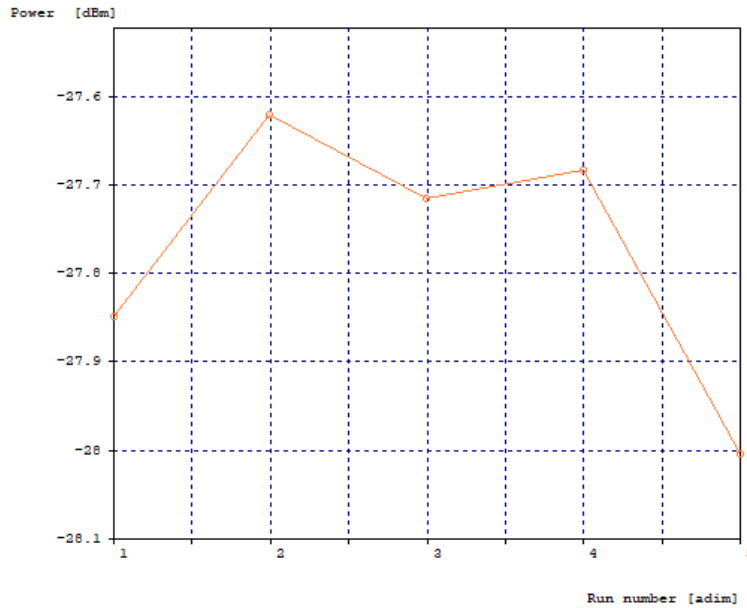
V následujících obrázcích jsou znázorněna výstupní spektra signálů, ve čtyřech krocích simulace. V prvním kroku parametr polarizace zůstal nezměněn pro oba kanály, tedy oba kanály mají stejnou hodnotu polarizace a při pohledu na Obr. 3.34 je vidět, že efekt FWM se na výstupu vlákna projevil. Čím větší je

výkonová úroveň intermodulačních produktů FWM, tím se zvýší také chybovost celého systému. Současně pokud je na optické trase vykompenzována CD, je splněna podmínka fázového souběhu a efekt FWM je o to patrnější. Zejména ve vysokorychlostních přenosových systémech je tedy třeba hledat kompromis tím, do jaké míry kompenzovat vliv chromatické disperze a do jaké míry se nechat limitovat nelineárním jevem FWM.



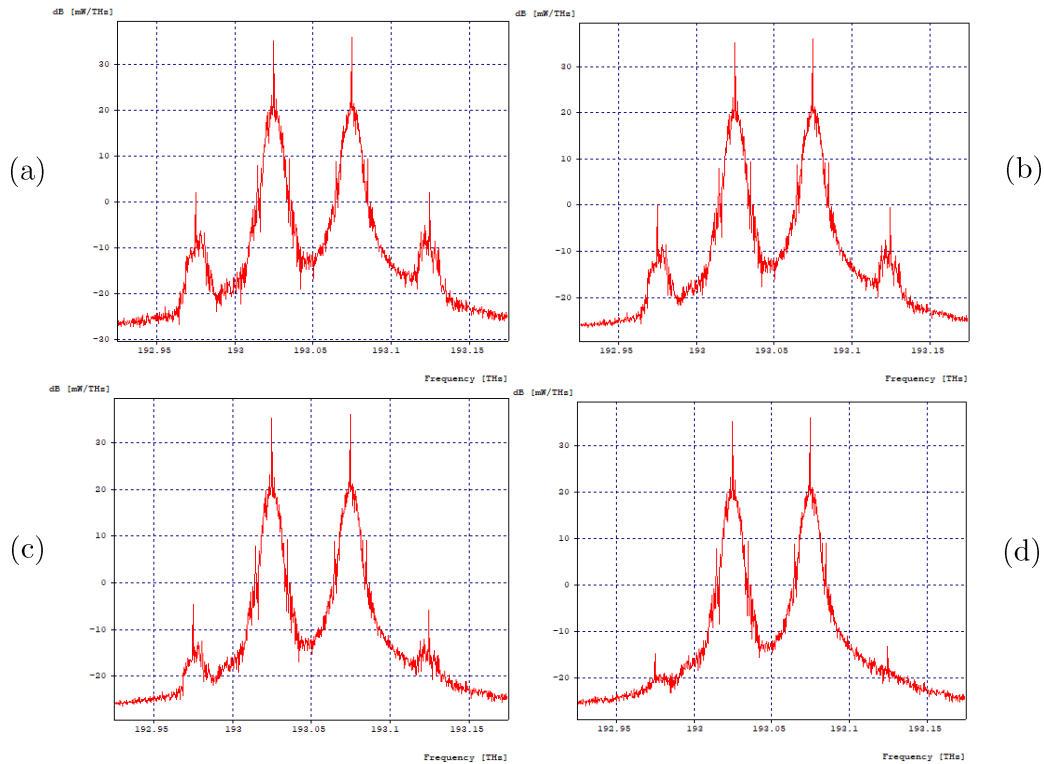
Obr. 3.34 – Výstupní spektrum signálu v prvním kroku simulace. Je patrný významný vliv FWM produktů po stranách spektra.

Z Obr. 3.35 je patrné, že výkonové úrovně intermodulačních produktů se pohybují mezi hodnotami -27 dBm a -28 dBm, pro nezměněnou hodnotu polarizace druhého kanálu. To lze víceméně považovat za zanedbatelnou změnu ve výkonové úrovni, obzvláště v porovnání s následujícími kroky simulace, kde výkonová úroveň produktů FWM vlivem změny úhlu polarizace klesá mnohem znatelněji.



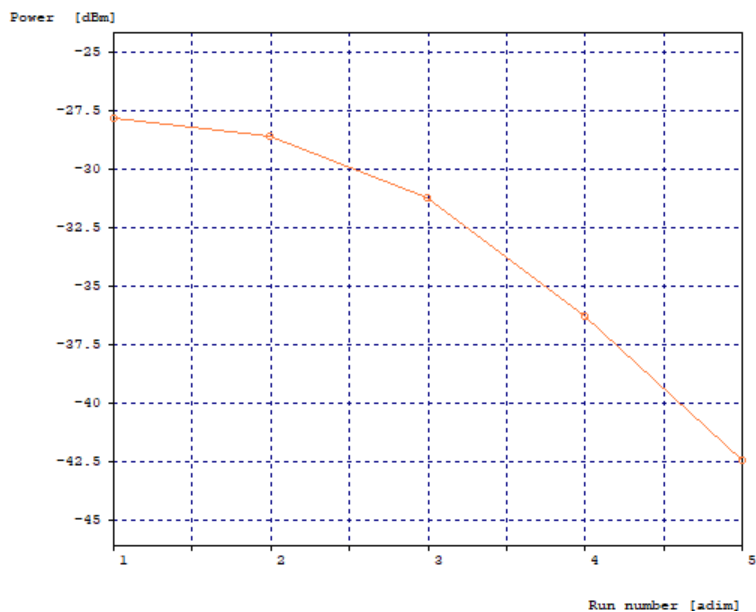
Obr. 3.35 – Výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, přítomných v optickém signálu dvoukanalového DWDM systému po průchodu 200km vláknem. Simulováno bylo 5 kroků s neměnnou hodnotou polarizace druhého kanálu.

V druhém kroku simulace je měněna hodnota polarizace osy S2 od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  v krocích po  $45^\circ$  u druhého kanálu. Vliv této změny je největší při změně polarizace o  $180^\circ$ , kdy intermodulační produkty směšování jsou téměř potlačeny, neboť oba kanály jsou vůči sobě ortogonální, jak je vidět na Obr. 3.36.



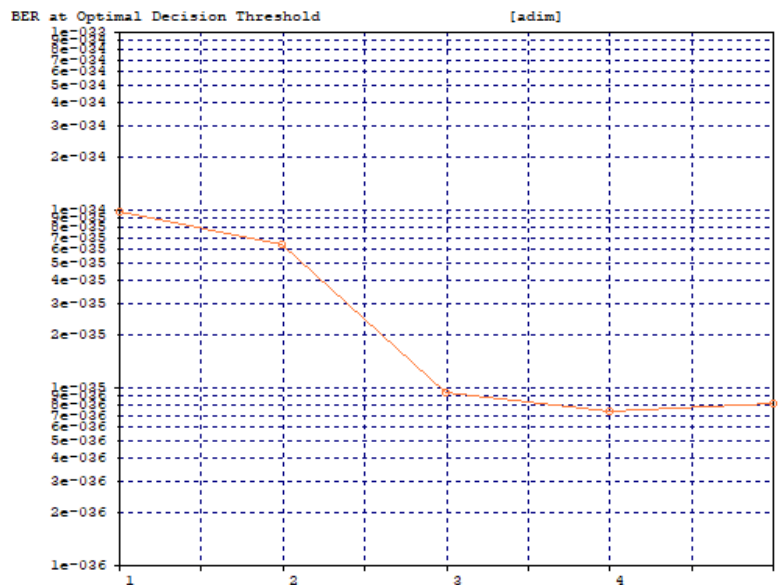
Obr. 3.36 – Výstupní spektrum signálu ve druhém kroku simulace. Změna polarizace osy S2 druhého kanálu o a)  $45^\circ$ , b)  $90^\circ$ , c)  $135^\circ$  a konečně d)  $180^\circ$  postupně potlačila intermodulační FWM produkty.

Na *Obr. 3.37* je vidět snižující se výkonová úroveň pro jednotlivé změny úhlu polarizace. Pro hodnotu polarizace druhého kanálu,  $180^\circ$ , výkonová úroveň FWM produktů klesla až na hodnotu  $-42,5$  dBm z původních  $-27,8$  dBm.



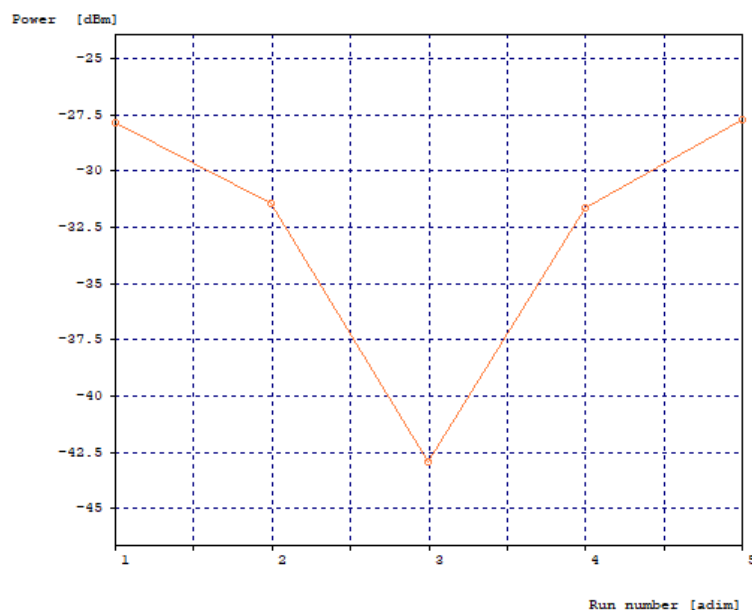
*Obr. 3.37 – Klesající výkonová úroveň intermodulačních produktů FWM, pro změny polarizace od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  v pěti krocích. Oba kanály jsou v posledním kroku navzájem ortogonální, čili vliv výkonová úroveň FWM produktů je minimální.*

Při  $180^\circ$  změně polarizace bylo dosaženo maximální ortogonality mezi oběma kanály, další kroky by tedy již neměly smysl, neboť výkonová úroveň FWM produktů by opět začala narůstat na původní hodnotu  $-27,8$  dBm. *Obr. 3.38* ukazuje, že hodnota BER klesá s rostoucí hodnotou změny polarizace druhého kanálu do okamžiku, kdy oba kanály dosáhnou vzájemné ortogonality.



Obr. 3.38 – Hodnoty BER, pro změny polarizace od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  v pěti krocích. Je patrné, že chybovost klesá s rostoucí změnou v úhlu polarizace druhého kanálu, potažmo se snižující se výkonovou úrovní intermodulačních produktů FWM

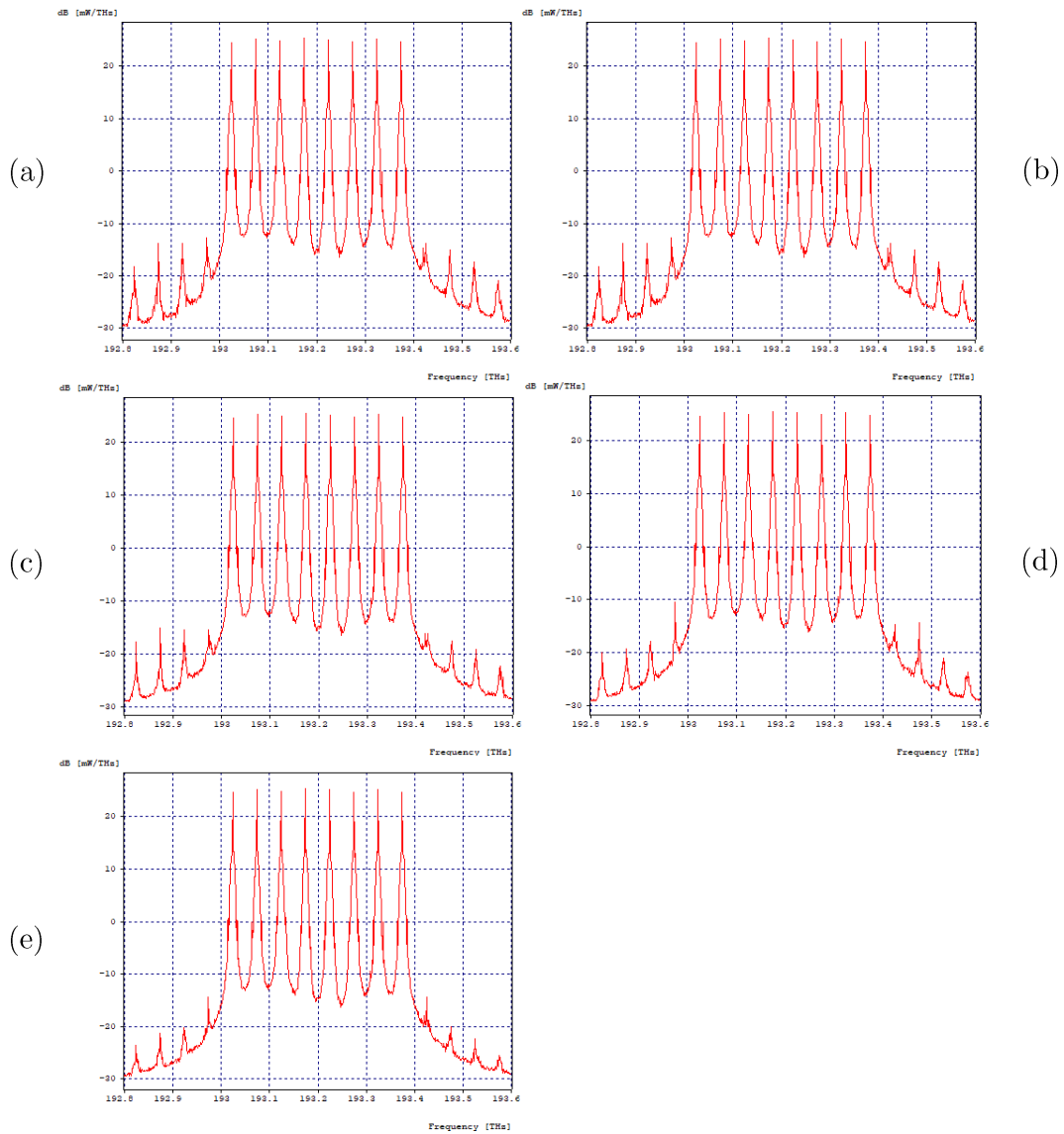
Na obrázcích níže lze vidět výslednou závislost výkonové úrovně produktů FWM na polarizaci zdroje jednoho z kanálů, přičemž potvrzuje, že čím výraznější je změna rotace polarizace optického zdroje, tím menší je vliv intermodulačních produktů FWM. Jakmile však rotace přesáhne hodnotu  $180^\circ$ , dojde k postupnému návratu do výchozího stavu  $360^\circ$ , potažmo  $0^\circ$ . Pro dvoukanalový systém ze simulací vyplývá, že změna polarizace druhého kanálu dokáže poměrně efektivně potlačit vliv čtyřvlenného směšování. Reálně se však používají DWDM systémy s více, než dvěma kanály. Použití dvoukanalového systému v simulaci bylo za účelem vytvoření základního modelu problému, snadný výklad a pochopení problematiky. Z toho důvodu je provedena podobná simulace na systému s osmi kanály. Změna nastala v použitém typu vlákna, kdy klasické SMF vlákno bylo vyměněno za DSF, které se liší zejména v nižším koeficientu chromatické disperze.



Obr. 3.39 – Graf výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, pro změny polarizace od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  v pěti krocích po  $90^\circ$ . Při hodnotě  $180^\circ$  ve třetím kroku jsou oba kanály vůči sobě ortogonální a vliv FWM je tedy minimální.

### 3.4.2 Závislost FWM na polarizaci v 8kanálovém systému

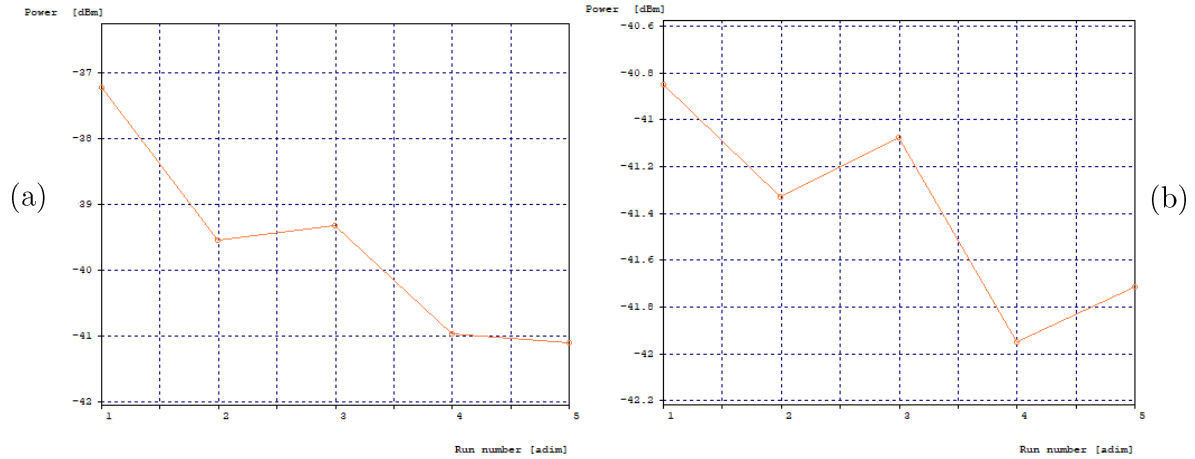
Výsledky simulace pro 8kanálový systém popisuje Obr. 3.40 s vyobrazenými spektry na výstupu demultiplexoru. Srovnatelně, jako pro dvoukanálový systém se SMF vláknem, bylo dosaženo snížení vlivu FWM i pro vícekanálový systém s vláknem DSF.



Obr. 3.40 – Výstupní spektra signálu. Změna polarizace osy  $S_2$  kanálů 5-8 o a)  $0^\circ$ , b)  $45^\circ$ , c)  $90^\circ$ , d)  $135^\circ$  a konečně e)  $180^\circ$  postupně potlačuje intermodulační FWM produkty. Kanálový odstup je 50 GHz.

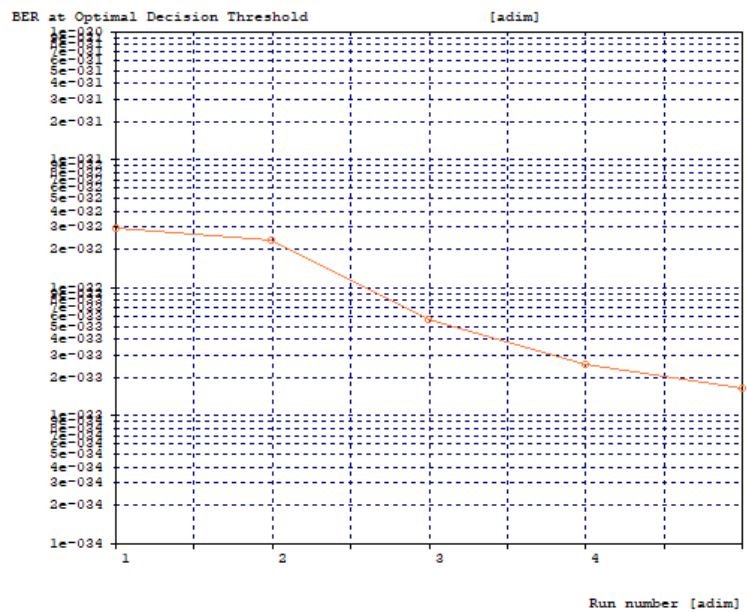
Co se týká výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, Obr. 3.41 ukazuje snižující se trend stejně jako v předchozí simulaci dvoukanalového systému. V levé části je výsledek simulace pro systém se stejnou změnou rotace polarizace pro kanály 5, 6, 7 a 8 (kanály 1-4 mají stejnou hodnotu rotace polarizace, tedy  $0^\circ$ ). V pravé části obrázku se nachází výsledek simulace pro systém se změnou rotace polarizace pro sudé kanály, přičemž výkonová úroveň produktů byla mnohem nižší, v porovnání s předchozím případem postižených kanálů.





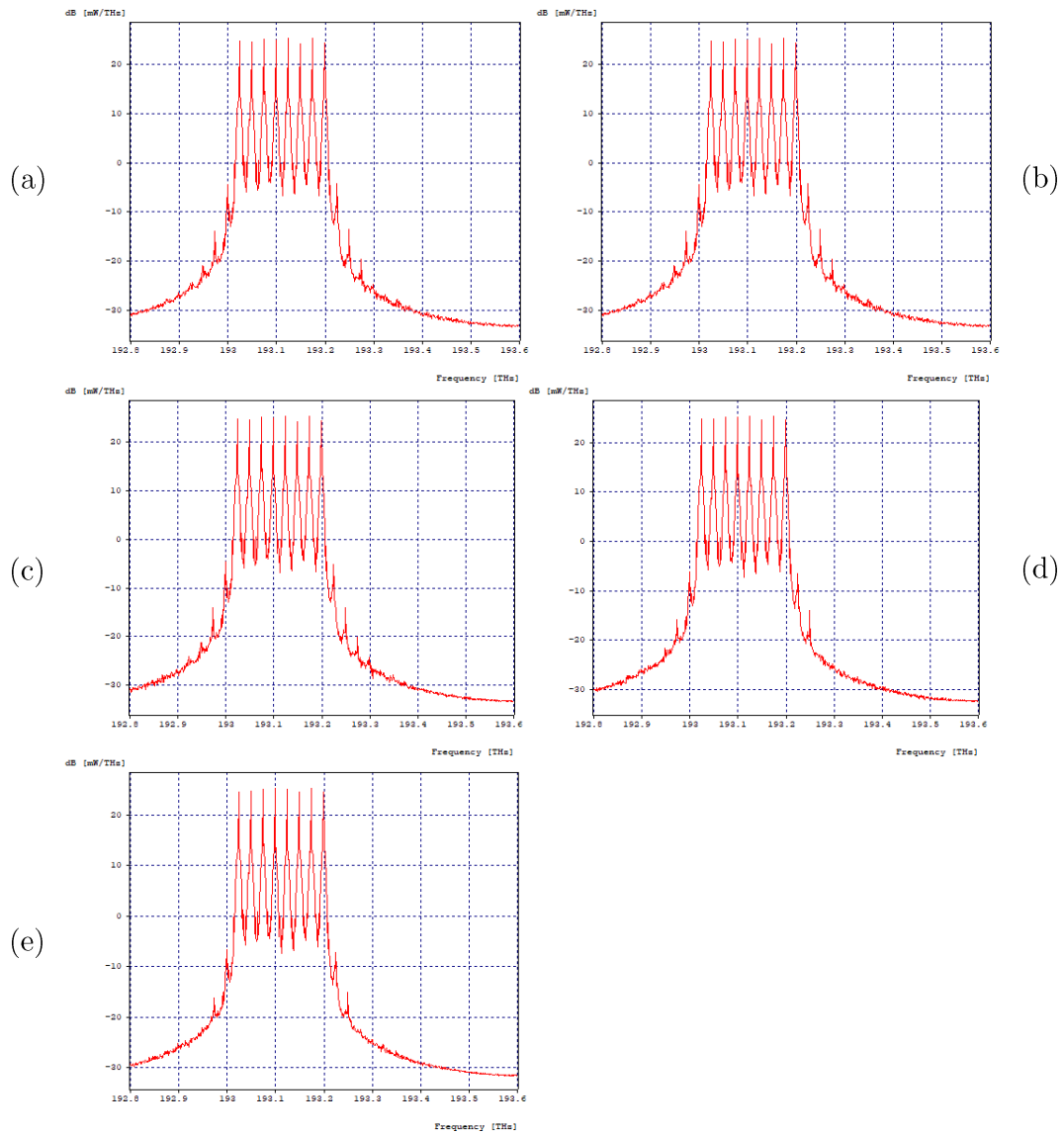
Obr. 3.41 – Graf výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, pro změny polarizace od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  v pěti krocích po  $45^\circ$ . Obrázek a) pro změny polarizace na kanálech 5-8 a obrázek b) pro změny polarizace pro sudé kanály. Kanálový odstup je 50 GHz.

Hodnoty chybovosti BER mají taktěž snižující se charakter, jak lze vidět na Obr. 3.42.

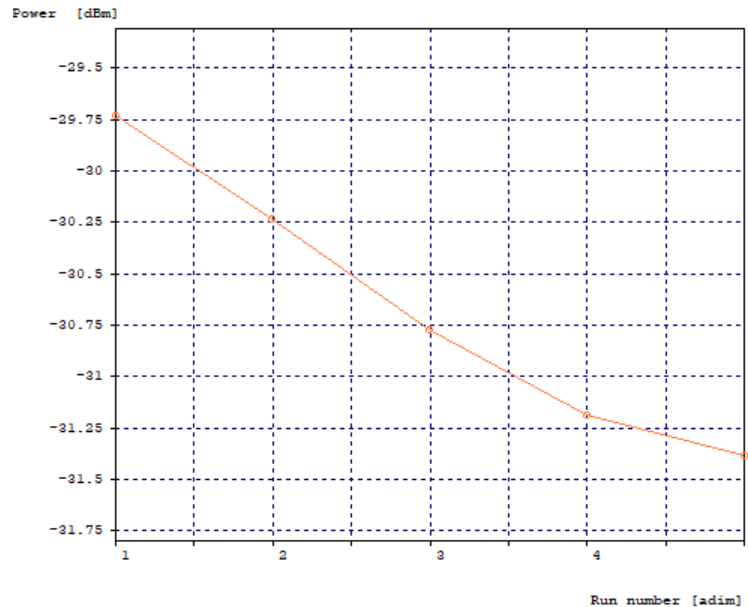


Obr. 3.42 – Graf hodnot chybovosti BER pro 8kanálový systém s DSF vláknem potvrzuje příznivý vliv změny polarizace na chybovost systému (chybovost zaznamenána na kanále č. 5, srovnatelné hodnoty byly dosaženy na ostatních kanálech). Kanálový odstup je 50 GHz.

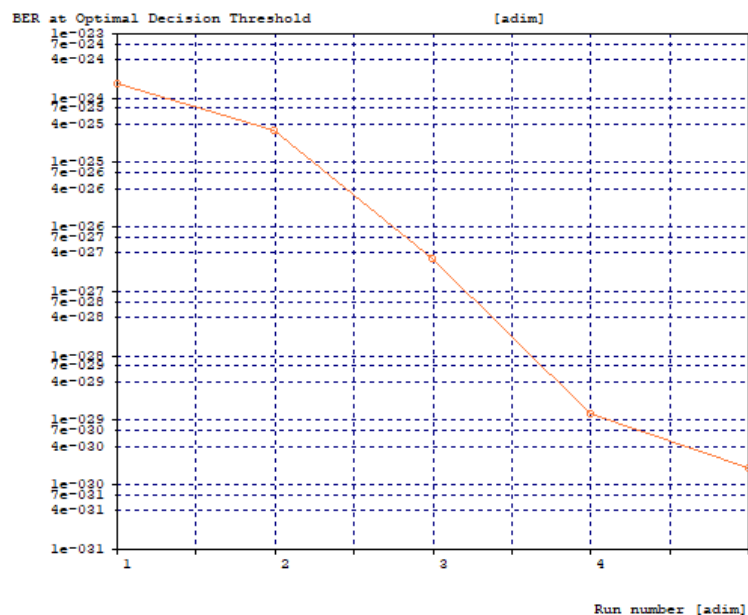
Pro 25GHz kanálový odstup bylo dosaženo srovnatelných výsledků, tedy snížení vlivu FWM díky změně polarizace druhé poloviny kanálů. Chybovost BER je zde celkově poněkud větší, než v předchozím případě, ale to je způsobeno menšími kanálovými odstupy. Chybovost BER vykazuje snižující se trend se zvyšujícím se úhlem změny polarizace.



Obr. 3.43 – Výstupní spektra signálu pro 8kanálový systém s 25GHz kanálovými odstupy. Změna polarizace osy S2 kanálů 5-8 o a) 0°, b) 45°, c) 90°, d) 135° a konečně e) 180° postupně potlačuje intermodulační FWM produkty.



Obr. 3.44 – Graf výkonové úrovně intermodulačních produktů FWM, pro změny polarizace od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  v pěti krocích po  $45^\circ$  (v 8kanálovém systému pro kanály 5 - 8). Kanálový odstup je 525 GHz.



Obr. 3.45 – Graf BER 5. kanálu v 8kanálovém DWDM systému, pro změny polarizace od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  v pěti krocích po  $45^\circ$ . Kanálový odstup je 25 GHz.

V simulaci je měněna polarizace poloviny kanálů a ukazuje se, že při  $180^\circ$  rotaci polarizace dojde k nejvýraznějšímu zmenšení výkonové úrovně intermodulačních FWM produktů z hodnoty -27,8 dBm na -42,5 dBm pro dvoukanálový systém a z hodnoty -29,7 dBm na -31,32 dBm pro 8kanálový systém, kde se projevilo zejména snížení chybovosti až o šest řádů na hodnotu  $BER=2 \cdot 10^{-30}$ . Díky simulacím výše bylo prokázáno, že změna v rotaci polarizace pro část kanálů v DWDM systému, vede ke snížení výkonové úrovně intermodulačních produktů čtyřvlňného směšování. Míra potlačení nežádoucího vlivu FWM je úměrná velikosti úhlu, o který je polarizace rotována, avšak pouze

v rozmezí  $180^\circ$ . Při rotaci nad  $180^\circ$  oproti výchozímu stavu je míra ortogonality mezi kanály opět snižována a při dosažení  $360^\circ$ , respektive  $0^\circ$ , se polarizace navrátí na původní hodnotu.

## 4 Závěr

Výsledkem práce jsou simulace z oblasti optických přenosových systémů a souvisejících omezujících jevů, přičemž cíle stanovené zadáním práce považují za splněné. Na základě výsledků lze doporučit vhodné parametry či metody pro efektivnější řešení dílčích simulovaných systémů.

Ze simulace kompenzace chromatické disperze vyplynulo, že pro aktivní optický systém je nejvýhodnější použít symetrickou kompenzaci pomocí modulu založeném na BGF vlákne, neboť nevyžaduje přílišnou pozornost na kalibraci nastavení výkonové úrovně optických zesilovačů na trase, což potvrzuje chybovost kanálů v systému, jež se dostala na zanedbatelné hodnoty.

Simulace pasivního systému, založeného na WDM, využívající pouze jeden optický zesilovač na trase, nepotvrdila výstup z předchozí simulace AON systému, neboť se ukázalo, že navýšením hodnoty zisku zesilovače dojde nezávisle na typu kompenzace ke zvýšení chybovosti, a současně nelze považovat symetrickou kompenzaci za nejlepší řešení. Pro systém s výkonovým zesilovačem dokonce symetrická kompenzace pomocí BGF dosáhla nejhorších výsledků, naopak excelovala DCF prekompenzace. V systému s průběžným zesilovačem na základě výsledků doporučuji použít postkompenzaci založenou na BGF. Celkově pak systém s průběžným zesilovačem dosahoval nižších hodnot chybovosti a ukázalo se, že při navyšování hodnoty zisku zesilovače je systém robustnější. Dnešní infrastruktura, zejména v metropolitních přístupových optických sítích v České Republice, používá kompenzaci na bázi DCF a množství ROADM zařízení na trase. V souvislosti s vývojem v této oblasti, bych považoval za vhodnější použít koherentní zdroje záření, neboť tam není třeba věnovat tolik pozornosti kompenzaci chromatické disperze a to i za předpokladu ponechání současných DCM modulů na trase, neboť z praxe by toto nemělo mít negativní vliv na efektivitu systému.

Simulace vysokorychlostních optických přenosových systémů je dalším studovaným odvětvím. Zde je testován 36kanálový (z hlediska použitých vlnových délek pouze 9kanálový) WDM systém s PM-QPSK modulací, s koherentním přijímačem/vysílačem s DSP jednotkou, která nahrazuje DCM moduly pro kompenzaci disperze, funguje jako polarizační demux, disponuje funkcí dopředné opravy chyb FEC a BER analyzátoru jako funkce útlumu optické trasy. Na základě výsledků simulace doporučuji dodržet hranici překlenutelné vzdálenosti 1000 km. Pro účely navýšení přenosové kapacity stávajících optických přenosových WDM systémů s rychlostmi do 10Gb/s na kanál, se toto jeví jako možné řešení, zvláště díky použití DSP.

V další části práce je pozornost věnována problematice nelineárního jevu čtyřvlnného směšování. Potlačení jevu je možné dosáhnout několika způsoby, simulace se podrobněji zaměřují na vliv odstupu kanálů a jeho význam pro potlačení vlivu FWM. Výsledky jsou demonstrovány na 8kanálovém WDM systému s odstupy kanálů 12,5; 25; 50 a 100 GHz. Předpoklad byl, že s rostoucím kanálovým odstupem klesá chybovost kanálů, což se částečně potvrdilo, avšak srovnání výsledků simulace 50GHz a 100GHz odstupu ukazuje, že toto tvrzení nelze použít obecně. Na základě výsledků simulace a dostupných odborných článků je pravděpodobné, že existuje souvislost mezi potlačením jevu FWM, kanálovým odstupem a navíc použitým modulačním formátem. V tomto ohledu se otevírá prostor pro další bádání. Prozatím však doporučuji použít vzhledem

k současným požadavkům na přenosovou kapacitu těchto systémů 100GHz či 50GHz odstup či kombinaci obojího v podobě dynamického rastru vlnových délek.

Následující krátká podkapitola popisuje zjištěnou souvislost mezi chybovostí WDM systému a hodnotami zisků výkonových a průběžných zesilovačů, přítomných na optické trase. Bylo zjištěno, že příliš vysoké hodnoty zisku v obou typech zesilovačů, použitých na optické trase zároveň, mají negativní vliv na schopnost systému rozlišit mezi sebou jednotlivé kanály, potažmo na hodnoty chybovosti pro jednotlivé kanály.

Další oddíl vyšetřuje možnosti potlačení jevu FWM prostřednictvím změny polarizace některých kanálů v přenosovém systému WDM. Simulace ukazuje, že je možné snížit výkonovou úroveň intermodulačních FWM produktů prostým použitím odlišné polarizace pro část z celkového počtu kanálů. Rozdíl mezi aplikací stejné změny polarizace pro polovinu po sobě jdoucích kanálů a jen pro sudé kanály (tedy stejná změna ob kanál), je v hodnotě výkonové úrovně, které dosahují intermodulační produkty, přičemž pro druhou variantu, jsou výsledky mnohem příznivější. Doporučuji tak v případě použití této metody pro kompenzaci jevu čtyřvlnného směšování seskupit kanály tak, aby např. liché kanály měly původní hodnotu polarizace, a tedy byly přivedeny přímo do multiplexoru, a sudé kanály byly před vstupem do multiplexoru přivedeny do polarizátoru.

Tato práce nabízí aktuální pohled na problematiku a díky dosaženým výsledkům je tak možné posunout hranice optických přenosových systémů dále. S ohledem na dosažené výsledky, cíle práce lze považovat za splněné.

# Literatura

- [1] OGURA, Keisuke, Akira NAKAMURA a Makoto ITAMI. A study on class a impulsive noise cancellation and channel estimation under Rayleigh fading environment. In: *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s . 1 -2 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1109/ICCE.2018.8326212. ISBN 978-1 -5386-3025-9 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8326212/>
- [2] WHEELER, N .V ., M . G . PAPPA, T . D . BRADLEY, et al. Spontaneous Raman scattering in hollow core photonic crystal fibres. In: *2017 IEEE SENSORS* [online]. IEEE, 2017, 2017, s . 1 -3 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1109/ICSENS.2017.8233880. ISBN 978-1 -5090-1012-7 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8233880/>
- [3] NEMOTO, Masaya, Hiromasa MIYAZAWA a Yosuke TANAKA. Observation of stimulated brillouin scattering growth along optical fiber using two-photon absorption process in a silicon avalanche photodiode. In: *2017 22nd Microoptics Conference (MOC)* [online]. IEEE, 2017, 2017, s . 218-219 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.23919/MOC.2017.8244565. ISBN 978-4 -8634-8609-6 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8244565/>
- [4] LUCKI, M. *Dispersion Effects of Fiber Bending Performed on Microstructured Fiber*. In: Acta Electrotechnica et Informatica. 2011, vol. 11, no. 2, p. 37-43. ISSN 1335-8243
- [5] DILENDORFS, Valts, Mareks PARFJONOVŠ, Anita ALSEVSKA, Sandis SPOLITIS a Vjaceslavs BOBROVS. *Influence of dispersion slope compensation on 40 Gbit/s WDM-PON transmission system performance with G .652 and G .655 optical fibers*. In: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL) [online]. IEEE, 2017, 2017, s . 598-604 [cit. 2018-03-26]. DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293207. ISBN 978-1 -5386-1211-8 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8293207/>
- [6] LUCKI, M., ZEMAN, T. *Dispersion Compensating Fibres for Fibre Optic Telecommunication Systems*. In: Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications. Rijeka: InTech, 2015 [cit. 2018-5-16]
- [7] HABIB, SALIM J., HABIB, SAMIUL, M., HASAN, M., I., NAMIHIRA., Y. Microstructure holey fibers as wideband dispersion compensating media for high speed transmission system [online]. 1. 11. 2013 [cit. 2018-5-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402613004701>
- [8] ČEPA, L ., M . LUCKI a J . HÁJEK. Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u klasického optického jednovidového vlákna [online]. 03. 02. 2010 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=porovnani-metod-kompenzace-chromaticke-disperze-u-klasickeho-optickeho-jednovidoveho-vlakna&cisloclanku=2010020001>
- [9] G .652 : Characteristics of a single-mode optical fibre and cable [online]. 12. 5 . 2017 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en>
- [10] G .655 : Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable [online]. 19. 5 . 2010 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200911-I/en>
- [11] SÝKORA, Jan. Typy a vlastnosti optických vláken: Přehled základních vlastností optických vláken a rozbor jejich druhů používaných pro vlnový muldex WDM [online]. 28. 07. 2004 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=typy-a-vlastnosti-optickyh-vlakn&cisloclanku=2004072802>

- [12] FAISAL, Mohammad, Mashad Uddin SALEH, Iqbal HASAN a Nabeela KAUSER. Effect of FWM in dispersion-managed ultra-high speed DWDM transmission system. In: 2012 International Symposium on Telecommunication Technologies [online]. IEEE, 2012, 2012, s . 35-37 [cit. 2018-03-30]. DOI: 10.1109/ISTT.2012.6481560. ISBN 978-1-4673-4786-0 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6481560/>
- [13] FERREIRA, Mário F . S . Nonlinear effects in optical fibers. Washington, D .C .: Optical Society of America, c2011. ISBN 0470464666.
- [14] AGRAWAL, G . P . Applications of nonlinear fiber optics. 2nd ed. Boston: Elsevier, c2008. ISBN 9780123743022.
- [15] G .694.2 : Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid [online]. 17. 2 . 2004 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/en>
- [16] G .695 : Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications [online]. 27. 3 . 2015 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.695-201501-I/en>
- [17] G .671 : Transmission characteristics of optical components and subsystems [online]. 13. 2 . 2012 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.671-201202-I/en>
- [18] G .694.1 : Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid [online]. 15. 6 . 2012 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>
- [19] RSoft Design Group, Inc. *OptSim User Guide*. ©1989-2010.
- [20] G .984.2 : Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification [online]. 31. 10. 2003 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2-200303-I/en>
- [21] Forghieri, F .; Tkach, R .; Chraplyvy, A .; aj.: Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM systems using unequally spaced channels. IEEE Photonics Technology Letters, rok vol. 6 , ssue 6 , 1994: s . 754–756. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=300184>
- [22] ElRazak, B . K . A .; Saleh, M . B .; Aly, M . H .: Duobinary modulation format and unequal channel spacing integration to suppress four-wave mixing crosstalk in WDM systems. 2011 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC), 2011: s . 1 –5 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5876926>
- [23] YU, Changyuan, Lei XU, Ezra IP, Philip Nan JI, Ting WANG, Shuji MURAKAMI, Yutaka YANO a Tsutomu TAJIMA. Comparison of Modulation Formats for 40-Gbit/s DWDM Optical Fiber Transmission Systems with 50-GHz Channel Spacing. In: 2006 IEEE Sarnoff Symposium [online]. IEEE, 2006, 2006, s . 1 -4 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/SARNOF.2006.4534719. ISBN 978-1-4244-0002-7 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4534719/>
- [24] DAIKOKU, M ., N . YOSHIKANE a I . MORITA. Performance comparison of modulation formats for 40 Gbit/s DWDM transmission systems. In: OFC/NFOEC Technical Digest. Optical Fiber Communication Conference, 2005 [online]. IEEE, 2005, 2005, 3 pp. Vol. 6 - [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/OFC.2005.193155. ISBN 1-55752-783-0 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1499748/>
- [25] KATSAROS, G ., P .M . LANE a M . MURPHY. A comparison of the impact of FWM on binary, duobinary and dicode modulation in DWDM systems. In: LEOS 2000. 2000 IEEE Annual Meeting Conference Proceedings. 13th Annual Meeting. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting (Cat. No.00CH37080) [online]. IEEE, 2000, s . 27-28 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/LEOS.2000.890656. ISBN 0-7803-5947-X . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/890656/>
- [26] SHARMA, Neeraj, Robin VIJ a Neha BADHAN. Enhanced spectral efficiency for intensity modulated DWDM systems. In: 2015 Twenty First National Conference on



- Communications (NCC) [online]. IEEE, 2015, 2015, s . 1 -6 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/NCC.2015.7084818. ISBN 978-1 -4799-6619-6 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7084818/>
- [27] ASIF, Rameez, Chien-Yu LIN a Bernhard SCHMAUSS. Numerical evaluation of robust and spectrally efficient 112Gbit/s transmission employing digital backward propagation. In: 2012 Photonics Global Conference (PGC) [online]. IEEE, 2012, 2012, s . 1 -5 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/PGC.2012.6457922. ISBN 978-1 -4673-2516-5 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6457922/>
- [28] GHONIEMY, Samy, Karim F . GEORGE a Leonard MACEACHERN. Performance Evaluation and Enhancements of 42.7 Gb/s DWDM Transmission System Using Different Modulation Formats. In: 2011 Ninth Annual Communication Networks and Services Research Conference [online]. IEEE, 2011, 2011, s . 189-194 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/CNSR.2011.35. ISBN 978-1 -4577-0040-8 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5771210/>
- [29] FAISAL, Mohammad, Tahsin FARUQUE a M . Arafat Rahman KHAN. Post mitigation performance comparison of RZ-DPSK and CSRZ-DPSK DWDM systems. In: 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering [online]. IEEE, 2014, 2014, s . 433-436 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/ICECE.2014.7026971. ISBN 978-1 -4799-4166-7 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7026971/>
- [30] MANZOOR, Habib Ullah, Abaid Ullah SALFI, Tayyab MEHMOOD a Tareq MANZOOR. Reduction of Four Wave Mixing by employing circular polarizers in DWDM optical networks. In: *2015 12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)* [online]. IEEE, 2015, 2015, s . 637-640 [cit. 2018-05-09]. DOI: 10.1109/IBCAST.2015.7058574. ISBN 978-1 -4799-6369-0 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7058574/>
- [31] SABAT, Naba Krushna, B . Srinivas RAO a Bijayananda PATNAIK. Reduction of fwm effect in fiber optic communication system by using dpddmz and circular polarization. In: *2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*[online]. IEEE, 2017, 2017, s . 1946-1950 [cit. 2018-05-09]. DOI: 10.1109/ICACCI.2017.8126130. ISBN 978-1 -5090-6367-3 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8126130/>
- [32] ABD, Haider. J ., N .M . DIN, M . H . AL-MANSOORI, F . ABDULLAH a H . A . FADHIL. Mitigation of FWM crosstalk in WDM system using polarization interleaving technique. In: *2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP)* [online]. IEEE, 2013, 2013, s . 117-119 [cit. 2018-05-09]. DOI: 10.1109/ICP.2013.6687086. ISBN 978-1 -4673-6075-3 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6687086/>
- [33] KIRSTÄDTER, A . *Photonische Netze: Beiträge der 16. ITG-Fachtagung, 7.-8. Mai 2015, Hochschule für Telekommunikation Leipzig*. Berlin: VDE Verlag, 2015. ISBN 978-3 -8007-3938-7 .
- [34] DOCHHAN, Annika, Helmut GRIESSER, Nicklas EISELT, Michael H . EISELT a Jorg-Peter ELBERS. Solutions for 80 km DWDM Systems. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2016, 34(2 ), 491-499 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/JLT.2015.2503049. ISSN 0733-8724. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7335553/>
- [35] ALIFDAL, Hanane, Farid ABDI a Fouad Mohammed ABOU. Performance analysis of an 80Gb/s WDM system using OQPSK modulation under FWM effect and chromatic dispersion. In: 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS) [online]. IEEE, 2017, 2017, s . 1 -6 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1109/WITS.2017.7934663. ISBN 978-1 -5090-6681-0 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7934663/>
- [36] ALEKSEJEVA, Marina a Sandis SPOLITIS. Performance investigation of dispersion compensation methods for WDM-PON transmission systems. In: *2017*

*Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)* [online]. IEEE, 2017, 2017, s . 2437-2442 [cit. 2018-05-10]. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262160. ISBN 978-1-5090-6269-0 . Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8262160/>  
[37] Coriant Groove G30 NETWORK DISAGGREGATION PLATFORM. *Coriant* [online]. 2016 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.coriant.com/products/coriant-groove-g30-network-disaggregation-platform>

