

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
Fakulta elektrotechnická

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Martin Plinta



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra telekomunikační techniky**

**EXPERIMENT A MODELOVÁNÍ JEVU ČTYŘVLNNÉHO SMĚŠOVÁNÍ U  
OPTICKÝCH SÍTÍ S HUSTÝM VLNOVÝM MULTIPLEXEM**

**květen 2015**

**Diplomant:**

**Bc. Martin Plinta**

**Vedoucí práce:**

**Ing. Michal Lucki, Ph.D.**

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací zpracoval sám s přispěním vedoucího práce 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: 11.5.2015

.....

podpis diplomanta

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Luckimu, Ph.D. za vedení mé diplomové práce. Za cenné rady a připomínky při vytváření diplomové práce a za ochotu a vstřícnost projevenou během celé doby zpracovávání. A v neposlední řadě svým rodičům, že mi umožnili studium na vysoké škole, a všem, kteří mě během studia podporovali.

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Plinta Martin**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Experiment a modelování jevu čtyřvlňného směšování u optických sítí s hustým vlnovým multiplexem**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je experiment a simulace jevu čtyřvlňného směšování (FWM) v optických sítích. Dílčím cílem jsou simulace jevů čtyřvlňného směšování v optických sítích s hustým vlnovým multiplexem, které dosahují rychlosti 1 Tb/s, které lze dosáhnout nominální rychlostí přesahující 10 G na kanál a použitím několika desítek kanálů. Vybuzení jevu FWM je možné díky vhodné volbě optických vláken z pohledu disperze a vysokých optických výkonů, které jsou typické u dálkových přenosů. Simulace bude doprovázet optimalizační a investigativní studium problému uvedeného do kontextu optických systémů, včetně parametrizace a návrh řešení pro vysokorychlostní systém nad 1 Tb/s bez výskytu jevu FWM. Dalším cílem je experiment - vybuzení FWM v cílce s vláknem s téměř nulovou disperzi a porovnání výsledku se simulacemi, s použitím dostupných laserů, vláken a spektrálního analyzátoru.

Seznam odborné literatury:

- [1] Agrawal, G.P., Lightwave Technology: Telecommunication Systems, Wiley Interscience, USA, New Jersey, 2005.
- [2] Freude W., Schmogrow R.: Quality Metrics for Optical Signals: Eye Diagram, Q-factor, OSNR, EVM and BER, in Proceedings of 14th International Conference on Transparent Optical Networks, Coventry, England, paper Mo.B1.5, 2012.
- [3] Aissa, S., Maier, M., Towards Seamless Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks: Convergence and Challenges. In Proceedings of ICTON Mediterranean Winter Conference, paper Sa2.2, pp. 1-6, 2007

Vedoucí: Ing. Michal Lucki, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Boris Šimák, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 19. 11. 2014

**Anotace:**

Tato diplomová práce se zabývá studiem nelineárního jevu čtyřvlnného směšování v optických sítích. V práci je představeno několik simulací čtyřvlnného směšování v závislosti na různých parametrech. Tyto simulace jsou prováděny v programu OptSim. Dále je popsán provedený experiment v laboratorních podmínkách za účelem vybuzení jevu čtyřvlnného směšování pomocí vysokých výkonových úrovní (přes 0 dBm) a jeho parametrizace.

**Klíčová slova:**

Čtyřvlnné směšování, Multiplex DWDM, Optické vlákno, OptSim, Chybovost BER, Erbium dopovaný vláknový zesilovač

**Summary:**

This final project deals with the nonlinear effect of four wave mixing in optical systems. There is presented several simulations of four wave mixing. The simulations are focused on parameters which has major influence on this effect. As a simulation software is used OptSim. Afterwards is described experiment in laboratory where is used high power level (over 0 dBm) to create four wave mixing and his parametrization.

**Index Terms:**

Four wave mixing, DWDM multiplexing, Optical fiber, OptSim, Bit error rate, Erbium doped fiber amplifier

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
1.1 Cíle práce . . . . .	10
1.2 Organizace práce . . . . .	11
<b>2 Optická komunikace WDM</b>	<b>12</b>
2.1 Optická komunikace . . . . .	12
2.1.1 Typy sdružování . . . . .	12
2.2 Optické nelineární jevy . . . . .	13
2.3 Čtyřvlonné směšování . . . . .	14
2.3.1 Minimalizace FWM jevu . . . . .	15
2.3.2 Aktuální stav problematiky . . . . .	17
<b>3 Simulace FWM</b>	<b>19</b>
3.1 Simulace FWM v závislosti na rozestupu kanálů . . . . .	19
3.1.1 Schématický model . . . . .	20
3.1.2 Simulace . . . . .	20
3.1.3 Vyhodnocení výsledků . . . . .	22
3.1.4 Zhodnocení . . . . .	31
3.2 Simulace FWM v závislosti na výkonu . . . . .	32
3.2.1 Simulace . . . . .	32
3.2.2 Vyhodnocení výsledků . . . . .	33
3.2.3 Zhodnocení . . . . .	42
3.3 Simulace FWM v závislosti na disperzi . . . . .	43
3.3.1 Simulace . . . . .	43
3.3.2 Vyhodnocení výsledků . . . . .	44
3.3.3 Zhodnocení . . . . .	48



<b>4 Experiment</b>	<b>49</b>
4.1 Degenerované FWM - Kanálový rozestup . . . . .	50
4.2 Degenerované FWM - Výkon . . . . .	53
4.3 Normální nedegenerované FWM . . . . .	55
4.4 Porovnání změny laseru . . . . .	58
<b>5 Závěr</b>	<b>60</b>
<b>Literatura</b>	<b>62</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>67</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>69</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Optická vlákna a optické přenosové systémy jsou již nedílnou součástí telekomunikačních spojů, především na dlouhé vzdálenosti. Je to jedno z nejperspektivnějších medií pro přenos, proto je tato problematika velmi aktuální a počítá se s velkým rozvojem optických spojů. Nalezneme mnoho faktorů, které mají negativní vliv na výkon optických systémů. V literatuře již existuje velké množství řešení na kompenzaci těchto faktorů. I když už známe mnoho řešení a postupů pro jednotlivé případy, pořád musíme počítat s obtížemi při návrhu velkých rozlehlých optických sítí s velkou přenosovou rychlostí. Případně u stávajících sítí je možno implementovat nová vylepšení či upravit topologii sítě za účelem vylepšení výkonu systému.

Čtyřvlonné směšování je dobře známý nelineární jev, který byl již zkoumán v optických vláknech. Patří mezi faktory, které neblaze ovlivňují vlastnosti optických systémů. Způsobuje přeslechy mezi kanály a pro rozsáhlé, dlouhé optické přenosové sítě musí být různými metodami kompenzován. Závisí především na dvou činitelích a to jsou disperze a výkon, který se naváže do optického vlákna.

### 1.1 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je studium, simulace a experiment nelineárního jevu čtyřvlonného směšování (FWM) v optických sítích. Jednotlivými úkoly simulace je modelování tohoto jevu čtyřvlonného směšování v optických sítích, které jsou typické pro spoje na velké vzdálenosti. Hlavně se jedná o dnes převážně využívané systémy DWDM, kde přenosové rychlosti dosahují až 1 Tb/s. Takových rychlostí je dosaženo použitím několika desítek kanálů, kde na každý připadá rychlost 10 Gb/s. Cílem této simulace je provést investigaci a optimalizaci čtyřvlonného směšování a dále parametrizovat a navrhnout optimální řešení pro vysokorychlostní systémy tak, aby se tento nežádoucí jev minimalizoval, případně na-

prосто vyloučil. Druhou částí zadání je experiment v laboratorních podmínkách, kde je úkolem vybudit jev čtyřvlenného směšování u optického vlákna s téměř nulovou disperzí. Výstupem je potom srovnání simulací s experimentem a následná parametrizace výsledků a návrh řešení k odstranění FWM jako nežádoucího efektu.

## 1.2 Organizace práce

Úvodní část práce je věnována efektům nelineárního jevu čtyřvlenného směšování a její kompenzaci v optických přenosech. Na ni navazuje přehled aktuálního stavu problematiky, který představuje současné metody sloužící k redukcii čtyřvlenného směšování a použití čtyřvlenného směšování jako prostředek ke konverzi vlnových délek.

Ve třetí kapitole jsou provedeny simulace čtyřvlenného směšování v závislosti na zvolených veličinách a provedení parametrizace získaných výsledků ze simulací.

Ve čtvrté kapitole je popsán experiment, kde je úkolem vybudení jevu čtyřvlenného směšování. Experiment je proveden pro dva typy tohoto jevu, degenerované FWM a ne-degenerované FWM.

Závěr práce obsahuje zhodnocení a srovnání dosažených výsledků ze simulací a experimentu. Dále jsou nastíněny možnosti pokračování výzkumu v této oblasti.

# Kapitola 2

## Optická komunikace WDM

### 2.1 Optická komunikace

Princip vlnového multiplexu WDM (Wavelength Division Multiplex) spočívá ve využití jednoho optického vlákna, do kterého jsou sdružovány jednotlivé kanály o různých vlnových délkách [24]. Vychází z dobře známého principu frekvenčního sdružování signálů FDM v elektrické oblasti, pouze s tou výjimkou, že frekvence jednotlivých nosných kanálů jsou o několik řádů vyšší [7]. Tímto způsobem dochází k lepší účinnosti přenosu, která je charakterizována veličinou spektrální účinnosti a je definována takto [7]:

$$\eta_{WDM} = \frac{C_{WDM}}{B_{WDM}}, \quad [bit.s^{-1}.Hz^{-1}] \quad (2.1)$$

kde  $C_{WDM}$  je celková přenosová kapacita WDM systému a  $B_{WDM}$  je celkové spektrum vyhrazené pro provoz daného WDM systému. Parametr celková přenosová kapacita WDM systému je součet všech přenosových rychlostí jednotlivých kanálů:

$$C_{WDM} = \sum_{k=1}^N N v_{pk} \quad (2.2)$$

kde  $v_{vp}$  je přenosová rychlost k-tého kanálu a  $N$  je celkový počet kanálů WDM systému.

#### 2.1.1 Typy sdružování

##### DWDM

Hustý vlnový multiplex DWDM (Dense WDM), definovaný v doporučení ITU-T G.671 [18], je princip sdružování WDM kanálů s velmi malým vzájemným rozestupem. Doporučení

ITU-T G.694.1 [17] popisuje několik možných variant rozestupů mezi kanály, minimální definovaný rozestup je 12,5 GHz až do 100 GHz a více. V nejnovějším vydání tohoto doporučení je také už definován flexibilní rozestup, tzn. že rozestup není konstantní. Referenční frekvence, od které se potom počítají ostatní frekvence je 193,1 THz. Například pro výpočet ostatních kmitočtů ve flexibilní mřížce platí následující vzorec [17]:

$$f_n = 193,1 + n \times 0,00625 \quad [THz] \quad (2.3)$$

kde  $n$  je kladné nebo záporné celé číslo i nula. A 0,00625 je odstup od jmenovité střední frekvence v THz. Jakákoliv kombinace frekvenčních rozestupů je povolena s tou podmínkou, že se rozestupy nesmí překrývat [17]. Tento systém je většinou používán na vlnových délkách pásem S,L a C. DWDM systémy jsou charakterizovány velkou spektrální účinností a velmi vysokými přenosovými rychlostmi (v řádech Tb). K dosažení těchto vlastností je nutné použití drahých optických komponentů, například chlazených DFB laserů, což se potom projeví ve vysokých nákladech na vybudování tohoto systému [9]. V dnešní době je DWDM preferovaná technologie pro vysokorychlostní optické přenosy, které jsou značně žádány.

## CWDM

Druhým možným způsobem sdružování kanálů je tzv. hrubý vlnový multiplex CWDM (Coarse WDM), kde jsou definovány větší rozestupy kanálů oproti systému DWDM. Z toho vyplývají menší přenosové rychlosti a také nižší spektrální účinnost. Většinou jsou využívány v metropolitních sítích a jsou méně nákladné na vybudování z důvodu možnosti použití méně přesných součástek. Například je možné použít nechlazené lasery, které vykazují nestabilitu vysílané frekvence.

## 2.2 Optické nelineární jevy

Nelineární optické jevy vznikají přirozeně v nelineárním prostředí a patří mezi jednu z mnoha charakteristik optických vláken. Pojmenováváme je podle řádů či podle jejich objevitelů. Jednou z velkých nevýhod je jejich relativně nízká odolnost proti těmto jevům a to může znamenat závažný problém v optickém přenosu, především v systémech s hustým vlnovým multiplexem DWDM, kde jednotlivé kanály mají mezi sebou velmi malé rozestupy (typicky se dnes komerčně používá rozestup 50 GHz), což může vyústit ve velké optické intenzity ve vlákne [21]. Například běžně komerčně používaný 128-mi kanálový systém s rychlostí na kanál 10 Gb/s má díky optickým nelineárním jevům výkonový limit na kanál přibližně -5 dBm a pro celý systém je tato hodnota 16 dBm. Při překročení těchto limitů

mohou nelineární jevy velmi negativně ovlivnit přenosové vlastnosti a kapacitu optického systému [12]. Typy nelineárních jevů [7]:

- Ramanův rozptyl
- Brillouinův rozptyl
- Vlastní fázová modulace - SPM (Self-Phase Modulation)
- Vzájemná fázová modulace - CPM (Cross-Phase Modulation)
- Čtyřvlonné směšování - FWM (Four Wave Mixing)

Na druhou stranu nelineární jevy nemusí být pro optický přenos jenom škodlivé. Existuje už mnoho případů, ve kterých jsou užitečné. Například multiplexace a demultiplexace, regenerace pulsů a podobně [12]. Vývoj a užití nových optických sítí s největší pravděpodobností bude muset brát v potaz tyto nelineární jevy. Najít potřebnou vyrovnanost výhod a nevýhod nelineárních jevů tak, aby se využily všechny možnosti a potenciál, který optické vlákno nabízí.

Parametry na kterých závisí v optickém vlákně nelineární jevy jsou délka vlákna a ploše průřezu vlákna. V rovnici 2.4 je tato závislost popsána [12]:

$$L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (2.4)$$

kde  $L_e$  je efektivní délka,  $L$  je potom linková délka a  $\alpha$  je útlumová konstanta.

## 2.3 Čtyřvlonné směšování

Čtyřvlonné směšování je relativně nový jev, se kterým je nutno počítat při návrhu optických DWDM sítí. Důsledkem tohoto nelineárního jevu jsou přeslechy a přenos energie mezi jednotlivými kanály. Tento efekt vzniká interakcí dvou a více vlnových délek za splnění podmínky fázového souladu. Například použitím jednovidového vlákna je tato podmínka splněna, protože disperze je skoro nula. Toto je důvod, proč se jednovidová vlákna SMF nepoužívají u DWDM systémů v C-pásmu [7]. Proto byla speciálně sestrojena NZ-DSF vlákna, která jsou charakteristická nenulovou hodnotou chromatické disperze. Takže nedojde ke splnění podmínky fázového souladu a k možnosti vzniku přeslechů díky čtyřvlonému směšování se minimalizují.

Čtyřvlonné směšování se dá znázornit jako optické intermodulační zkreslení, které je zapříčiněno nelineárními vlastnostmi optického vlákna. Pokud jsou do optického vlákna

navázány optická záření s libovolnou optickou frekvencí  $f_1, f_2, f_3$  a s dostatečným výkonem, pak tento jev generuje nové záření na frekvencích  $\pm f_1 \pm f_2 \pm f_3$ .

Obecně platí[13]:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \quad \text{kde } i \neq j \neq k \quad (2.5)$$

Z pohledu kvantově-mechanického se čtyřvlonné směšování objeví, když jsou fotony z jedné či více hladin pohlceny a nové fotony jsou vytvořeny na různých frekvencích, takže během interakce jsou energie a hybnost zachovány [23].

Efekt čtyřvlonného směšování oproti SPM a CPM je na přenosové rychlosti systému nezávislý. Naopak je kriticky závislý na vzdálenosti jednotlivých kanálů a disperzi vlákna. Při snížení vzájemných rozestupů kanálů se efekt projevuje více a stejný proces se odehrává i při změně disperze [23].

V obecné rovině lze odvodit vztah pro více vlnových délek, který udává celkový počet vzniklých intermodulačních produktů FWM [1]:

$$M = \frac{(N^2 - 1)N}{2} \quad (2.6)$$

kde N je počet vlnových délek a M je počet vzniklých intermodulačních produktů.

Pro M-kanálový systém vzniká velmi velké množství kombinací, které je způsobeno FWM jevem, jak je vidět z 2.6. V případě konstantních rozestupů mezi kanály většina nově vzniklých záření bude kolidovat s původními kanály a také interferovat se signály v těchto kanálech. Tato interference signálů závisí na posloupnosti bitů a vede k zásadním výkyvům při detekci signálu na straně přijímače. V druhém případě, kdy kanály mají mezi sebou nerovnoměrné rozestupy, většina nově vzniklých záření se bude nacházet mezi původními kanály a bude se chovat jako šum. V obou případech je výkon systému neblaze ovlivněn s tím rozdílem, že u konstantních rozestupů mezi kanály je degradován více, protože vznikají přeslechy mezi kanály [13].

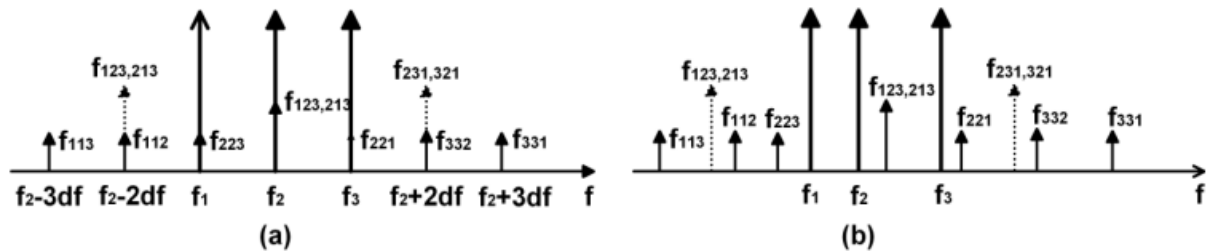
Je tedy zřejmé, že čtyřvlonné směšování může negativně ovlivnit optické přenosy v DWDM systémech, pokud s ním nebudeme dále pracovat.

### 2.3.1 Minimalizace FWM jevu

- Nerovnoměrné rozestupy mezi kanály [11]
- Zvětšení rozestupů mezi kanály
- Snížení výkonu
- Použití pokročilejších modulačních formátů [10]
- Použití vlákna s nenulovou posunutou disperzí

## Nerovnoměrné rozestupy mezi kanály

Technika proměnných rozestupů mezi kanály slouží k minimalizaci přeslechů mezi jednotlivými kanály. Produkty čtyřvlenného směšování nepřekrývají ani jeden z původních kanálů určený pro přenos informace. Je toho dosaženo zvýšením šířky pásma systému. Je dokázáno, že nerovnoměrné frekvenční oddělení jakýchkoliv kanálů v DWDM systému od ostatních má za následek, že produkty generované čtyřvlenným směšováním se nepromítanou do původních kanálů, které slouží k přenosu informace [11]. Metoda, která se používá k návrhu nerovnoměrných rozestupů mezi kanály je zevšeobecnění postupu, který je již znám od padesátých let 20.století a používá se k redukci intermodulační interference v rádiových systémech [5][4].



Obrázek 2.1: FWM efekt s a) rovnoměrnými rozestupy a b) nerovnoměrnými rozestupy mezi kanály [15]

Čtyřvlenné směšování můžeme využít také v pozitivním smyslu. Existují dvě hlavní aplikace čtyřvlenného směšování, stlačení (squeezing) a konverze vlnových délek. Tyto dvě metody jsou níže popsány.



### 2.3.2 Aktuální stav problematiky

Efektu čtyřvlenného směšování je dnes věnována velká pozornost, jelikož se jedná o jeden z hlavních problémů při přenosech v DWDM systémech. Většinou se efekt čtyřvlenného směšování snažíme redukovat. Používají se především dvě metody a to buď použití kanálů s nerovnoměrným rozdělením nebo kompenzace pomocí disperze. Na druhou stranu čtyřvlenné směšování není jenom problémové, můžeme ho například použít k transformaci určitých vlnových délek na jiné.

V roce 1977 A. Yariv et. al. [26] analyzovali několik nových optických jevů, které vyplývají z degenerovaného čtyřvlenného směšování.

Dalším, kdo se snažil popsat tento jev, byl Yasin M. Karfaa et. al. [19], kteří představili teoretickou studii, kde zkoumali přeslechy vlivem čtyřvlenného směšování pro různé typy optických vláken. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí určení průměrné chybovosti BER přenášených optických kanálů za přítomnosti čtyřvlenného směšování.

H. Sunnerud et. al. [25] studovali a kvantifikovali vliv polarizační vidové disperze na čtyřvlenné směšování v DWDM systémech pomocí experimentu.

F. Forghieri et. al. [11] popsali a pomocí simulací ověřili metodu nerovnoměrného rozdělení kanálů, která vede ke snížení efektu čtyřvlenného směšování v DWDM systémech. Ukázali, že v deseti-kanálovém DWDM systému je možné pomocí vhodného výběru vlnových délek kanálů dosáhnout zvýšení vstupního výkonu až o 9 dB. To je získáno z důvodu použití větší šířky pásma.

Yasin M. Karfaa et. al. [19] prezentovali obsáhlou studii, která se týkala vlivu čtyřvlenného směšování na čtyřech různých typech optických vláken. Představili odpovídající soustavu numerických rovnic a popsali fenomén kanálových přeslechů jako čtyřvlenné směšování. Vlastnosti systému ohodnotili pomocí chybovosti BER za přítomnosti jevu čtyřvlenného směšování.

Hwang et. al. [16] provedli srovnání čtyřvlenného směšování pro rovnoměrné a nerovnoměrné rozestupy u dvaceti-kanálového DWDM systému. Dospěli k závěru, že za použití nerovnoměrného rozestupu při vstupní výkonové úrovni kanálů 0 dBm (1 mW) dosáhli chybovosti BER  $0,25 \cdot 10^{-9}$ , což je výrazně lepší než u rovnoměrného rozestupu.

H.U. Manzoor et. al. [20] předložili metodu, která využívá kruhové polarizátory ke změně polarizace vstupních pulzů před samotným multiplexováním, což vede k redukcii čtyřvlenného směšování a vylepšení parametrů optického systému.

A. Bogoni et. al [6] představili měřící techniku ke změření čtyřvlenného směšování v DWDM systémech pomocí vlákna s nenulovou disperzí. Změřili kanálové přeslechy FWM a porovnali o ostatními metodami měření. Zjistili, že navržená metoda má lepší přesnost.

Manisha Ajmani a Preeti Singh [2] předložili stručný popis WDM systémů a nelineárních jevů v nich se vyskytujících. Především se soustředili na čtyřvlenné směšování u kterého provedli teoretickou analýzu různých parametrů, které mají významný vliv na zvyšování

či snižování tohoto jevu. Také uvedli určité techniky vedoucí ke zmírnění čtyřvlenného směšování pomocí optimalizace Q faktoru a chybovosti BER v DWDM systémech.

G. Charlet et. al. [8] posoudili vliv proměnného kanálového rozestupu na Q faktor, kde se předpokládá modulačního formátu RZ-DPSK s kanálovou rychlostí 40 Gbit/s. Pět WDM experimentů bylo provedeno v recirkulační smyčce na zaoceánské vzdálenosti. Pokles Q faktoru skoro o 3 dB byla pozorována při snížení kanálového rozestupu ze 100 na 50 GHz.

J. Zacharias et. al. [27] se snažili spojit použití fázové modulace a vlákná s nenulovou disperzí, které vedou ke snížení čtyřvlenného směšování. Porovnání provedli pomocí simulací pro osmi-kanálový DWDM systém s rychlostí na kanál 10 Gbps a použito bylo vlákno až 50 km dlouhé. Srovnali intermodulační produkty FWM v závislosti na vstupním výkonu pro obě metody.

L. Sharan et. al. [22] prezentovali simulaci DWDM systému pro dlouhé vzdálenosti s celkovou přenosovou rychlostí 1,28 Tb/s za použití Duobinary Return-to-Zero (DRZ) modulace. DWDM systém měl 32 kanálů s kanálovým rozestupem 50 GHz. Výkon tohoto systému byl popsán pomocí Q faktoru v závislosti na změně vstupní výkonové úrovně pro různé vzdálenosti. Bylo zjištěno, že i při výskytu čtyřvlenného směšování má modulace DRZ lepší vlastnosti než použití NRZ/RZ modulací.

J. Zhou et. al. [28] vytvořili teoretickou analýzu a provedli měření díky experimentu, ve kterém zkoumali konverzi optických vlnových délek pomocí čtyřvlenného směšování v polovodičových zesilovačích. V experimentu byla změřena účinnost konverze směrem nahoru i dolů až do 27 nm. Vyšší účinnost u sestupné konverze vlnových délek předpokládali, že je způsobena fázovou interferencí mezi různými mechanismy, které přispívají ke čtyřvlennému směšování.

# Kapitola 3

## Simulace FWM

V této části se budeme věnovat simulacím, ve kterých je úkolem vybuzení jevu čtyřvlenného směšování, a následnému porovnání a vyhodnocení získaných hodnot.

### Simulační programový nástroj OptSim v5.2

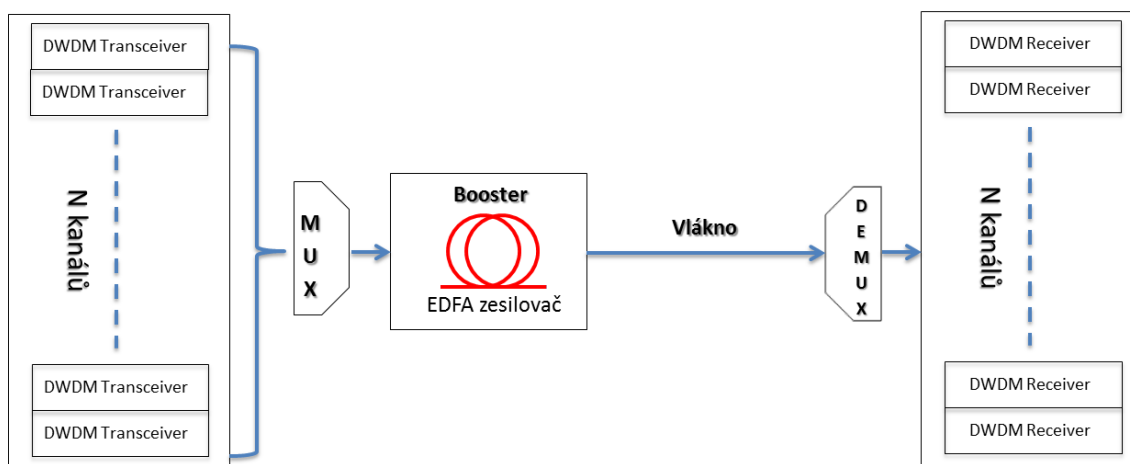
Jedná se o specializovaný programový nástroj vyvinutý společností RSoft Design Group verze 5.2, určený k simulaci a zefektivnění rozsáhlých optických telekomunikačních tras. Tímto softwarem je možné propočítat přesné parametry navrhované sítě s možností ověření reakce zkoumaného systému na různé vnější i vnitřní faktory. Díky takto provedené simulaci sítě je možné odhalit případné nedostatky v návrhu, které by se mohly projevit až po nějaké době od uvedení sítě do provozu.

### 3.1 Simulace FWM v závislosti na rozestupu kanálů

V této simulaci je čtyřvlenné směšování zkoumáno v závislosti na vzájemné vzdálenosti kanálů, protože je vyvíjeno velké úsilí k navyšování přenosových rychlostí a toto je jeden z možných přístupů. Vzájemné rozestupy mezi DWDM kanály jsou rovnoměrné a jejich hodnoty jsou vybírány podle doporučení ITU-T G.694 [17]. Kanálové rozestupy jsou následující 12,5 GHz, 20 GHz, 25 GHz, 30 GHz, 40 GHz, 50 GHz, 75 GHz, a 100 GHz. Výkon takových DWDM systémů je vyhodnocen pomocí výstupních optických spekter, diagramů oka, hodnot chybovosti BER a Q-faktoru.

### 3.1.1 Schématický model

Schématický model pro použití v optických přenosech, který implementuje efekt čtyřvlenného směšování pro různé hodnoty rozestupů mezi kanály jednotlivých kanálů/uživatelů, je znázorněn na obrázku 3.1. Počet kanálů může záviset na různých proměnných například na šířce pásma.



Obrázek 3.1: Schématický model optického systému

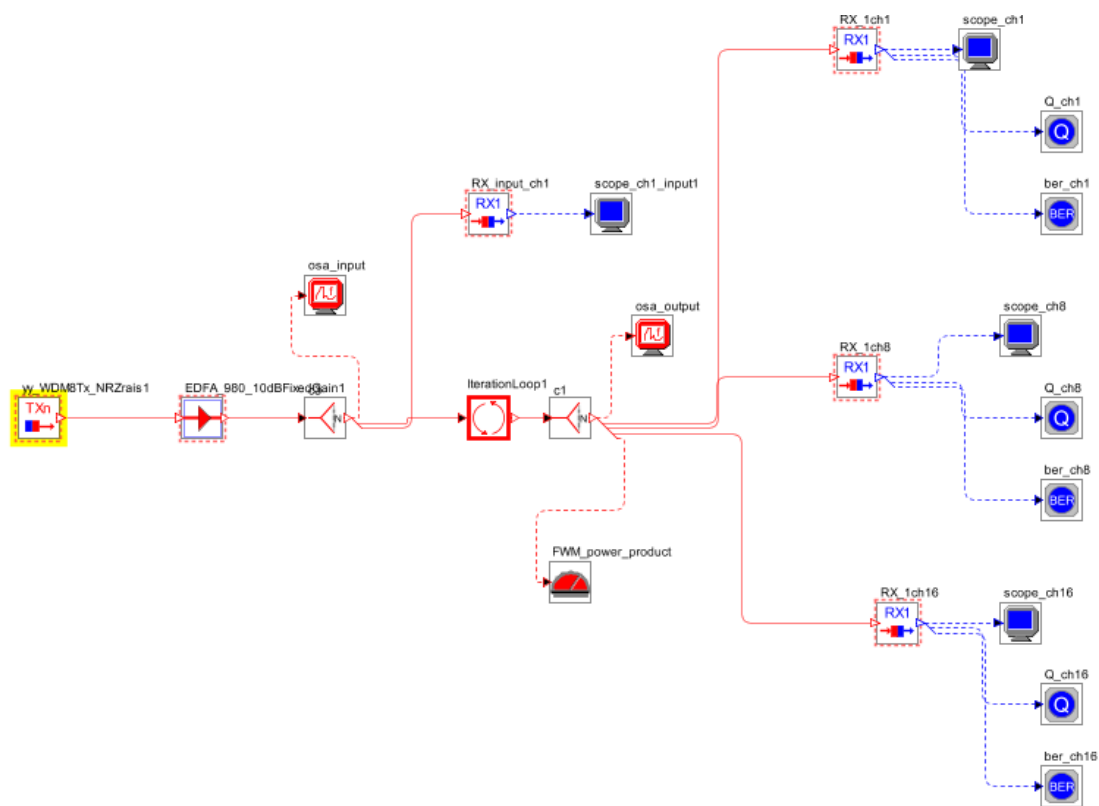
Tento schématický model reprezentuje obecné rozložení prvků pro optickou komunikaci, ve kterém se vyskytují nelineární jevy jako například čtyřvlenné směšování. Použití optických zesilovačů ať už jako booster, linkový zesilovač či předzesilovač je vhodné pro případy přenosů na velké vzdálenosti.

Vysílací část se skládá z laseru, zdroje dat a modulátoru. Vlnové délky jednotlivých kanálů s požadovaným rozstupem, které reprezentují jednotlivé uživatele, jsou potom multiplexorem kombinovány. Dále je signál zesílen a přenesen optickým vláknem, ve kterém vznikají nelineární jevy. Na přijímací straně je signál demultiplexován. Přijímač je sestaven z fotodiody a filtru typu dolní propust.

### 3.1.2 Simulace

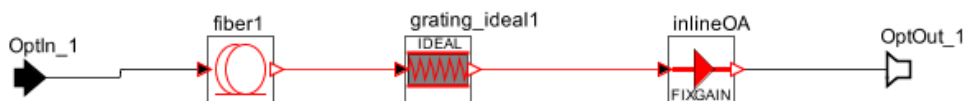
Schéma simulace pro vybuzení čtyřvlenného směšování v závislosti na rozestupech mezi kanály je zobrazeno na obrázku 3.2. Pro dosažení rychlosti přesahující 1 Tb/s je použito 8 kanálů s nominální rychlostí na kanál 10G, což ve výsledku dává celkovou rychlost systému 80 Gb/s. Frekvence prvního kanálu byla zvolena 193.1 GHz (1552.5244 nm). Další kanály jsou pak rozloženy s rozestupy 12,5 GHz, 20 GHz, 25 GHz, 30 GHz, 40 GHz,

50 GHz, 75 GHz a 100 GHz. Zdroj dat je nastaven tak, aby generoval pseudonáhodnou bitovou sekvencí o rychlosti 10 Gbps. Modulace NRZ raised cosine je zvolena jako formát vstupních dat. Modulovaná data ze všech kanálů jsou kombinována pomocí multiplexoru a před navázáním do vlákna jsou zesílena, kvůli kompenzaci ztrát ve vlákne. Signál je potom navázán do vlákna o délce 100 km. Smyčka, ve které je obsaženo vlákno je na obrázku 3.19 a skládá se z vlákna, mřížky sloužící ke kompenzaci disperze a optického zesilovače. Poté následuje zase zesílení signálu pomocí linkového zesilovače a signál je přenesen druhým vláknem opět o délce 100 km. Předzesilovač zase zesílí signál na požadovanou úroveň, aby bylo možné signál analyzovat. Na přijímací straně je signál demultiplexován na jednotlivé kanály. Fotodioda obsažená v přijímači slouží k převodu optického signálu na elektrický. Na výstupu je připojen spektrální analyzátor, který slouží k analýze čtyřvlánného směšování ve frekvenčním spektru. Dále je ještě připojen pro kanály číslo 1, 4 a 8 elektrický analyzátor, který je určen k analýze diagramu oka, chybovosti BER a Q-faktoru. Na začátku trasy je kvůli kontrole vstupního signálu umístěn elektrický analyzátor.



Obrázek 3.2: Schéma simulace

Na obrázku 3.19 je potom znázorněna smyčka, ve které je obsaženo optické vlákno.

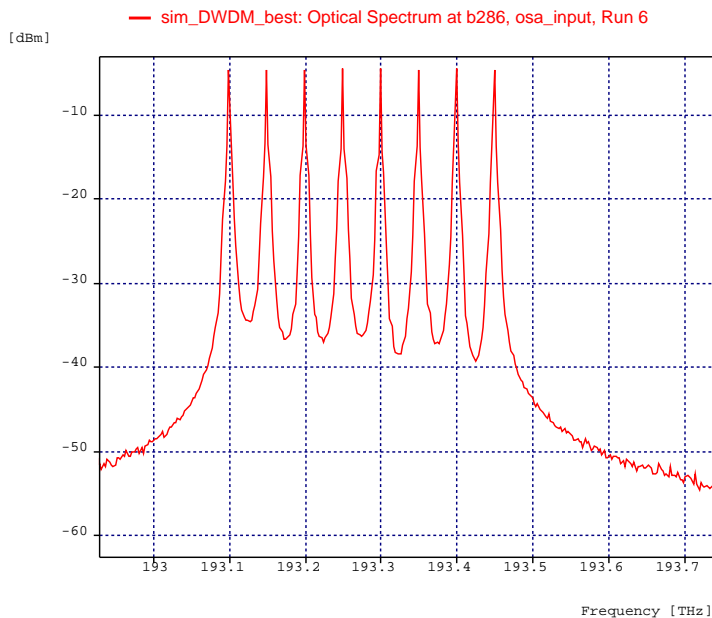


Obrázek 3.3: Smyčka optického vlákna

### 3.1.3 Vyhodnocení výsledků

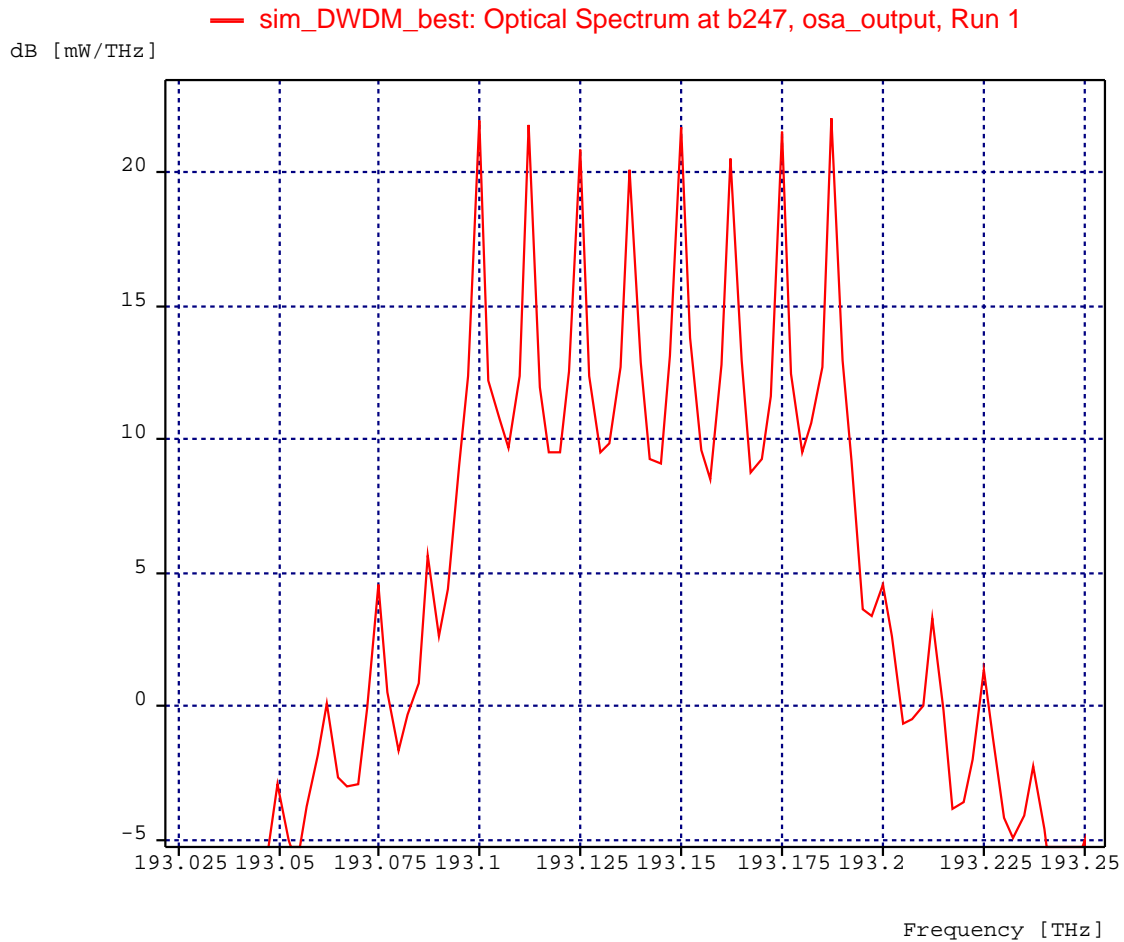
Analýza hodnot získaných pomocí simulací je provedena na základě chybovosti BER, diagramu oka, Q faktoru a dále potom na tvaru vstupního a výstupního optického spektra získaného pomocí optických spektrálních analyzátorů. Chybovost BER, diagram oka a Q faktor jsou měřeny pomocí elektrického analyzátoru.

Na obrázku 3.4 je znázorněno vstupní optické spektrum pro kanálový rozestup 50 GHz. Při změně kanálového rozestupu mezi DWDM kanály, které představují jednotlivé uživatele, jsou vrcholy posunuté na odpovídající frekvence (vlnové délky). Je možné pozorovat, že ve vstupním spektru nenajdeme žádné nechtěné produkty. Simulace je provedena pro 8 DWDM kanálů/uživatelů.



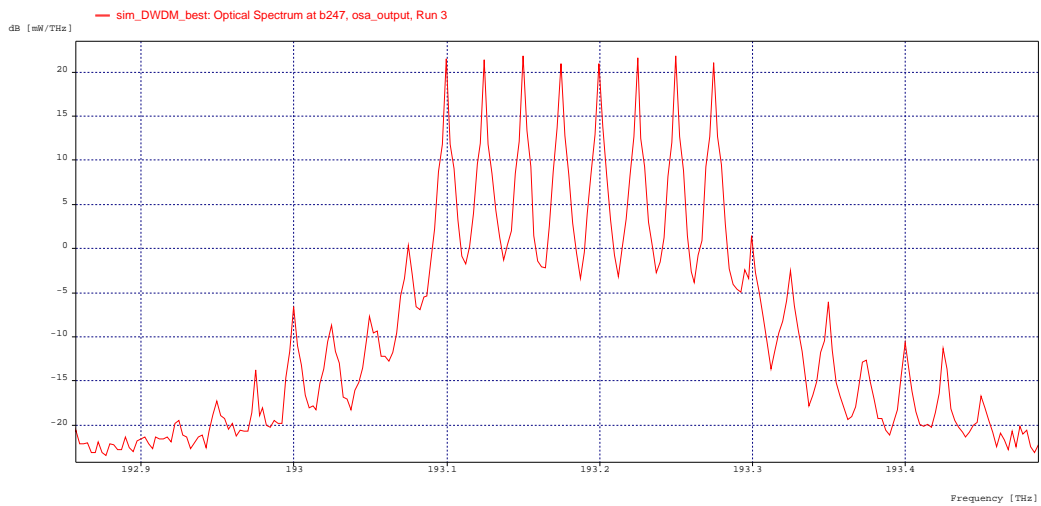
Obrázek 3.4: Vstupní optické spektrum pro kanálový odstup 50 GHz

Na následujících obrázcích je zobrazeno optické výstupní spektrum pro jednotlivé kanálové odstupy. Na obrázku 3.5 je znázorněno výstupní spektrum pro kanálový rozestup 12,5 GHz. Na obrázku 3.6 je výstupní spektrum pro kanálový rozestup 25 GHz. Obrázek 3.7 reprezentuje výstupní spektrum pro kanálový rozestup 40 GHz. Obrázek 3.8 potom výstupní spektrum pro kanálový rozestup 50 GHz. A na obrázku 3.9 je zobrazeno výstupní spektrum pro kanálový rozestup 75 GHz.

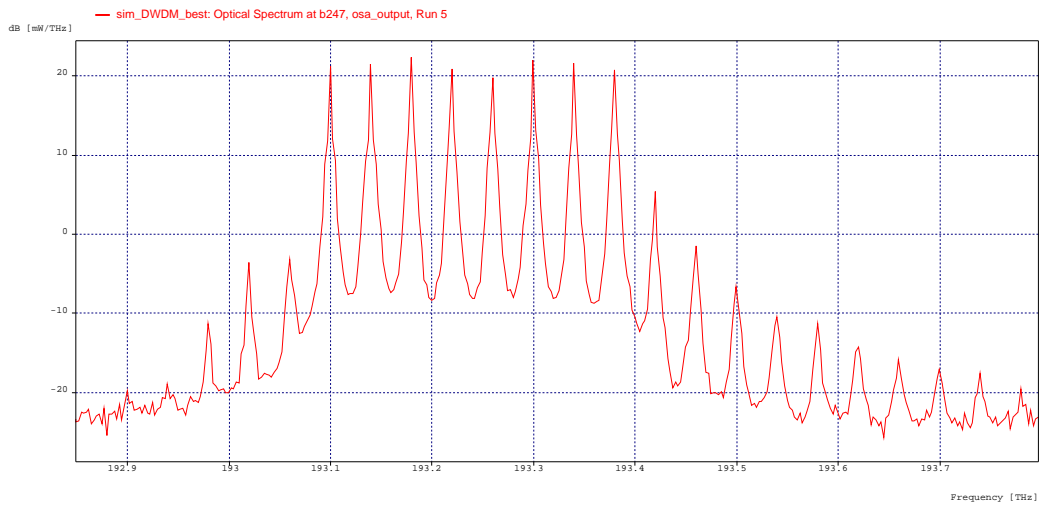


Obrázek 3.5: Kanálový rozestup 12,5 GHz

Efekt čtyřvlenného směšování je velmi zřetelně vidět na výstupním spektru pro kanálový odstup 12,5 GHz jako několik nechtěných vrcholů po obou stranách vstupního spektra. Také díky čtyřvlennému směšování, které se projeví průchodem optického vlákna, jsou pozmeněny vrcholy jednotlivých DWDM kanálů.

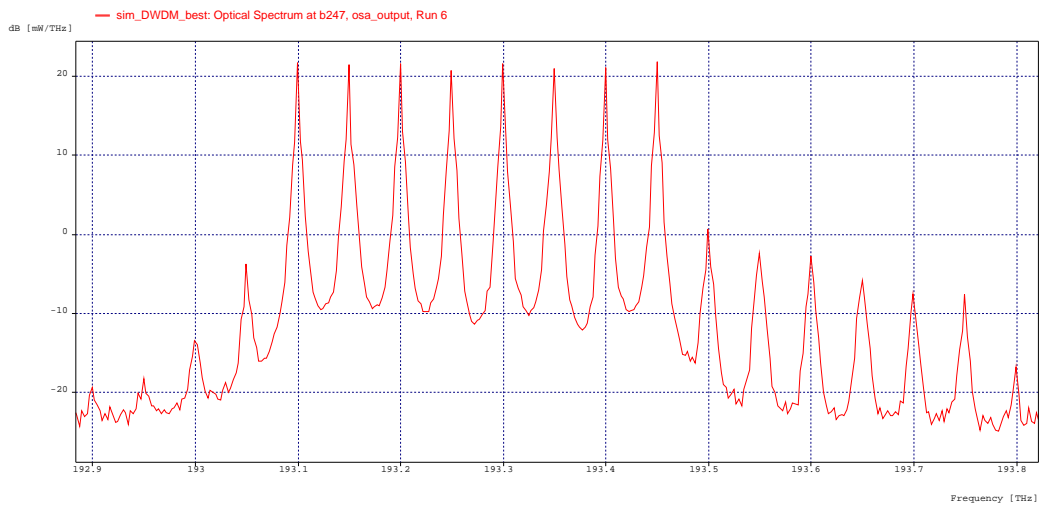


Obrázek 3.6: Kanálový rozestup 25 GHz

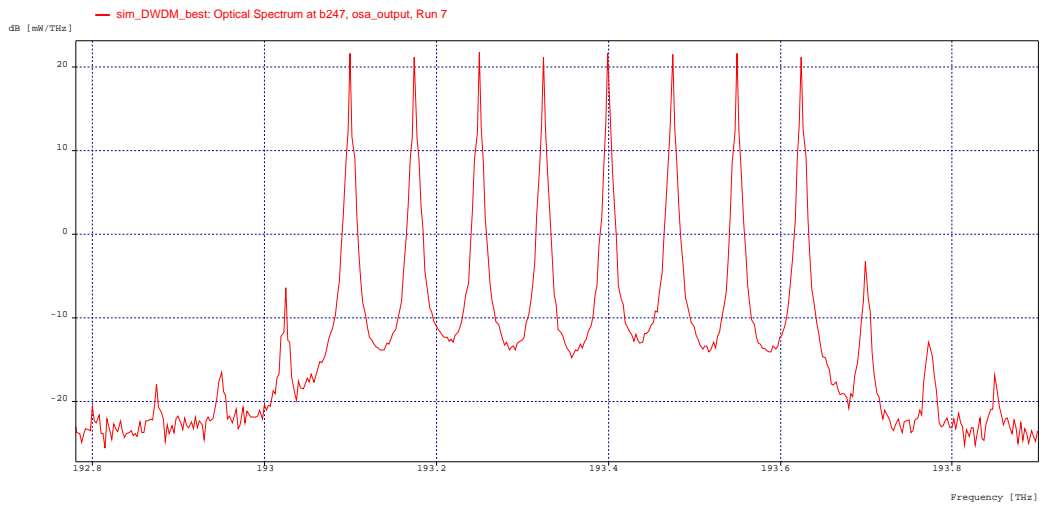


Obrázek 3.7: Kanálový rozestup 40 GHz





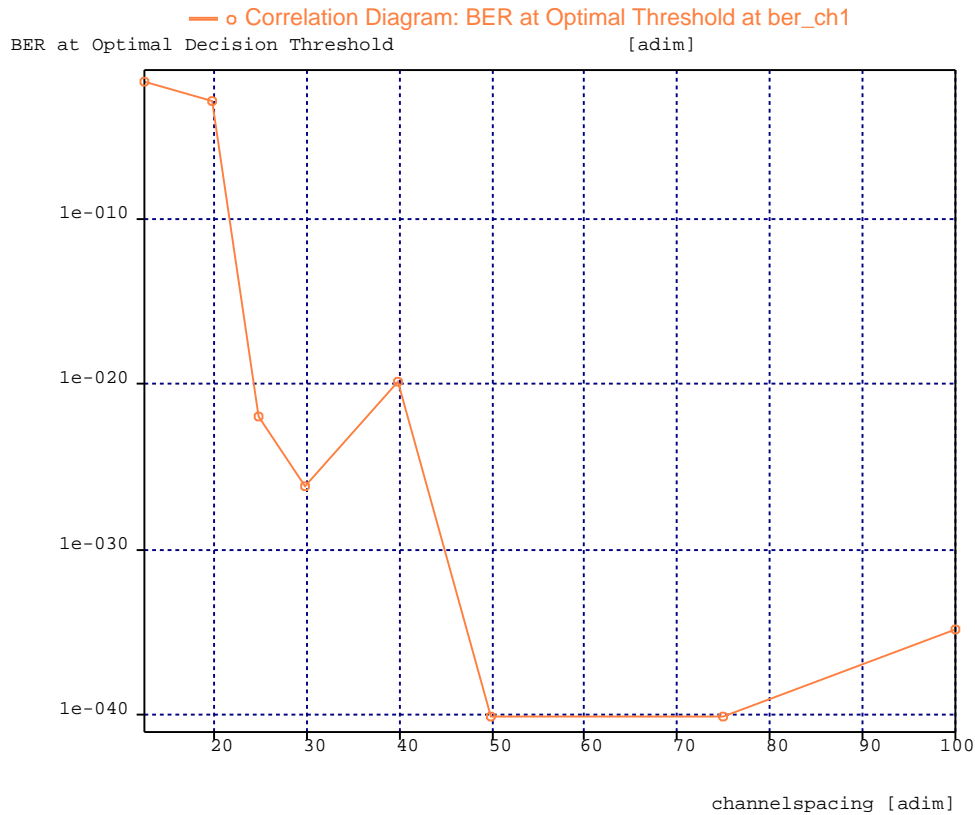
Obrázek 3.8: Kanálový rozestup 50 GHz



Obrázek 3.9: Kanálový rozestup 75 GHz

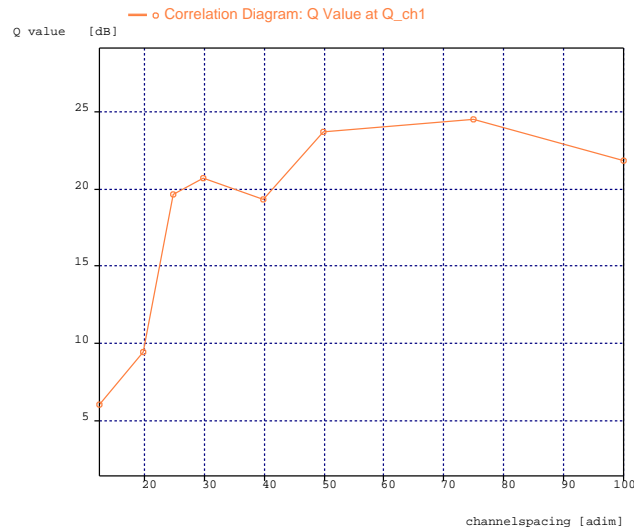
Při pohledu na výstupní optická spektra je jasné, že když snižujeme kanálové rozestupy mezi vstupními DWDM kanály/uživateli, tak efekt čtyřvlenného směšování se projevuje více. Nechtěné vrcholy, které jsou způsobeny právě čtyřvlenným směšováním, jsou nejvýraznější při kanálovém rozestupu 12,5 GHz a nejnižší v případě největšího kanálového rozestupu 100 GHz. Můžeme tedy říci, že čím menší je kanálový rozestup mezi kanály/uživateli, tím jsou přeslechy mezi kanály výraznější, což je vybuzeno právě čtyřvlenným směšováním. V opačném případě se efekt čtyřvlenného směšování zmenšuje.

Na obrázku 3.10 je vidět průběh chybovosti BER v závislosti na změně kanálového rozestupu. Graf ukazuje, že se zvyšujícím se kanálovým rozestupem chybovost BER klesá.

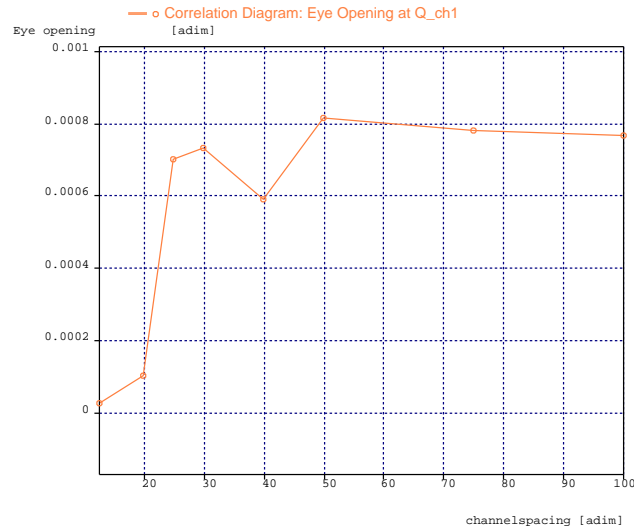


Obrázek 3.10: Chybovost BER v závislosti na kanálovém rozestupu

Obrázek 3.11 popisuje změnu Q faktoru v závislosti na změně kanálového rozestupu. Tento graf ukazuje, že Q faktor je větší při větším kanálovém rozestupu. Maximum nalezneme v hodnotě 75 GHz a naopak minimum při hodnotě kanálového rozestupu 12,5 GHz.



Obrázek 3.11: Q faktor v závislosti na kanálovém rozestupu

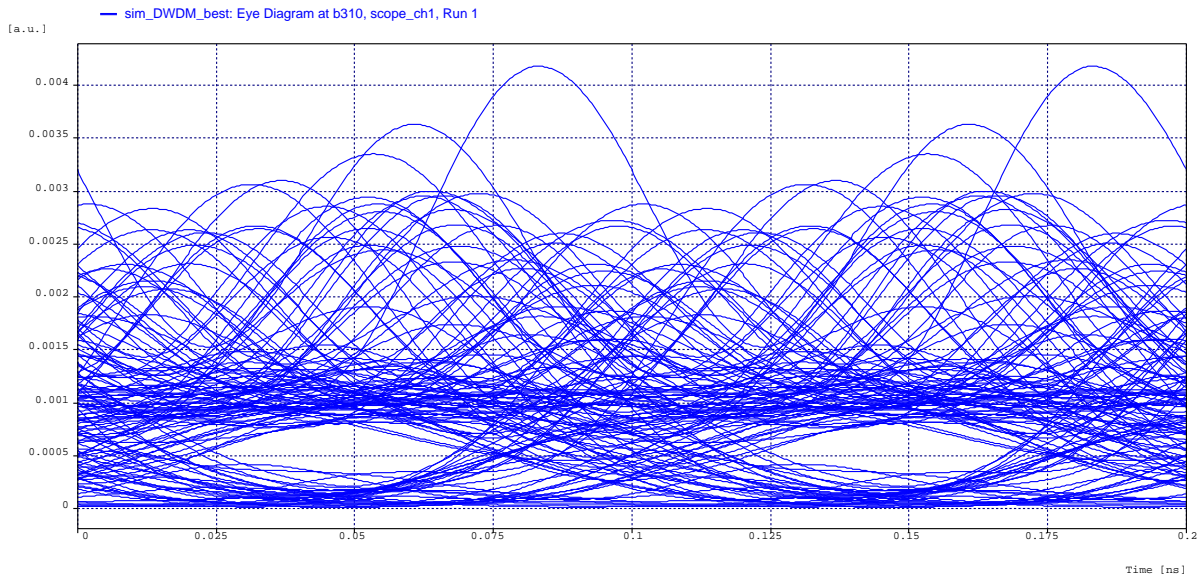


Obrázek 3.12: Diagram oka v závislosti na kanálovém rozestupu

A na obrázku 3.12 je znázorněn diagram oka v závislosti na změně parametru kaná-

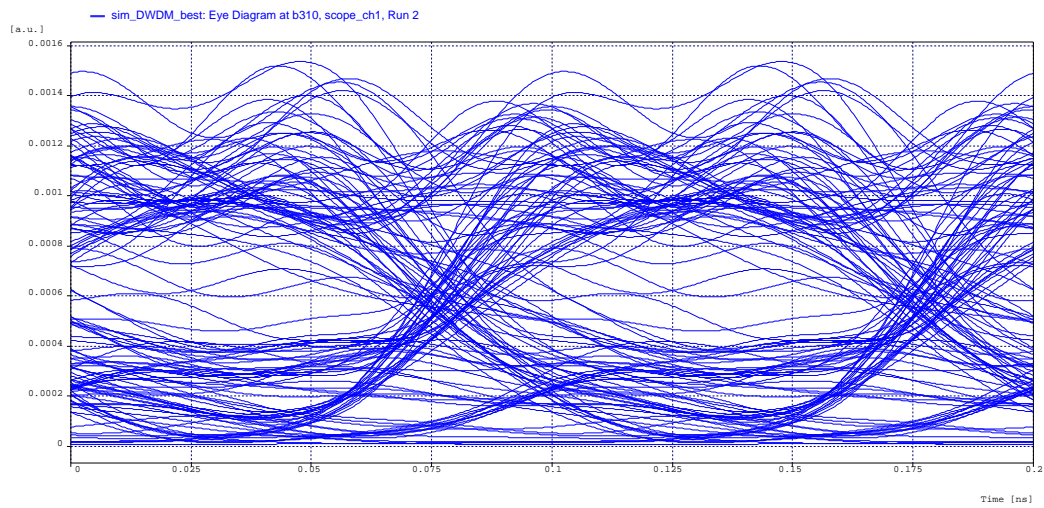
lového rozestupu. Vidíme, že se zvětšujícím se kanálovým rozestupem má diagram oka zvyšující se tendenci a od hodnoty 50 GHz je v podstatě konstantní.

Na následujících obrázcích jsou vidět grafy diagramů oka v závislosti na změně kanálového rozestupu. Obrázek 3.13 znázorňuje diagram oka pro hodnotu kanálového rozestupu 12,5 GHz. Na dalším obrázku 3.14 je vidět diagram oka pro kanálový rozestup 20 GHz. Na dalším obrázku 3.15 je zobrazen diagram oka pro kanálový rozestup 25 GHz. Obrázek 3.16 ukazuje diagram oka pro hodnotu kanálového rozestupu 40 GHz. A na posledním obrázku 3.17 je zobrazen diagram oka pro hodnotu kanálového rozestupu 75 GHz.

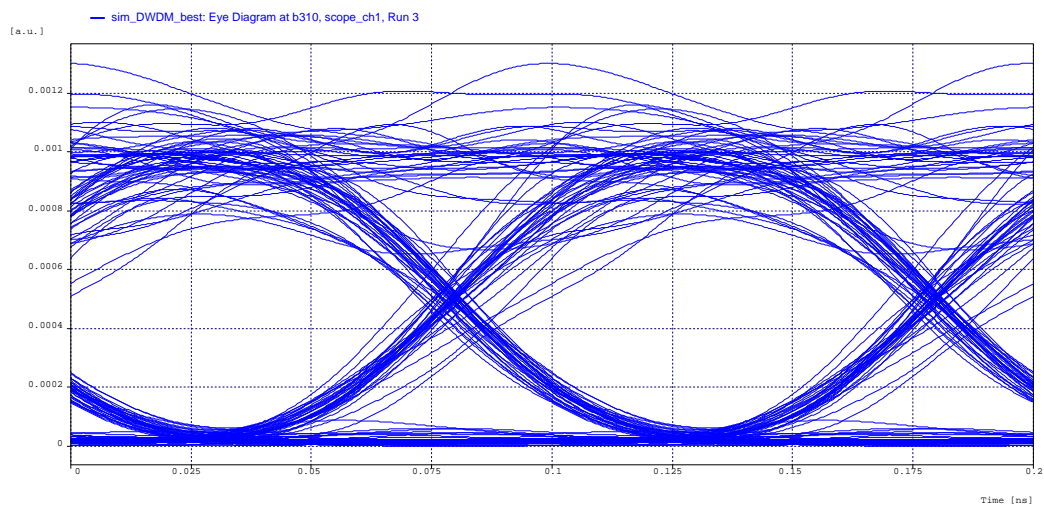


Obrázek 3.13: Diagram oka pro kanálový rozestup 12,5 GHz

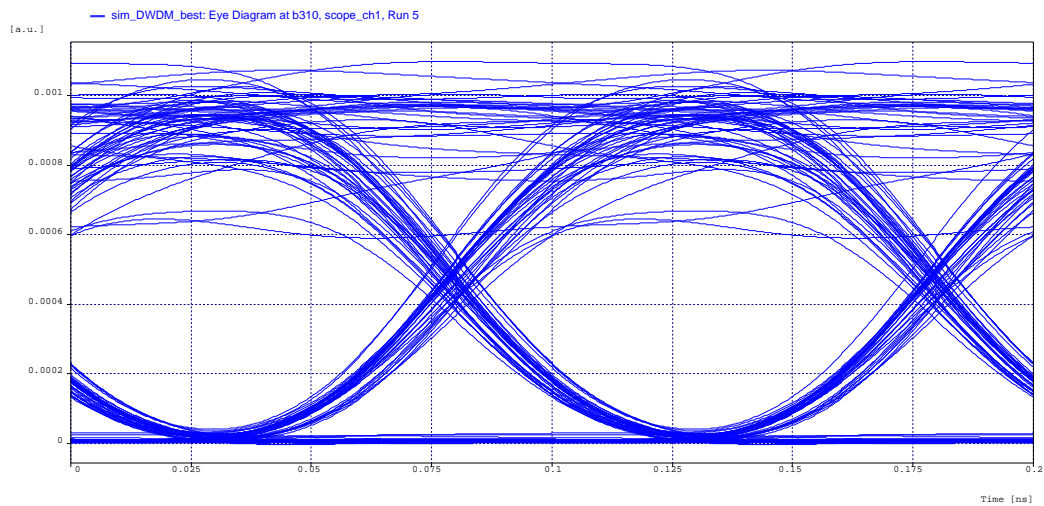
Diagram oka pro kanálový rozestup 12,5 GHz, který je na obrázku 3.13, ukazuje, že přeslechy mezi vstupními kanály jsou velmi výrazné a chybovost BER je tedy velmi vysoká. A tedy efekt čtyřvlňného směšování je velmi výrazný při rozestupu kanálů 12,5 GHz.



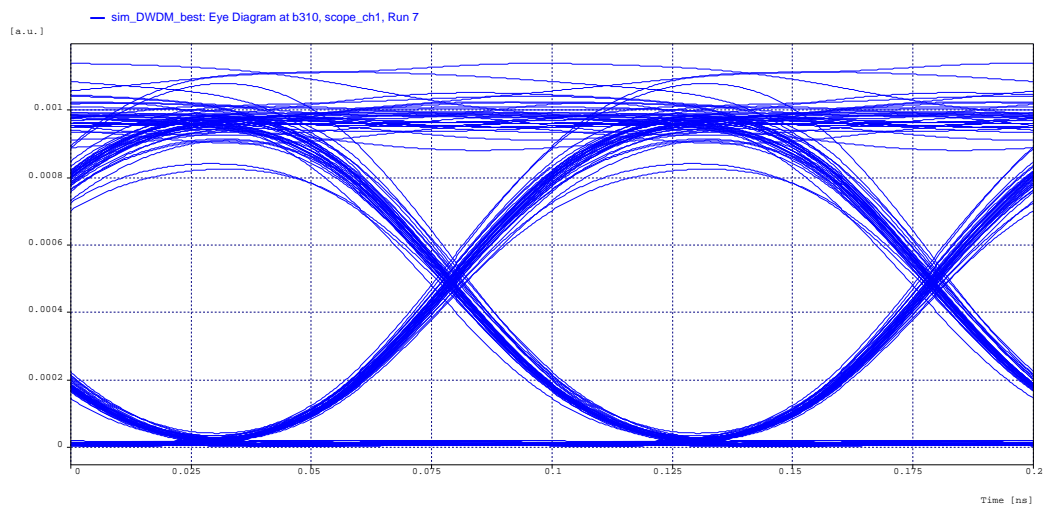
Obrázek 3.14: Diagram oka pro kanálový rozestup 20 GHz



Obrázek 3.15: Diagram oka pro kanálový rozestup 25 GHz



Obrázek 3.16: Diagram oka pro kanálový rozestup 40 GHz



Obrázek 3.17: Diagram oka pro kanálový rozestup 75 GHz

Rozestup [GHz]	BER	Q [lin]	Q [db]
12,5	0,0227501	2	6,6206
20	0,0014725	2,98578	9,501145
25	$1,57348 \cdot 10^{-22}$	9,67216	19,710470
30	$1,01671 \cdot 10^{-26}$	10,8573	20,714429
40	$1,7684 \cdot 10^{-20}$	9,30015	19,369803
50	$1 \cdot 10^{-40}$	15,3863	23,742675
75	$1 \cdot 10^{-40}$	16,7901	24,501060
100	$1,82728 \cdot 10^{-35}$	12,4048	21,871778

Tabulka 3.1: Tabulka výsledků pro změnu kanálového rozestupu

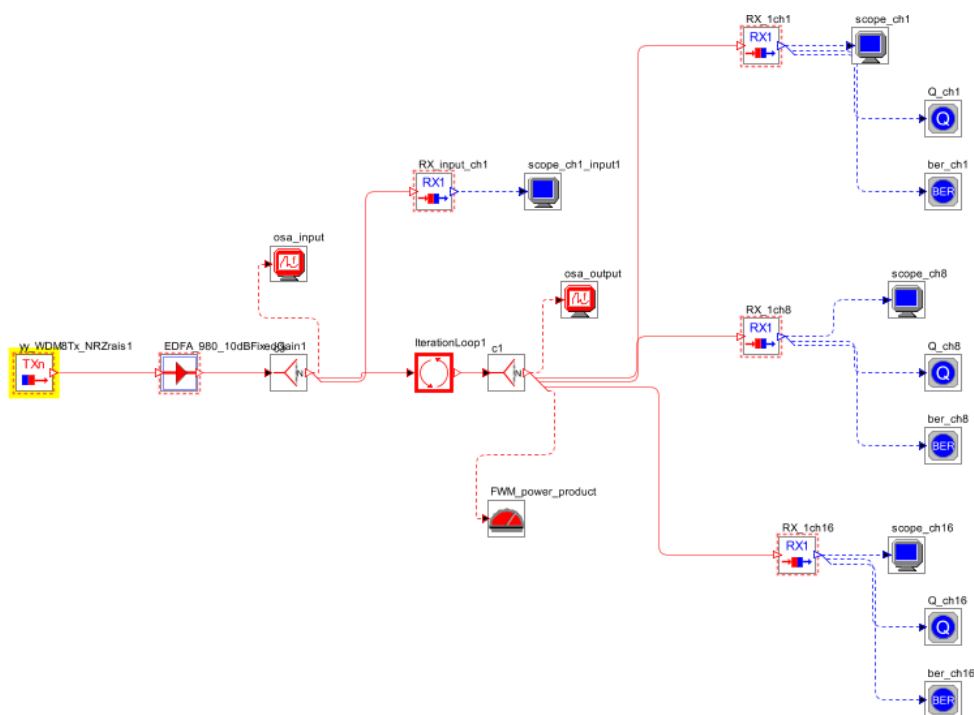
### 3.1.4 Zhodnocení

V této části diplomové práce jsem analyzoval efekt čtyřvlnného směšování v závislosti na různých hodnotách kanálových rozestupů jednotlivých vstupních DWDM kanálů/uživatelů. Při porovnání jednotlivých kanálových rozestupů bylo odhaleno, že rozestup 50 GHz a větší má lepší vlastnosti než nejnižší zkoumaný rozestup 12,5 GHz. Bylo zjištěno, že kanálový rozestup 50 GHz a větší má nejnižší chybovost BER, která se blíží nule, a lepší výkonové parametry pro přenos. Tudíž tedy vyšší hodnoty kanálového rozestupu mezi jednotlivými kanály jsou doporučeny pro optické přenosy na dlouhé vzdálenosti bez výskytu jevu čtyřvlnného směšování. Z grafů pro chybovost BER, Q faktoru a diagramu oka je zřejmé, že čím vyšší kanálový rozestup, tím lepší jsou výkonové a přenosové vlastnosti optického systému.

## 3.2 Simulace FWM v závislosti na výkonu

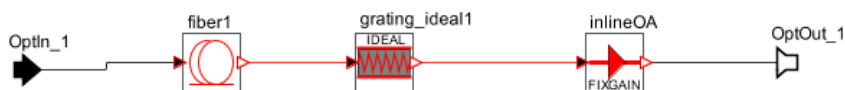
V tomto případě je znázorněn vznik čtyřvlňného směšování v DWDM přenosových systémech v závislosti na výkonu vstupních kanálů. V simulačním programu Optisim si sestavíme blokové schéma 3.18, které podrobíme simulaci. Toto zapojení je stejné jako v předchozím případě. Zapojení se skládá z vysílací části, která je tvořena osmi DWDM kanály, dále potom se skládá z optických vláken s délkou 200 km a přijímací části. V jednotlivých krocích měníme parametr vstupního výkonu.

### 3.2.1 Simulace



Obrázek 3.18: Schéma simulace FWM jevu



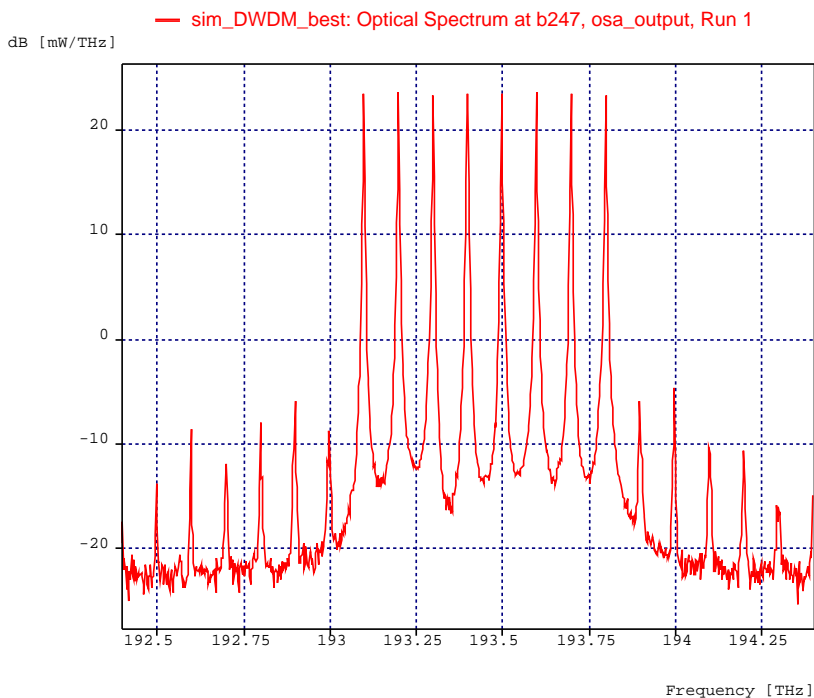


Obrázek 3.19: Smyčka optického vlákna

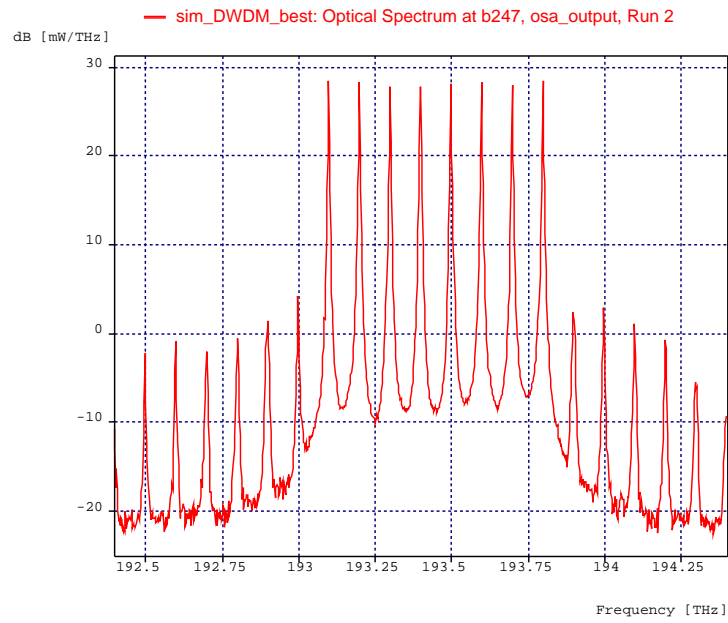
Grid neboli kanálový rozestup je nastaven na 100 GHz. Měníme parametr vstupního výkonu od -5 dBm až do 15 dBm s rozestupem 5 dBm. Vyhodnocení je provedeno na základě výstupních optických spekter a dále potom na grafech diagramu oka a chybovosti BER.

### 3.2.2 Vyhodnocení výsledků

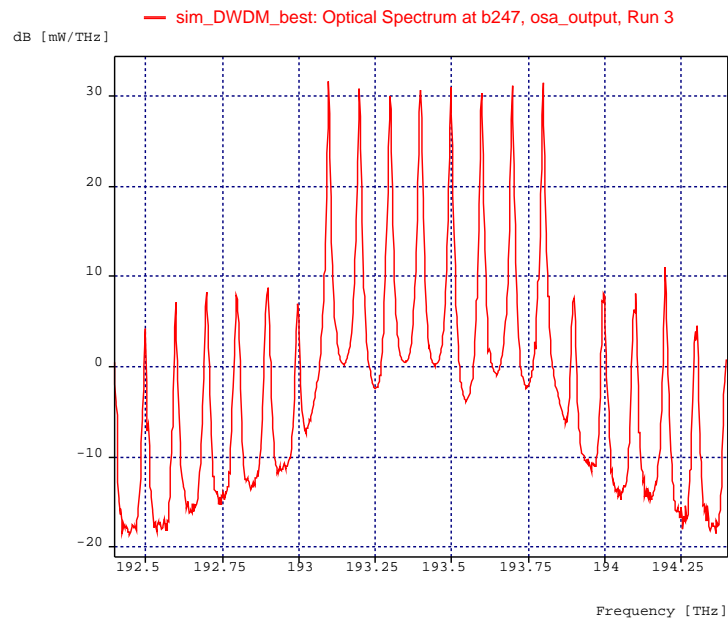
Stejně jako v předchozím případě, tak i u této simulace je vyhodnocení získaných hodnot provedeno na základě chybovosti BER, diagramu oka, Q faktoru a dále potom na základě vstupního a výstupního optického spektra získaného pomocí optických spektrálních analyzátorů. Chybovost BER, diagram oka a Q faktor jsou měřeny pomocí elektrického analyzátoru.



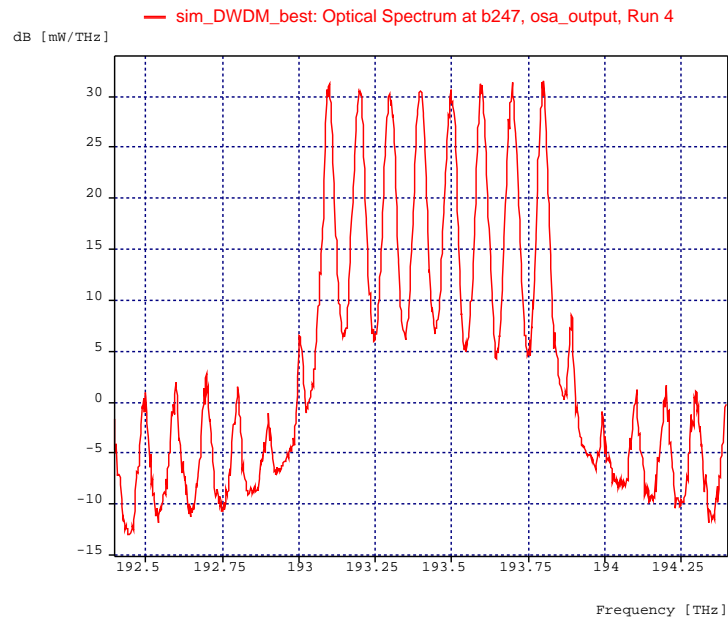
Obrázek 3.20: Výstupní spektrum pro vstupní výkon -5 dBm



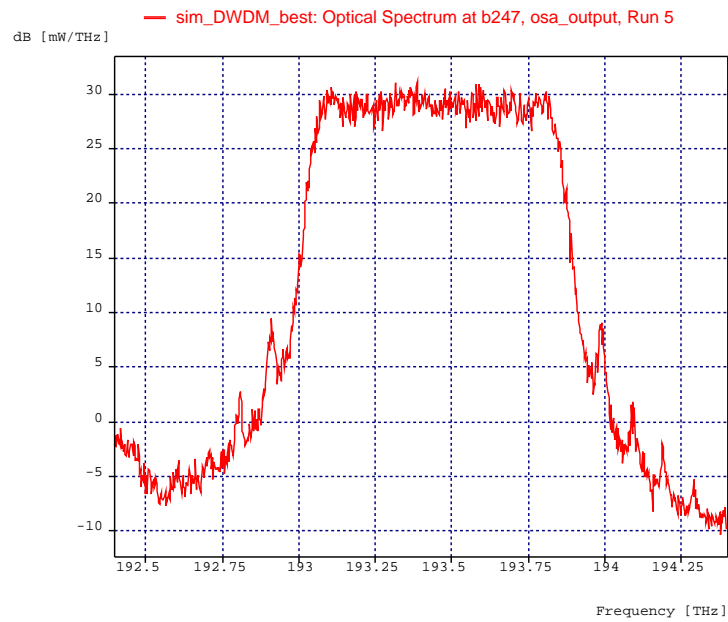
Obrázek 3.21: Výstupní spektrum pro vstupní výkon 0 dBm



Obrázek 3.22: Výstupní spektrum pro vstupní výkon 5 dBm



Obrázek 3.23: Výstupní spektrum pro vstupní výkon 10 dBm



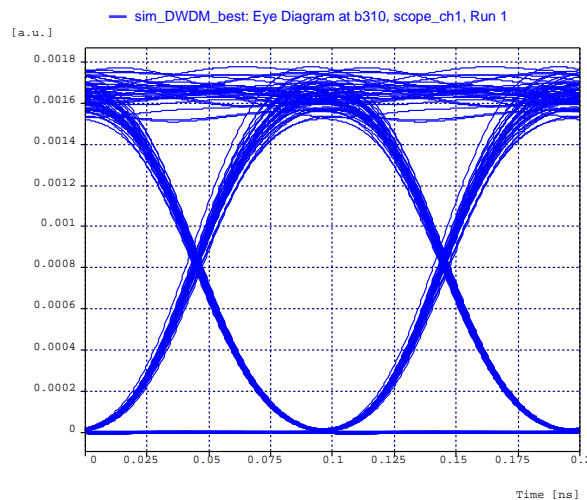
Obrázek 3.24: Výstupní spektrum pro vstupní výkon 15 dBm

Na obrázku 3.20 je vidět výstupní optické spektrum pro výkonovou úroveň -5 dBm. Na dalším obrázku 3.21 je znázorněno výstupní optické spektrum pro výkonovou úroveň 0 dBm. Optické výstupní spektrum pro výkonovou úroveň 5 dBm je zobrazeno na obrázku 3.22. Obrázek 3.23 reprezentuje výstupní optické spektrum pro hodnotu výkonové úrovně 5 dBm. Na posledním obrázku 3.24 lze vidět výstupní optické spektrum pro hodnotu výkonové úrovně 15 dBm.

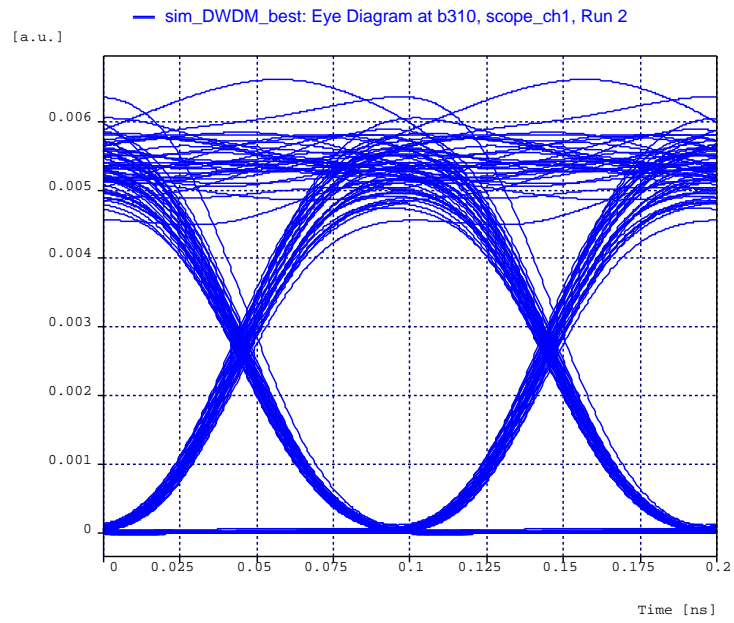
Výkon [dBm]	BER	Q [lin]	Q [db]
-5	$1 \cdot 10^{-40}$	26,0444	28,314298
0	$1 \cdot 10^{-40}$	14,2173	23,056343
5	$1 \cdot 10^{-40}$	15,9555	24,058188
10	$1,31744 \cdot 10^{-21}$	9,68699	19,723773
15	0,0121401	2,21101	6,891810

Tabulka 3.2: Výsledné hodnoty při změně výkonové úrovně

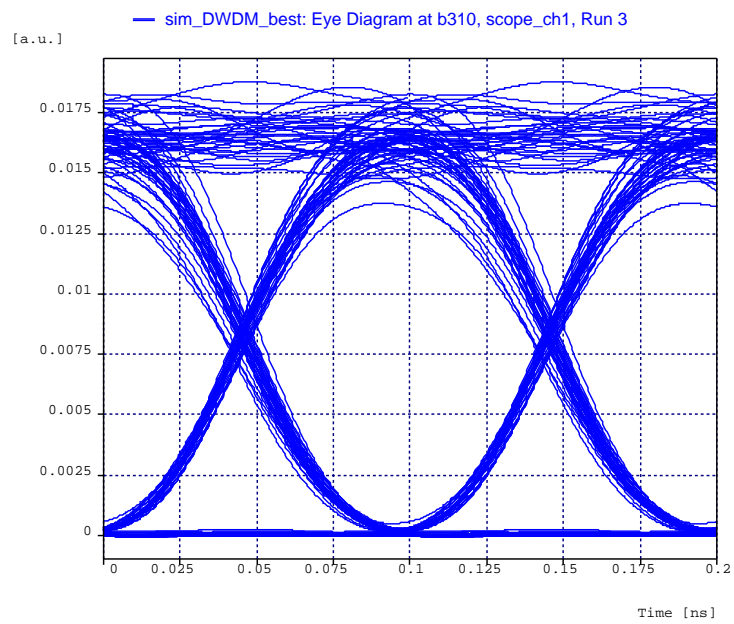
Obrázek 3.25 reprezentuje diagram oka pro hodnotu vstupní výkonové úrovně -5 dBm. Na dalším obrázku 3.26 je zobrazen diagram oka pro vstupní výkonovou úroveň signálu 0 dBm. Obrázek 3.27 znázorňuje digram oka pro vstupní výkonovou úroveň laseru 5 dBm. Hodnota vstupního výkonu pro hodnotu 10 dBm je na obrázku 3.28. A na posledním obrázku 3.29 je vidět diagram oka pro hodnotu vstupní výkonové úrovně 15 dBm.



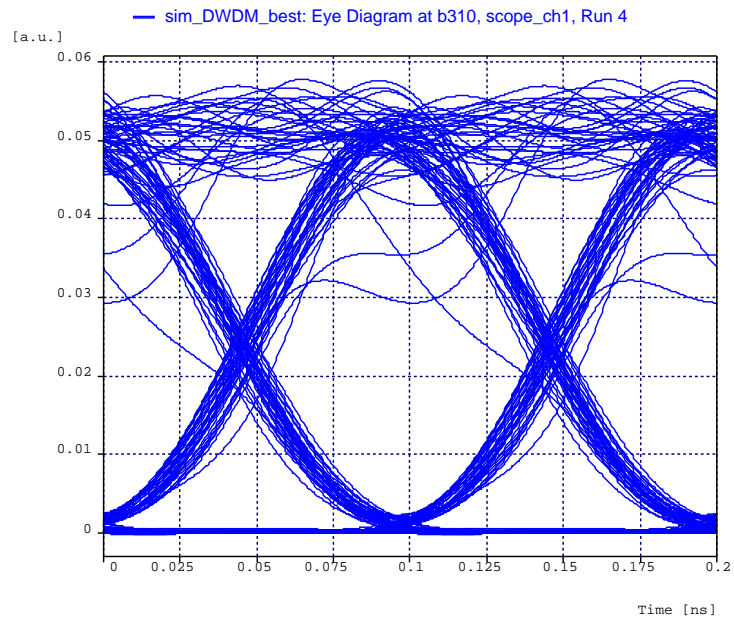
Obrázek 3.25: Diagram oka pro výkonovou úroveň -5 dBm



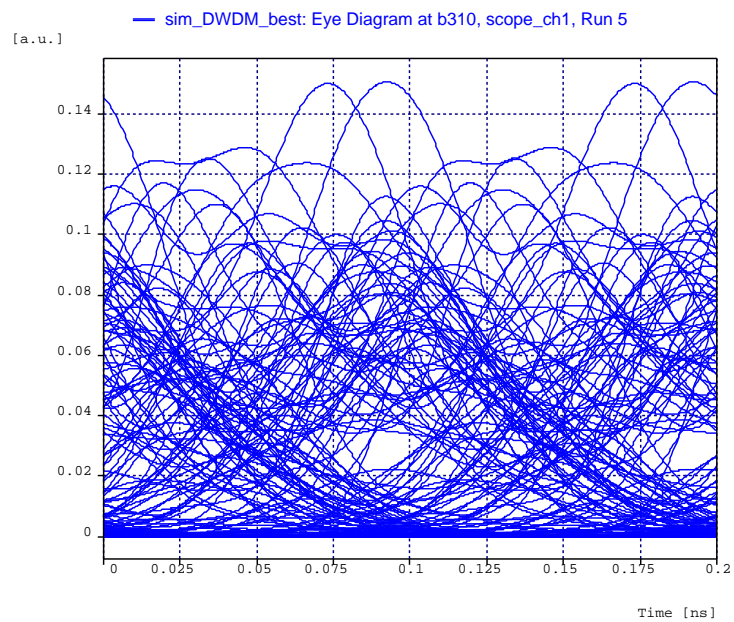
Obrázek 3.26: Diagram oka pro výkonovou úroveň 0 dBm



Obrázek 3.27: Diagram oka pro výkonovou úroveň 5 dBm



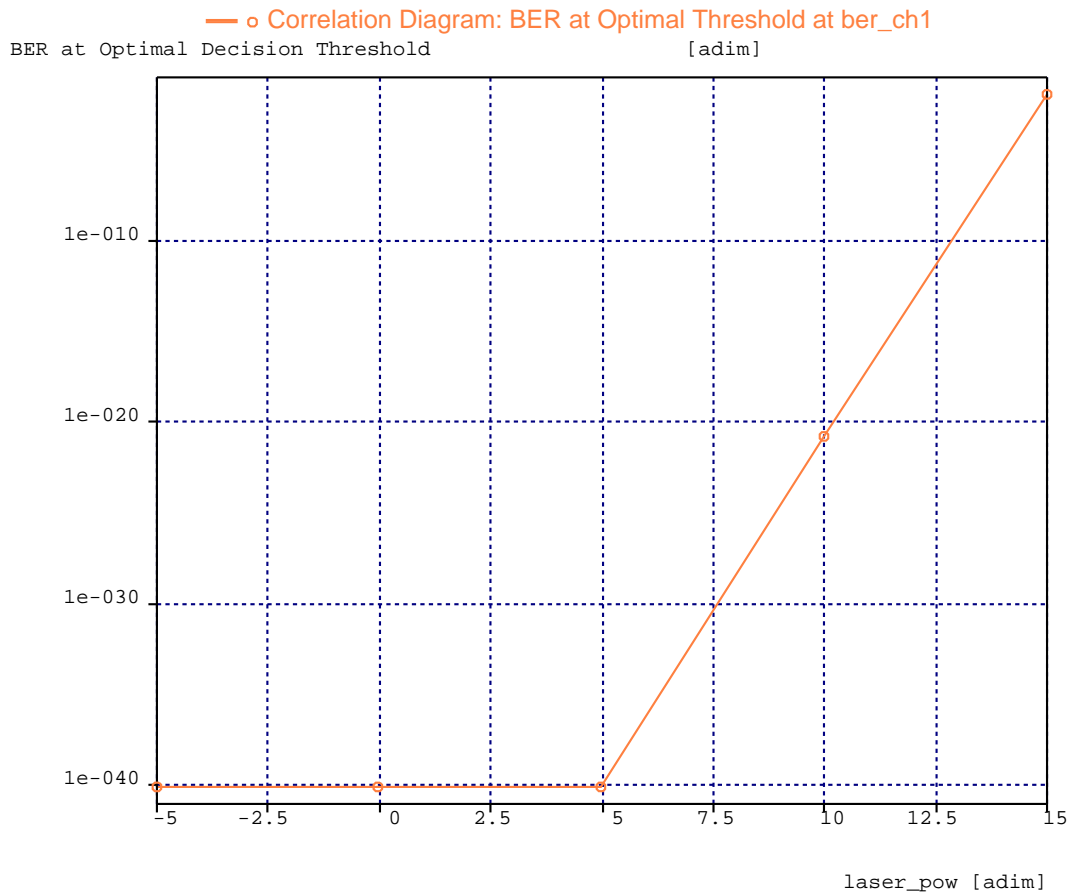
Obrázek 3.28: Diagram oka pro výkonovou úroveň 10 dBm



Obrázek 3.29: Diagram oka pro výkonovou úroveň 15 dBm

Výše ukázané grafy diagramů oka pro jednotlivé hodnoty výkonových úrovní nám odhalují, že při zvyšování vstupního výkonu laseru ve vysílací části optického spoje se efekt čtyřvlňného směšování projevuje více. Toto tvrzení je zřetelnější na následujících grafech.

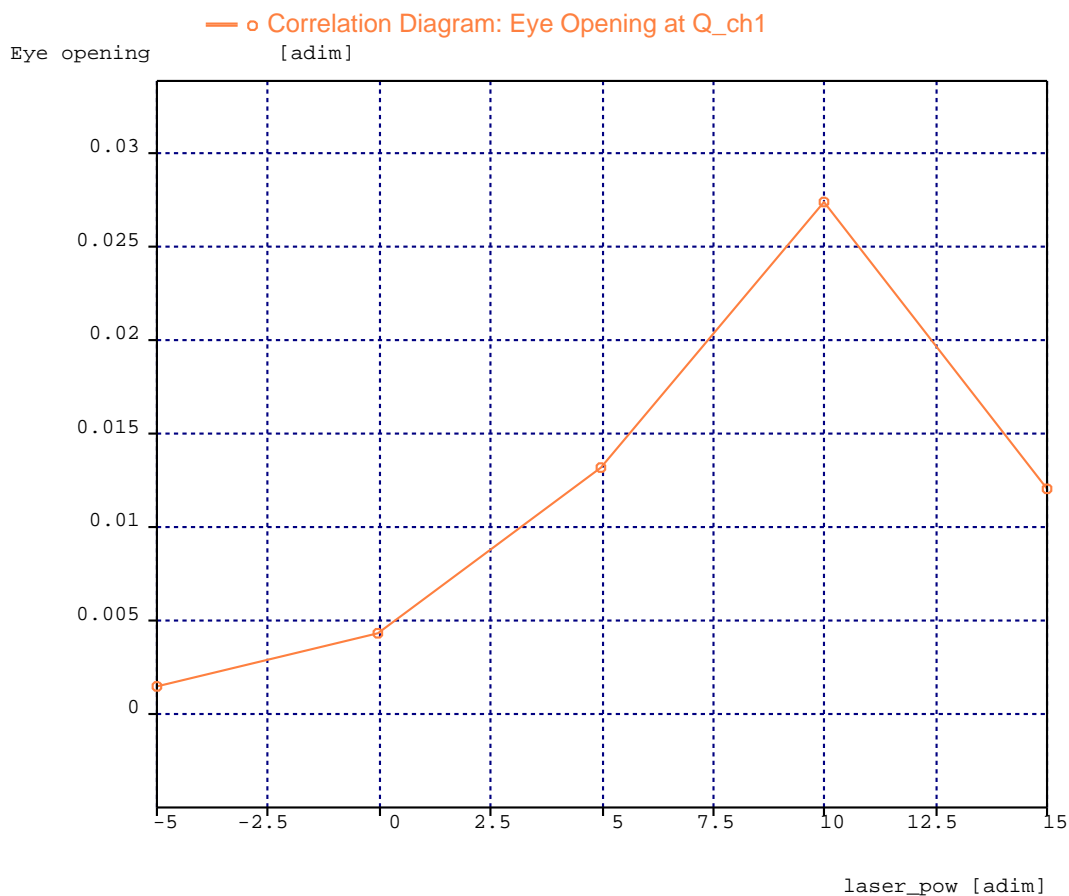
Obrázek 3.30 představuje chybovost BER v závislosti na změně výkonové úrovně laseru při konstantním kanálovém rozestupu 100 GHz.



Obrázek 3.30: Chybovost BER v závislosti na vstupním výkonu

Tento graf chybovosti BER odhaluje, že při vyšší výkonové úrovni se chybovost také zvyšuje.

Obrázek 3.31 reprezentuje závislost diagramu oka na změně výkonové úrovně laseru při konstantním kanálovém rozestupu 100 GHz.

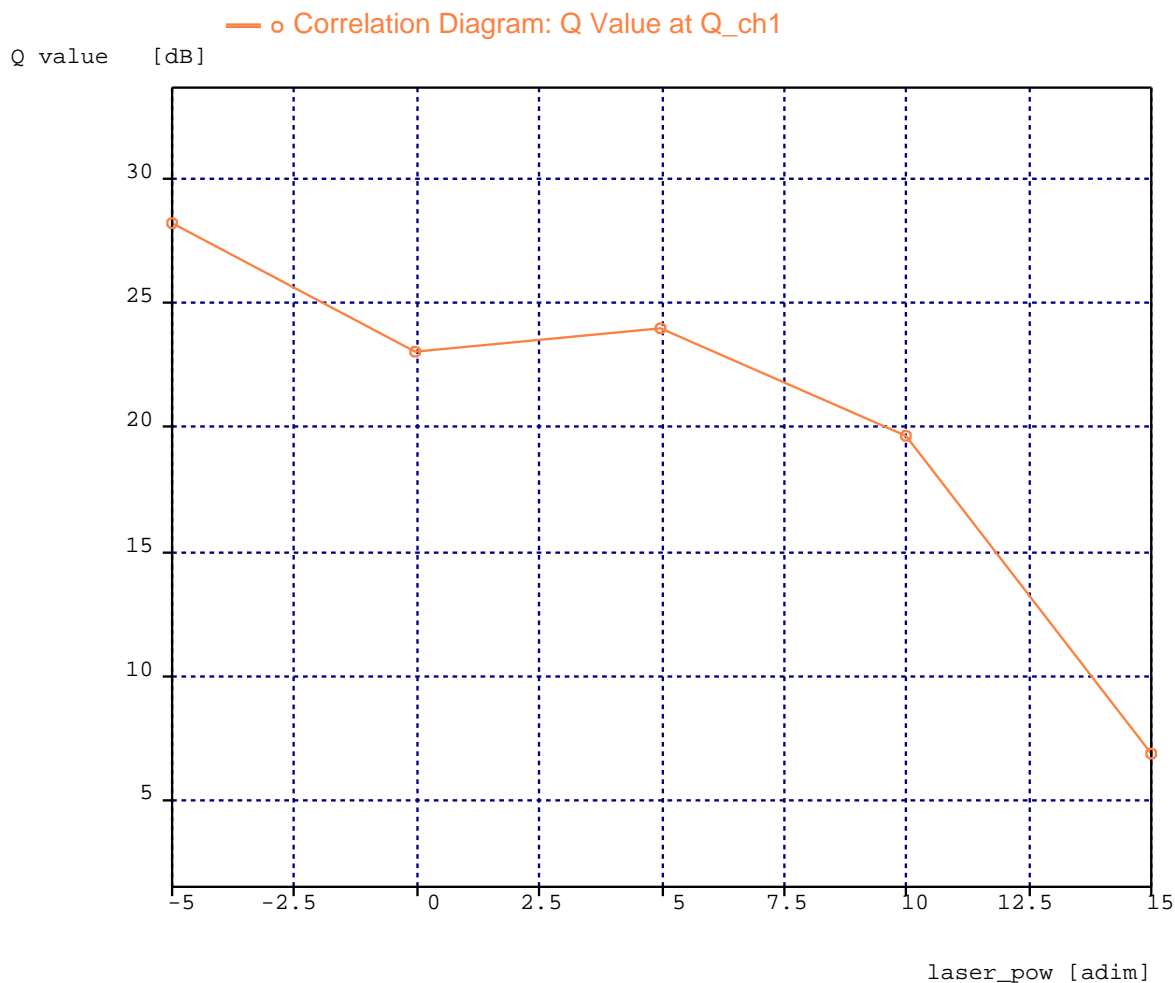


Obrázek 3.31: Diagram oka v závislosti na vstupním výkonu

Tento graf závislosti nám odhaluje, že při zvýšení hodnot výkonové úrovně laseru se hodnoty digramu oka zvětšují. Maximum nalezneme při hodnotě vstupního výkonu 10 dBm a od této hodnoty diagram oka začíná klesat.



Na obrázku 3.32 je zobrazena závislost Q faktoru při změně výkonové úrovně laseru.



Obrázek 3.32: Q faktor v závislosti na vstupním výkonu

Tento graf nám ukazuje, že při zvyšování výkonové úrovně laseru Q faktor klesá. Při nízkých hodnotách výkonu je Q faktor relativně vysoký, ale při vyšších hodnotách výkonu je vidět, že Q faktor se zmenšuje.

### 3.2.3 Zhodnocení

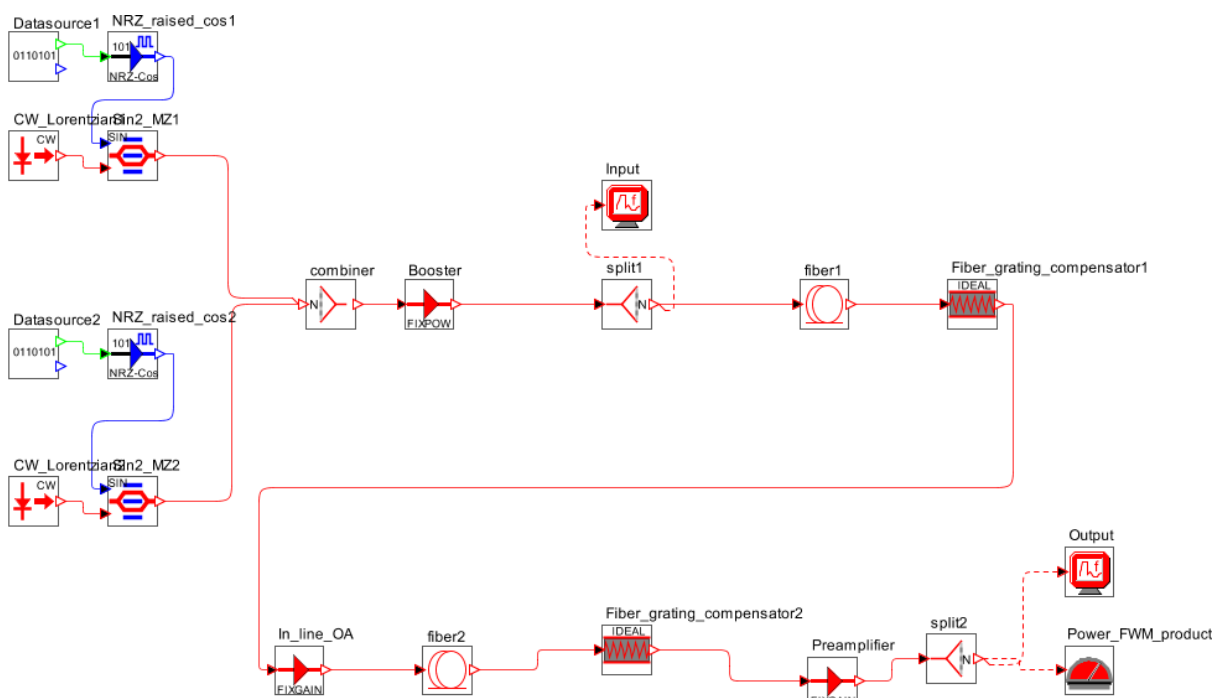
V této části diplomové práce jsem zkoumal efekt čtyřvlnného směšování v závislosti na změně hodnot vstupního výkonu zdroje optického záření. Pomocí této simulace bylo zjištěno, že vstupní výkon zdroje má podstatný vliv na čtyřvlnné směšování. Od výkonové úrovně 10 dBm narůstá chybovost BER a intermodulační produkty FWM mají výraznější vliv na jednotlivé kanály. Při výkonové úrovni 15 dBm již prakticky nelze rozeznat jednotlivé kanály ve výstupním optickém spektru a také chybovost BER je velmi vysoká. Z toho plyne, že při zvyšování výkonové úrovně laseru se jev čtyřvlnného směšování výrazněji projeví, proto je lepší v optických systémech bez výskytu čtyřvlnného směšování používat nižší výkonové úrovně.

### 3.3 Simulace FWM v závislosti na disperzi

V této simulaci se zaměřím na čtyřvlnné směšování a jeho závislost na hodnotě disperze vlákna, protože i ta je důležitým faktorem vzniku jevu čtyřvlnného směšování.

#### 3.3.1 Simulace

Použitý je dvoukanálový systém DWDM. Kanály jsou na vlnových délkách 1553,1276 nm resp. 1552,7254 nm. Schéma zapojení, které jsem použil pro tuto simulaci je na obrázku 3.33. Jak už bylo řečeno, dva kanály jsou navázány do dvou optických vláken, každé o délce 100 km. Na konci trasy trasy je provedena analýza za pomoci optického spektrálního analyzátoru. Disperze vlákna je měněna v rozsahu 0 až 16 ps/nm/km v každé části simulace.

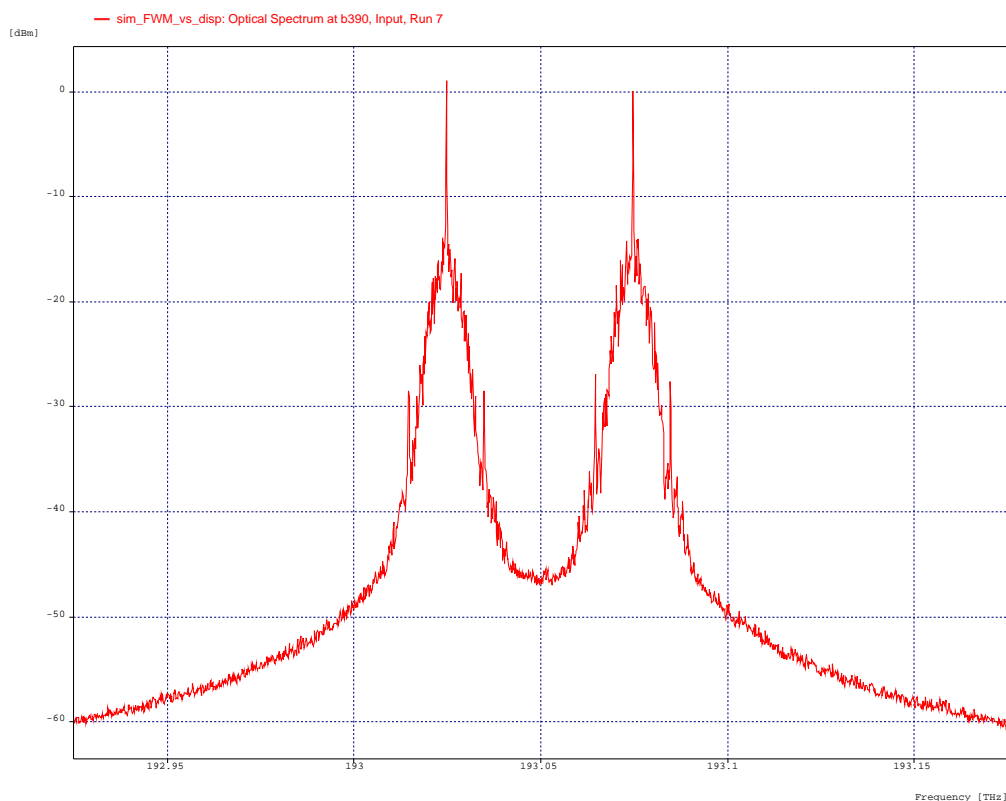


Obrázek 3.33: Schéma simulace

### 3.3.2 Vyhodnocení výsledků

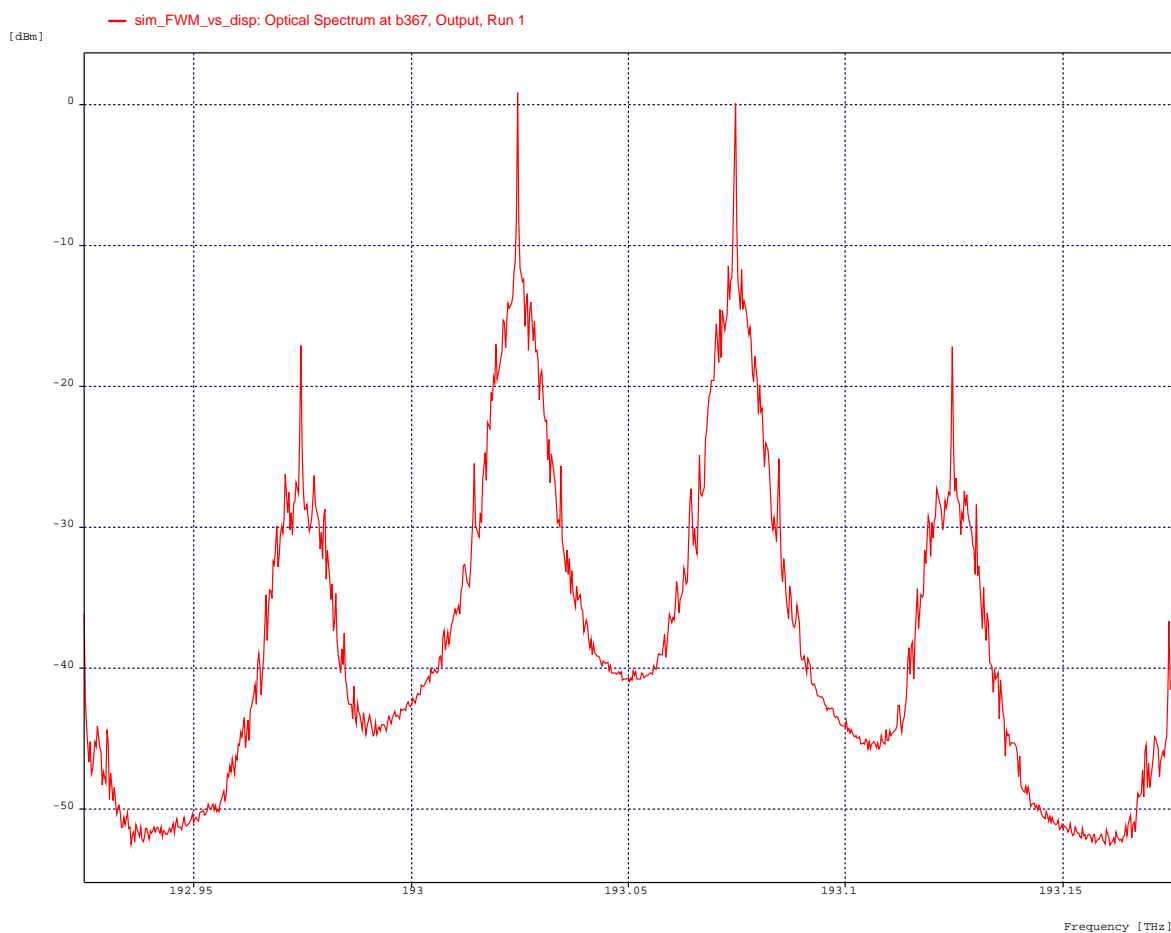
Hodnoty, které jsou získány ze simulace, jsou potom dále analyzovány pomocí výstupních optických spekter a porovnání výkonových úrovní.

Na obrázku 3.34 je zobrazeno vstupní optické spektrum, které bylo použito. Je zřejmé, že na vstupním spektru nejsou žádné intermodulační produkty způsobené čtyřvlenným směřováním. Simulace je provedena pro dva kanály, které jsou na vlnových délkách 1553,1276 nm, respektive 1552,7254 nm.



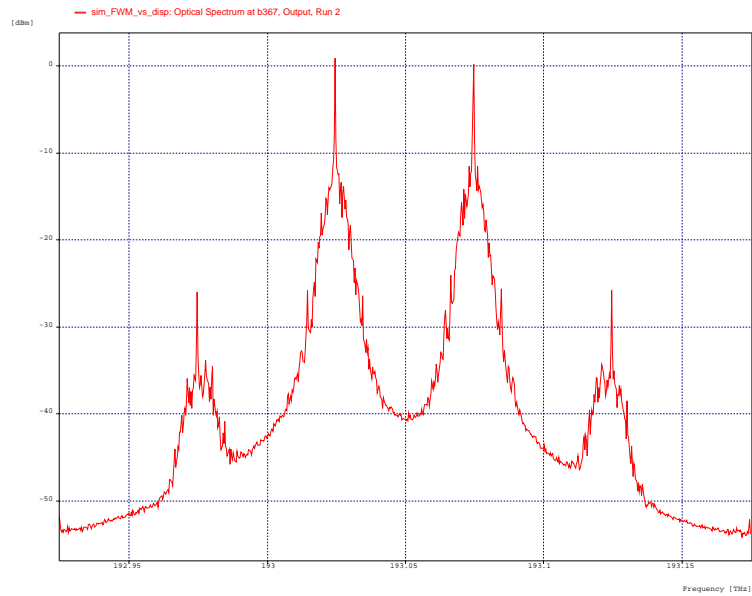
Obrázek 3.34: Vstupní optické spektrum

Na dalších obrázcích je potom možné vidět výstupní optická spektra pro různé hodnoty disperze vlákna. Na obrázku 3.35 je znázorněno výstupní optické spektrum pro hodnotu disperze vlákna 0 ps/nm/km. Výstupní optické spektrum na obrázku 3.36 je pro hodnotu disperze vlákna 2 ps/nm/km. Další obrázek 3.38 potom reprezentuje výstupní optické spektrum s hodnotou disperze vlákna 4 ps/nm/km. A na posledním obrázku vidíme výstupní optické spektrum pro hodnotu disperze vlákna 11 ps/nm/km.

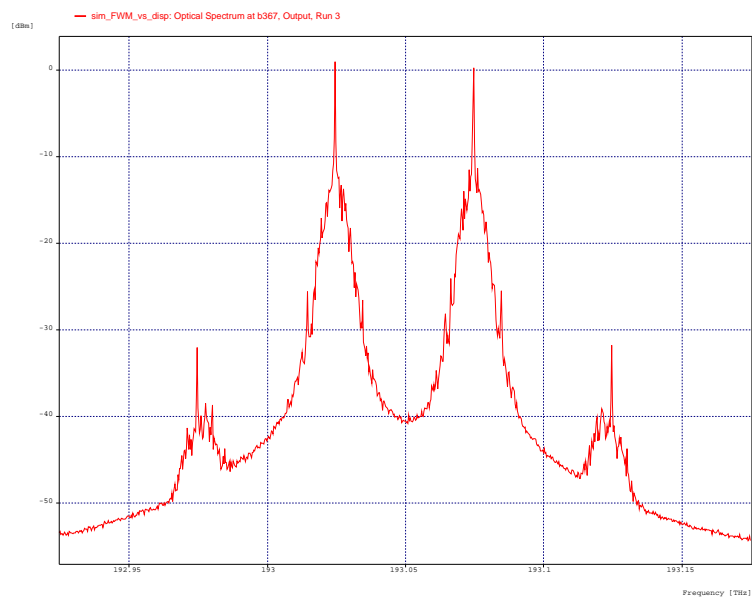


Obrázek 3.35: Hodnota disperze 0 ps/nm/km

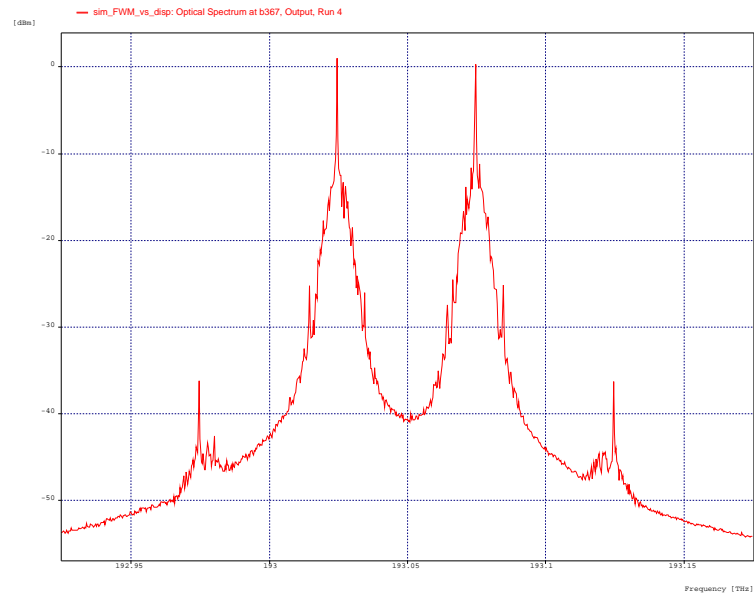
Nejlépe je vidět efekt čtyřvlnného směšování při nulové disperzi. Tento jev se projeví na výstupu jako nechtěné intermodulační produkty, jako to vidíme na obrázku 3.35. Tento efekt se nejvíce projeví právě při nulové disperzi, protože podmínka fázového souladu je maximálně splněna.



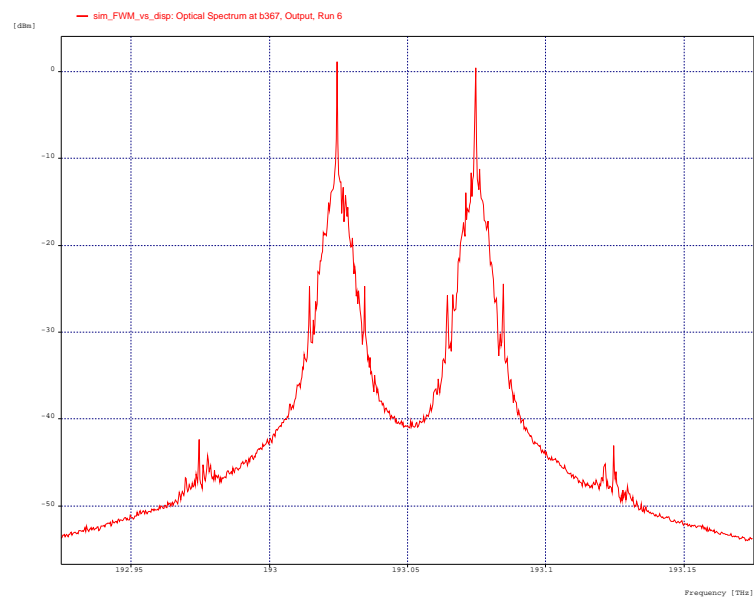
Obrázek 3.36: Hodnota disperze 1 ps/nm/km



Obrázek 3.37: Hodnota disperze 2 ps/nm/km

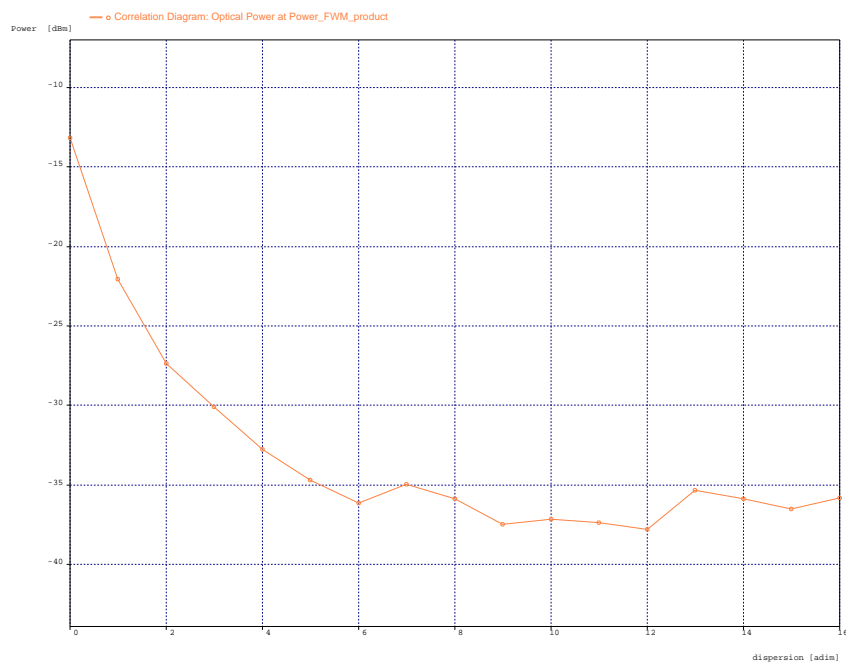


Obrázek 3.38: Hodnota disperze 4 ps/nm/km



Obrázek 3.39: Hodnota disperze 11 ps/nm/km

Na obrázku 3.40 vidíme závislost výkonu intermodulačních produktů FWM na hodnotě disperze vlákna. Z grafu vyčteme, že velikost intermodulačních produktů čtyřvlnného směšování se se zvýšením hodnoty disperze zmenšuje.



Obrázek 3.40: Výkon v závislosti na disperzi

### 3.3.3 Zhodnocení

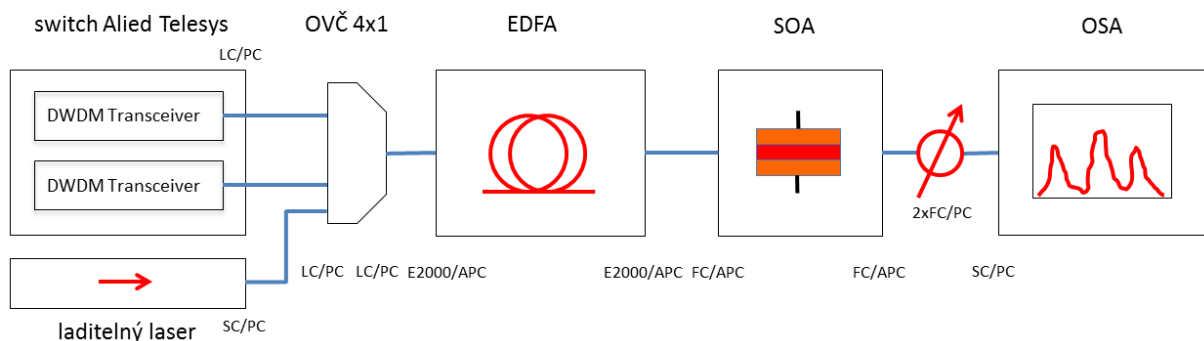
V této části diplomové práce jsem zkoumal efekt čtyřvlnného směšování v závislosti na změně hodnot disperze vlákna. Po důkladné analýze získaných hodnot bylo zjištěno, že efekt čtyřvlnného směšování se nejvíce projevuje v případě nulové disperze a to z toho důvodu, že podmínka fázového souladu je maximální. Dále se ukázalo, že při zvyšování hodnot disperze se efekt čtyřvlnného směšování zmenšuje, protože vzniká větší fázový nesoulad. Z tohoto důvodu se při optických přenosech používají vlákna s nenulovou posunutou disperzí.



# Kapitola 4

## Experiment

Druhou částí této diplomové práce je vybudění jevu čtyřvlenného směšování pomocí experimentu v laboratoři. Vhodnou volbou komponentů je možné vybudění jevu čtyřvlenného směšování. Sestavení zapojení experimentu je znázorněno na obrázku 4.1. Vysílací část je tvořena dvěma SFP (Small form-factor pluggable transceiver) moduly vysílajícími na vlnové délce 1531,12 nm, respektive 1531,90 nm. Třetí laser je laditelný od výrobce jménem EXFO. Pomocí optického vazebního členu je signál kombinován a přes EDFA (Erbium doped fiber amplifier) a SOA (Semiconductor optical amplifier) zesilovač zesílen a navázán do vlákna s téměř nulovou disperzí (0,2 ps/nm), které je dlouhé 50 km. Na konci takto vytvořené trasy je signál analyzován pomocí optického spektrálního analyzátoru firmy EXFO.

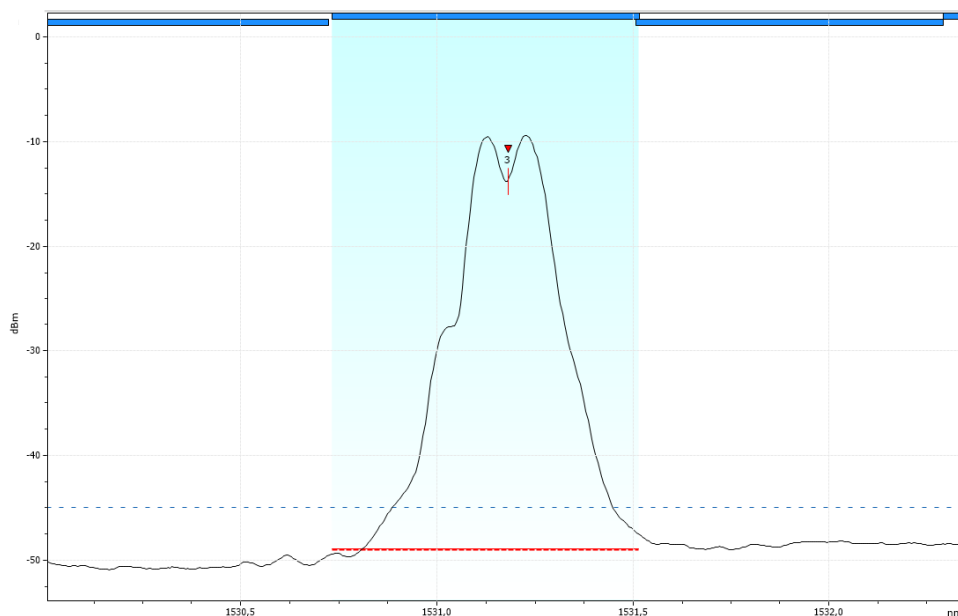


Obrázek 4.1: Schéma zapojení experimentu

## 4.1 Degenerované FWM - Kanálový rozestup

V případě, že frekvence dvou pumpujících vln je shodná, vzniká tzv. degenerované čtyřvlonné směšování [14][3]. A také musí být dodržen fázový soulad. Měření bylo prováděno v závislosti na kanálovém rozestupu pro hodnoty 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz. Hodnoty kanálového rozestupu byly vybrány podle doporučení ITU-T G.694.1[17]. Výkonové úrovně obou laserů jsou nastaveny na hodnotu 0 dBm. Velikost proudu pumpy optického zesilovače EDFA má nastavenou maximální hodnotu 156 mA, což odpovídá hodnotě zisku 30 dB. Zesílení optického zesilovače SOA má hodnotu také nastavenou na maximum, což je 13 dB. Takže zesílení na celé trase je 43 dB, což je maximální hodnota, kterou mohou nastavit a stačí nám k vybuzení jevu čtyřvlonného směšování. Útlum celé trasy je přibližně 10 dB, přesnou hodnotu neznám z důvodu neznalosti a nemožnosti změřit útlum všech komponentů (např. konektory, patch cordy, atd.).

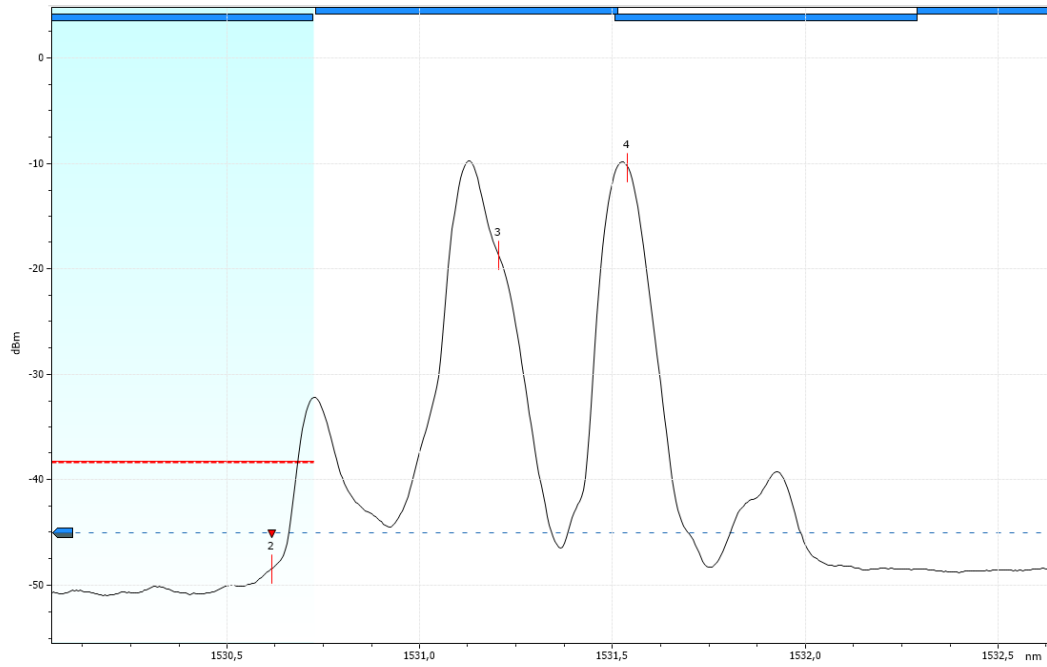
Na následujících obrázcích vidíme změřená optická výstupní spektra. Na obrázku 4.2 je zobrazeno výstupní optické spektrum pro hodnotu kanálového rozestupu 12,5 GHz. Na dalším obrázku 4.3 je zobrazeno výstupní optické spektrum pro hodnotu kanálového rozestupu 25 GHz. Výstupní optické spektrum kanálového rozestupu 50 GHz je znázorněno na obrázku 4.4. A na posledním obrázku 4.5 je vidět výstupní optické spektrum pro hodnotu kanálového rozestupu 100 GHz.



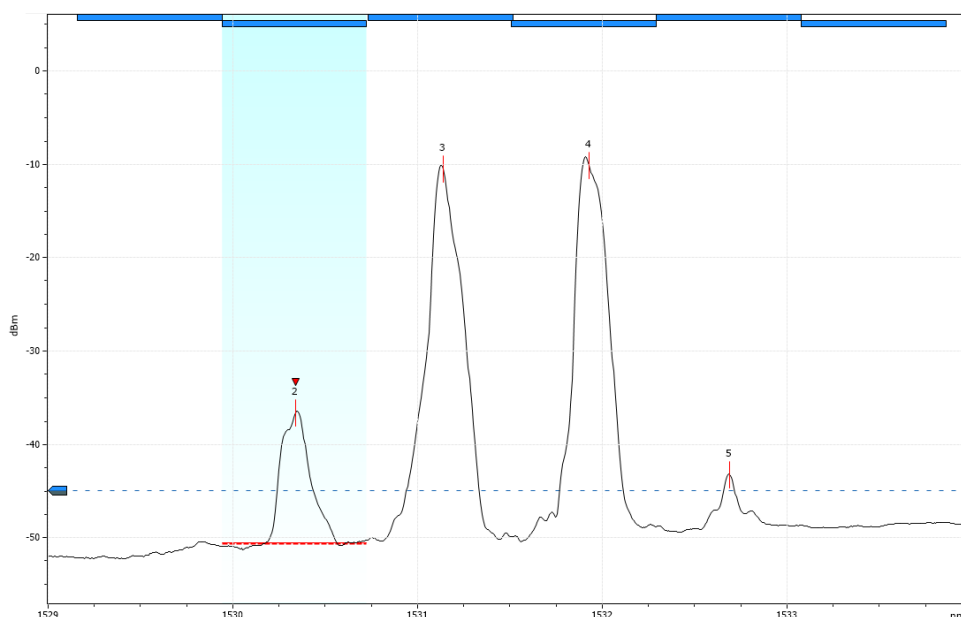
Obrázek 4.2: Kanálový rozestup 12,5 GHz



Obrázek 4.3: Kanálový rozestup 25 GHz



Obrázek 4.4: Kanálový rozestup 50 GHz



Obrázek 4.5: Kanálový rozestup 100 GHz

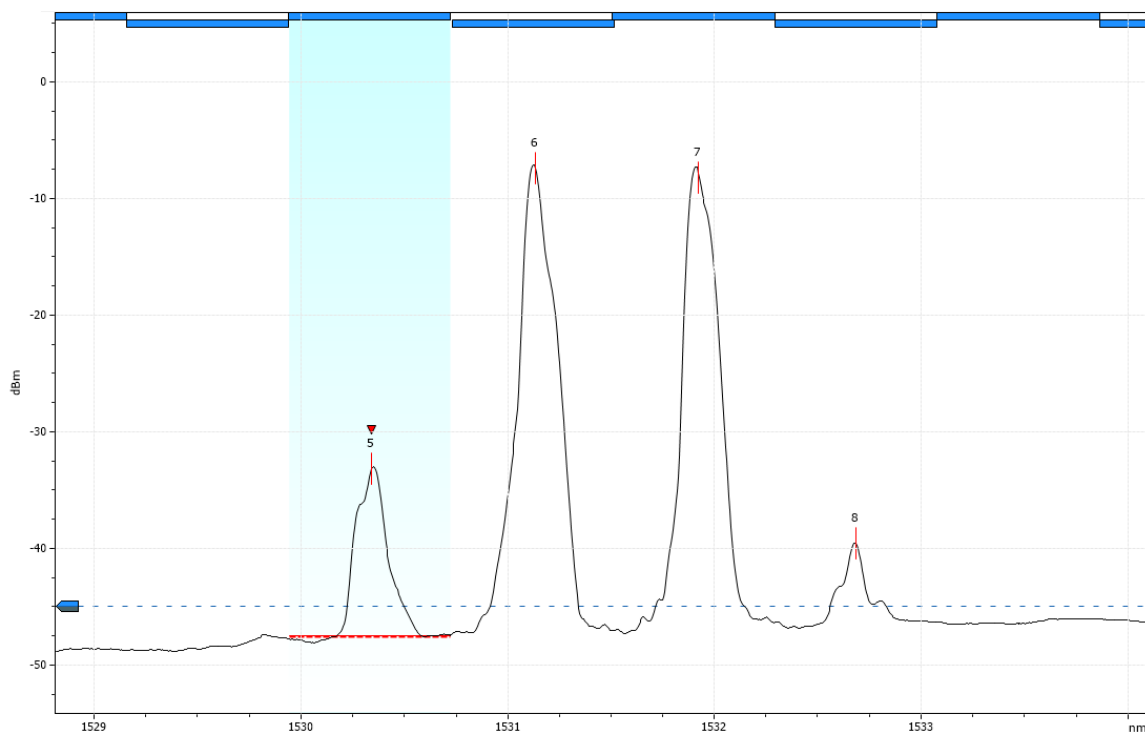
Provedením tohoto experimentu jsme si ověřili a potvrdili závěry, které jsme již získali u podobné simulace. Při pohledu na výstupní optická spektra je jasné, že při snižování kanálového rozestupu se efekt čtyřvlenného směšování zvětšuje a vznikají tak větší přeslechy mezi kanály při optickém přenosu. Efekt čtyřvlenného směšování je největší v případě kanálového rozestupu 12,5 GHz, což odpovídá obrázku 4.2. Nejlépe je vidět efekt čtyřvlenného směšování na obrázku 4.3, který představuje kanálový rozestup 25 GHz. Původní vlnové délky 1531,12 nm a 1531,3112 nm mají výkonovou úroveň -9,47 dBm, respektive -9,82 dBm. Intermodulační produkty čtyřvlenného směšování prvního řádu se vytvořily na vlnových délkách 1530,9288 nm, respektive 1531,5024 nm. Tímto jsme si ověřili platnost rovnice 2.5. Hodnoty výkonových úrovní těchto produktů jsou -29,95 dBm, respektive -33,36 dBm. Vznikají i intermodulační produkty čtyřvlenného směšování druhého řádu, které se objevují na vlnových délkách 1530,74 nm, respektive 1531,695 nm a jejich výkonová úroveň je -47,18 dBm, respektive -47,15 dBm, což není zas tak velká hodnota, ale i ta může činit problémy. Při více kanálech s takovým rozstupem (25 GHz) by nám právě intermodulační produkty čtyřvlenného směšování deformovaly původní kanály. Důležité je i to, že výkonové úrovně těchto nechtěných produktů jsou vyšší než 45 dBm a mohou tedy být rozeznány jako kanály nesoucí užitečnou informaci. Při vyšším kanálovém rozstupu se objevují již jen intermodulační produkty prvního řádu a hodnoty jejich výkonových úrovní jsou menší, což je patrné z obrázku 4.4 a obrázku 4.5. Opět můžeme říci, že se

snižováním hodnoty kanálového rozestupu se efekt čtyřvlenného směšování projevuje více a má větší účinek na původní vlnové délky kanálů.

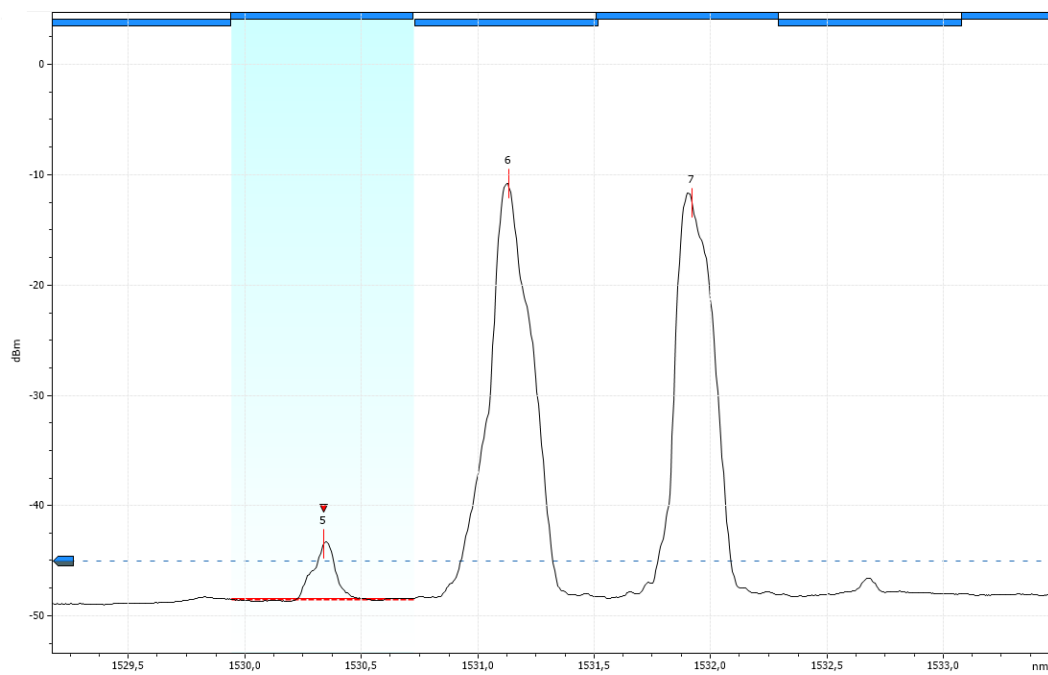
## 4.2 Degenerované FWM - Výkon

V druhém případě u degenerovaného čtyřvlenného směšování jsem se zaměřil na parametrizování výkonu resp. zesílení zesilovačů vůči tomuto jevu. Cílem bylo zjistit, jak se projevuje efekt čtyřvlenného směšování při různých hodnotách zesílení. Pro tento experiment byl použit kanálový rozestup 100 GHz. Jinak zapojení experimentu je stejné, jak bylo popsáno v úvodu této kapitoly.

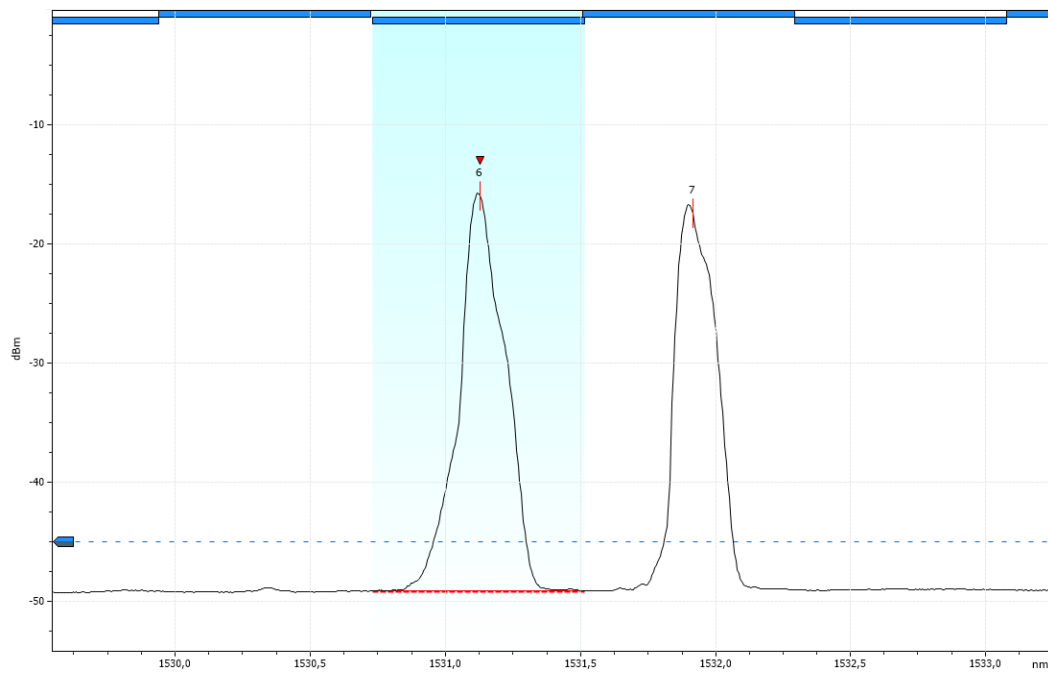
Postupně na následujících obrázcích můžeme pozorovat výsledky tohoto experimentu. Na obrázku 4.6 je znázorněno výstupní optické spektrum pro zesílení 43 dB, což odpovídá maximální hodnotě, kterou mohou zvolit. Na dalším obrázku 4.7 je potom výstupní optické spektrum pro zesílení 34 dB. A na posledním obrázku 4.8 je také výstupní optické spektrum, ale pro nejmenší zesílení 31 dB.



Obrázek 4.6: Kanály a FWM produkty pro zesílení 43 dB



Obrázek 4.7: Kanály a FWM produkty pro zesílení 34 dB



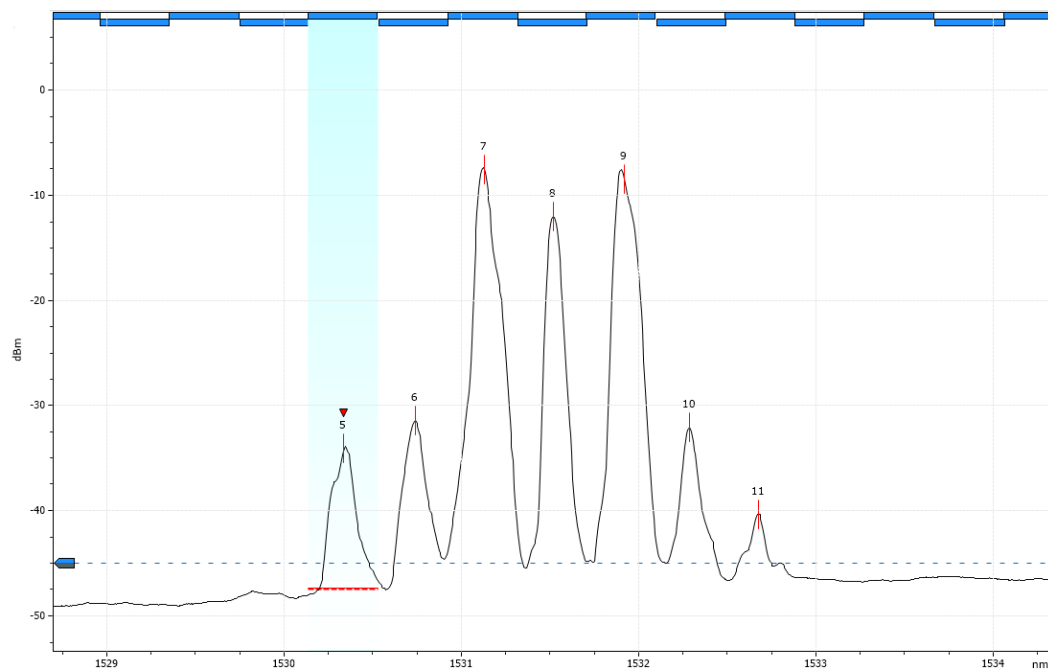
Obrázek 4.8: Kanály a FWM produkty pro zesílení 31 dB

Při pohledu na obrázky reprezentující jednotlivá měření zjistíme, že výsledky jsou obdobné jako u simulace. Z obrázku 4.6 vyčteme, že při maximálním zesílení se efekt čtyřvlenného směšování projevuje nejvíce. Původní vstupní kanály jsou na vlnových délkách 1531,12 nm, respektive 1531,90 nm s výkonovými úrovněmi okolo -6 dBm. Dále jsou pak vidět intermodulační produkty čtyřvlenného směšování na vlnové délce 1530,34 nm o výkonové úrovni -30,81 dBm, respektive 1532,685 nm o výkonové úrovni -39,62 dBm. Potom jsem se snažil najít takové zesílení, při kterém vzniká pouze jeden intermodulační produkt a to nastává při hodnotě zesílení 34 dB na obrázku 4.7. Vidíme, že intermodulační produkt čtyřvlenného směšování na vlnové délce 1530,34 nm s výkonovou úrovní -43,44 dBm, je na pomezí šumu a jeho vliv je zanedbatelný. Dále jsem chtěl najít takovou hodnotu zesílení, při níž se efekt čtyřvlenného směšování neprojeví vůbec. A tento případ je vidět na obrázku 4.8, kdy hodnota zesílení je 31 dB. Vidíme pouze původní kanály na vlnových délkách 1531,12 nm, respektive 1531,90 nm s výkonovými úrovněmi -15,28 dBm resp. -15,67 dBm. Zjistili jsme, že pro optické přenosy bez výskytu nelineárního jevu čtyřvlenného směšování je důležité volit vhodné výkonové úrovně laserů a hodnoty zesílení jednotlivých zesilovačů. Z naměřených výstupních optických spekter vidíme, že při zvyšování zesílení se efekt čtyřvlenného směšování projevuje daleko více než při nižších hodnotách zesílení.

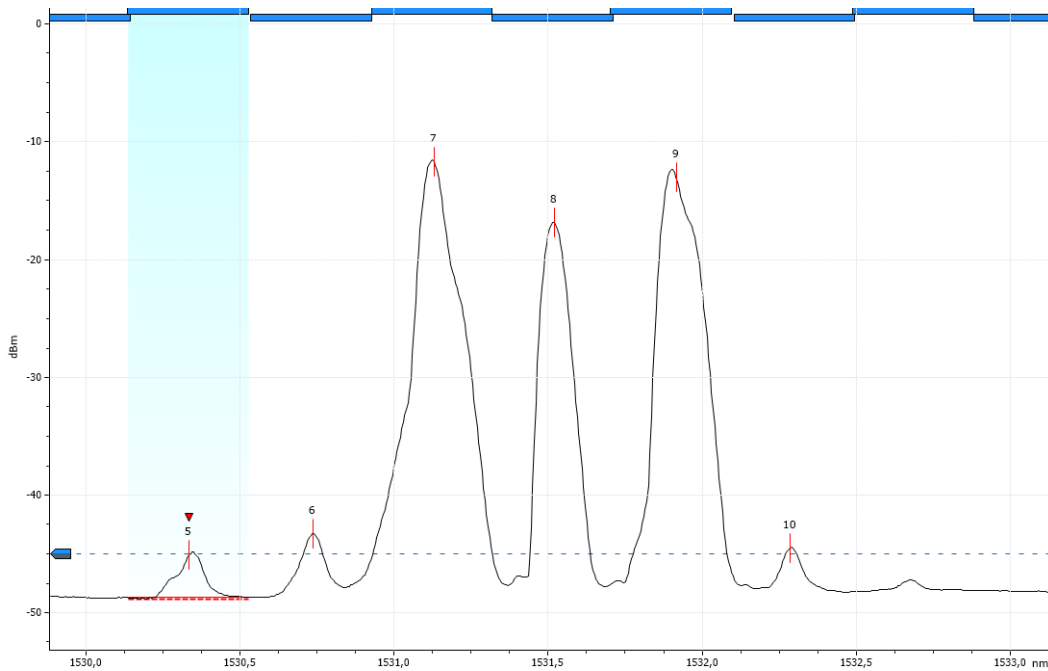
### 4.3 Normální nedegenerované FWM

V případě nedegenerativního (normálního) čtyřvlenného směšování je úkolem změřit a analyzovat tento jev a jeho vliv na kvalitu optického přenosu. Kanálový rozestup je u tohoto měření nastaven na 50 GHz. Problém spatřuji v nemožnosti nastavit výkonové úrovně všech laserů na stejnou úroveň. Laditelný DFB laser má výkonovou úroveň 0 dBm a SFP moduly mají 3 dBm. Zapojení experimentu zůstává pořád stejné jako v předchozích případech s tím rozdílem, že jsou použity všechny tři lasery.

Na obrázku 4.9 je znázorněno výstupní optické spektrum pro maximální zesílení 43 dB. Na dalším obrázku 4.10 nalezneme výstupní optické spektrum pro hodnotu zesílení 33 dB. Na posledním obrázku 4.11 je možno vidět výstupní optické spektrum při hodnotě zesílení 31 dB.

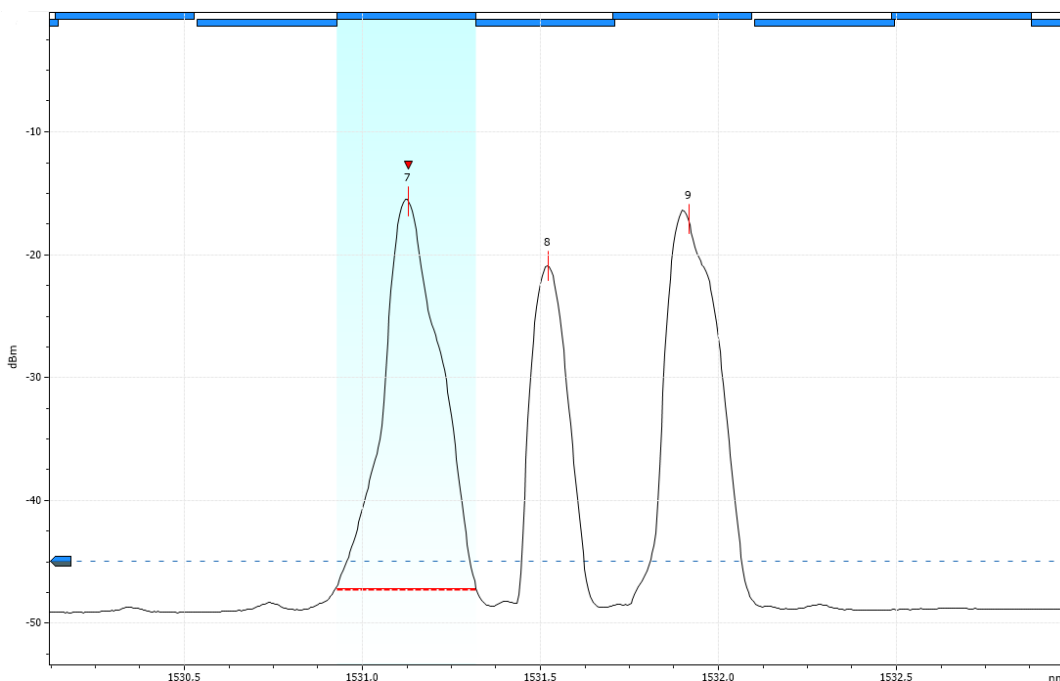


Obrázek 4.9: Kanály a FWM produkty pro zesílení 43 dB



Obrázek 4.10: Kanály a FWM produkty pro zesílení 33 dB





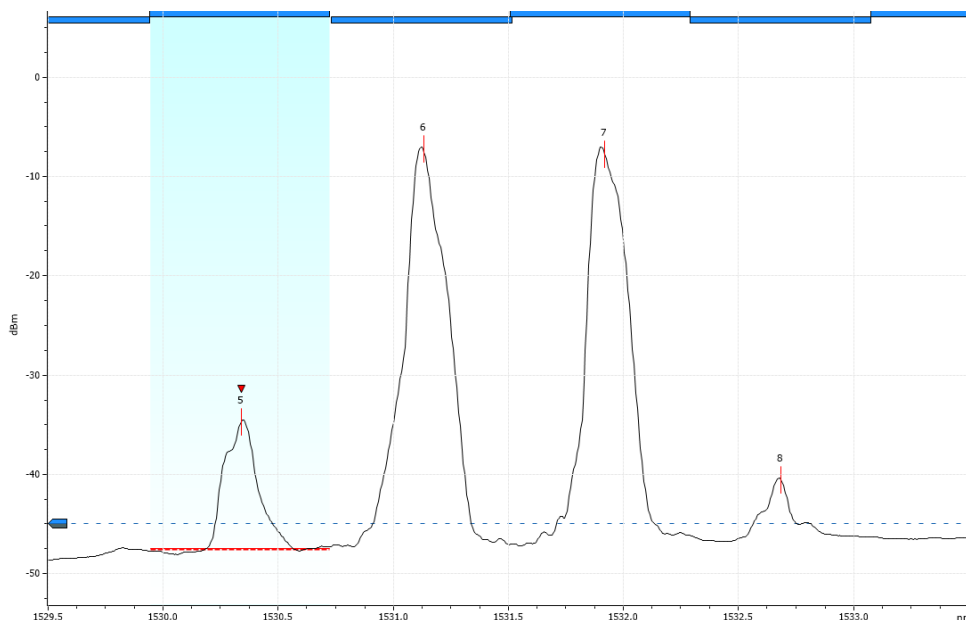
Obrázek 4.11: Kanály a FWM produkty pro zesílení 31 dB

Z naměřených výstupních optických spekter můžeme vyčíst, že když zvyšujeme výkon laserů nebo zesílení zesilovačů po trase, tak efekt čtyřvlenného směšování má vyšší účinek na optické spektrum. Na obrázku 4.9 vidíme vstupní kanály které jsou na vlnových délkách 1531,12 nm, 1531,51 nm a 1531,90 nm. Z obrázku je zřejmé, že vznikají intermodulační produkty čtyřvlenného směšování prvního řádu i druhého řádu. Intermodulační produkty způsobené čtyřvlenným směšováním mají výkonové úrovně okolo -30 dBm a při použití více DWDM kanálů mohou způsobovat velké nepříjemnosti v podobě přeslechů mezi kanály a deformací pulzů původních kanálů, což se projeví především na chybovosti BER. Taký vidíme, že na obrázku 4.10 vznikají intermodulační produkty čtyřvlenného směšování prvního řádu i druhého řádu. S tím rozdílem, že výkonové úrovně těchto nechtěných vrcholů jsou na pomezí šumu (výkonová úroveň -45 dBm) a nemusí tak činit nějaké výraznější problémy. V posledním případě (obrázek 4.11) vidíme již jen původní vlnové délky kanálů a žádné intermodulační produkty způsobené čtyřvlenným směšováním. Zjistil jsem, že při použití více zdrojů optického záření (v tomto případě jsem použil tři), začíná být efekt čtyřvlenného směšování velmi zásadní problém. Proto je nutné velmi uvážlivě volit hodnoty výkonových úrovní jednotlivých komponentů, protože výkon je jeden z hlavních faktorů, který ovlivňuje efekt čtyřvlenného směšování.

## 4.4 Porovnání změny laseru

Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, zda-li změna typu laseru bude mít nějaký vliv na vlastnosti přenosu optického signálu a jevu čtyřvlňného směšování.

V prvním případě jsem použil dva shodné SFP moduly, které svítily na vlnových délkách 1531,12 nm, respektive 1531,90 nm. To značí, že kanálový rozestup je 100 GHz. Výkonová úroveň obou SFP modulů má hodnotu 3 dBm. Na obrázku 4.12 lze vidět výstupní optické spektrum získané z optického spektrálního analyzátoru. A v tabulce 4.1 potom najdeme změřené parametry pro toto uspořádání.



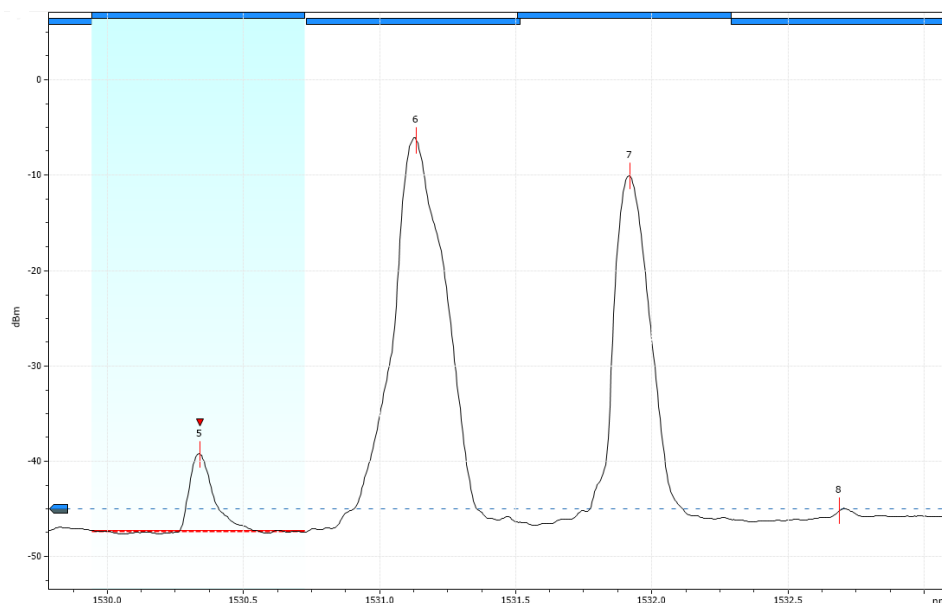
Obrázek 4.12: Příklad - dva stejné lasery

Vlnová délka [ $\lambda$ ]	Výkon [dBm]	OSNR [dB]	BW 3 dB [nm]	BW 20 dB [nm]
1530,340	-32,46	2,77	0,086	-
1531,131	-6,41	28,50	0,059	0,208
1531,920	-5,70	28,80	0,071	0,203
1532,684	-	-	0,094	-

Tabulka 4.1: Výsledky - dva stejné lasery

V druhém případě nám posloužil jeden SFP modul jehož vlnová délka, stejně jako v prvním případě, byla 1531,12 nm. Jako druhý laser byl použit laditelný laser firmy

EXPO a jeho vlnová délka byla nastavena na 1531,90 nm, aby vlnové délky byly stejné v obou případech. Menší problém nastal v případě nemožnosti nastavit oba lasery na stejné výkonové úrovni. SFP modul měl automaticky nastavenou výkonovou úroveň na 3 dBm a laditelný laser byl na hodnotě 0 dBm, což je jeho maximální možný výkon. Výstup z optického spektrálního analyzátoru je vidět na obrázku 4.2. Naměřené hodnoty z tohoto měření jsou pak v tabulce 4.2.



Obrázek 4.13: Příklad - dva různé lasery

Vlnová délka [ $\lambda$ ]	Výkon [dBm]	OSNR [dB]	BW 3 dB [nm]	BW 20 dB [nm]
1530,341	-	-	0,073	-
1531,135	-5,43	29,18	0,060	0,208
1531,919	-9,91	24,14	0,057	0,159
1532,689	-	-	0,094	-

Tabulka 4.2: Výsledky - dva různé lasery

Po důkladné analýze a porovnání naměřených hodnot jsem došel k závěru, že změna typu laseru nemá výrazný vliv na optický přenos a čtyřvlnné směšování. Můžeme říci, že v praxi použití laserů různých výrobců by nemělo činit žádný problém.

# Kapitola 5

## Závěr

Výsledkem této diplomové práce je několik simulací jevu čtyřvlenného směšování v optických sítích a experiment v laboratorních podmínkách, které vedly k nalezení poznatků pro pozdější návrh optických sítí bez výskytu tohoto jevu.

Prvním úkolem bylo provedení simulací, které zkoumaly jev čtyřvlenného směšování v závislosti na různých parametrech. Vyhodnocení bylo vždy provedeno na základě výstupních optických spekter, diagramů oka, chybovosti BER a Q faktoru. Prvním zkoumaným parametrem byl kanálový rozestup. Porovnání jevu čtyřvlenného směšování v závislosti na různých hodnotách odhalilo, že rozestup 50 GHz a vyšší má lepší vlastnosti v optických komunikacích než rozestup 12,5 GHz. Tato simulace také ukázala, že rozestup 50 GHz a vyšší má menší chybovost BER, která se blíží nule. Proto můžeme říci, že vyšší kanálové rozestupy se lépe hodí pro optické přenosy na delší a dlouhé vzdálenosti bez výskytu čtyřvlenného směšování. Z jednotlivých grafů chybovosti BER, diagramu oka a Q faktoru je jasné, že vyšší kanálový rozestup má lepší parametry než kanálový rozestup s nižšími hodnotami. Z toho plyne, že vyšší kanálový rozestup se lépe hodí pro optické přenosy, kde se jev čtyřvlenného směšování nebude vyskytovat. Dalším zkoumaným parametrem byl vstupní výkon zdrojů optického záření. Bylo zjištěno, že při vyšších hodnotách vstupního výkonu se jev čtyřvlenného směšování projevuje výrazněji. Od hodnoty výkonu 10 dBm narůstá chybovost a optické spektrum je již silně ovlivněno a při hodnotě 15 dBm jsou již důsledky čtyřvlenného směšování fatální. Chybovost BER je velmi vysoká a kanály v optickém spektru jsou zcela nerozeznatelné. Proto je lepší v optických sítích bez výskytu jevu čtyřvlenného směšování používat zdroje s menším výkonem a po trase používat optické zesilovače. Třetím a posledním analyzovaným parametrem byla disperze vlákna. Simulace ukázala, že efekt čtyřvlenného směšování se nejvíce projevuje v případě nulové disperze vlákna a se zvyšující se hodnotou disperze má menší účinek. Proto je lepší při návrhu používat vlákna s posunutou nenulovou disperzí, aby se pravděpodobnost výskytu jevu

čtyřvlenného směřování minimalizovala.

Druhým úkolem bylo vybudování jevu čtyřvlenného směřování pomocí experimentu v laboratorních podmínkách. Opět byla soustředěna pozornost na parametry kanálového rozestupu a výkonu u degenerovaného a normálního čtyřvlenného směřování. Z experimentu můžeme vyvodit stejné závěry jako ze simulací. A to, že se snižováním kanálového rozestupu se jev čtyřvlenného směřování projevuje ve větší míře a to samé platí i u výkonu v obou případech čtyřvlenného směřování. Nakonec bylo ještě zkoumáno, jestli dva různé typy laserů mají vliv na jev čtyřvlenného směřování. Výsledek je takový, že mezi různými typy laserů nebyly zjištěny žádné rozdíly a tedy použití různých typů laserů v reálných případech není nijak omezeno.

Jak již bylo vysvětleno výše, při návrhu optických sítí bez výskytu jevu čtyřvlenného směřování neexistuje jednotné řešení, ale je nutné dimenzovat optické sítě podle zadaných podmínek. Největším přínosem této práce je systematizace v oblasti čtyřvlenného směřování a představení úvah, ze kterých je možno vycházet při návrhu optických sítí bez výskytu tohoto jevu. V případném pokračování této práce je možné se zaměřit na další parametry ovlivňující čtyřvlenné směřování jako například použití různých modulačních formátů, počet DWDM kanálů, atd. Jelikož v této práci je zmíněno pouze čtyřvlenné směřování bylo by vhodné analyzovat ostatní nelineární jevy, případně zkoumat čtyřvlenné směřování jako metodu pro konverzi vlnových délek či nalezení jiných metod redukce čtyřvlenného směřování.

# Literatura

- [1] Agrawal, G.: *Applications of nonlinear fiber optics*. San Diego: Academic Press, c2001.
- [2] Ajmani, M.; Singh, P.: FWM in WDM System, Effects and Techniques to Minimize. *2015 Fifth International Conference on Advanced Computing*, 2015: s. 385–389. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7079113>
- [3] Aso, O.; Tadakuma, M.; Namiki, S.: Four-Wave Mixing in Optical Fibers and Its Applications. *Furukawa Review*, 2000: s. 63–68. Dostupné z: [http://www.furukawa.co.jp/review/fr019/fr19\\_12.pdf](http://www.furukawa.co.jp/review/fr019/fr19_12.pdf)
- [4] Atkinson, M.; Santoro, N.; Urrutia, J.: Integer Sets with Distinct Sums and Differences and Carrier Frequency Assignments for Nonlinear Repeaters. In *IEEE Transactions on Communications*, rok vol. 34, 1986, s. 614–617. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1096587>
- [5] Babcock, W. C.: Intermodulation Interference in Radio Systems. In *Bell System Technical Journal*, rok vol. 32, 1953, s. 63–73. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6768265>
- [6] Bogoni, A.; Poti, L.; Bononi, A.: Accurate measurement of in-band FWM power in DWDM systems over nonzero dispersion fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, rok vol. 15, ssue 2, 2003: s. 260–262, ISSN 1041-1135. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1174139>
- [7] Boháč, L.; Lucki, M.: *Optické komunikační systémy*. V Praze: České vysoké učení technické, vyd. 1. vyd, 2010.
- [8] Charlet, G.; Corbel, E.; Lazaro, J.; aj.: Comparison of system performance at 50, 62.5 and 100GHz channel spacing over transoceanic distances at 40Gbits channel rate using RZ-DPSK. *Electronics Letters*, rok vol. 41, ssue 3, 2005: s. 145–, ISSN 00135194. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el20057638>

- [9] Šebek, J.: *Simulace koexistence více optických systémů na fyzické vrstvě*. Diplomová práce, ČVUT, Praha, 2014.
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] Gouri Deshmukh, P. J.: Four Wave Mixing in DWDM Optical System. *International Journal of Computational Engineering Research*, 2006.
- [13] G.P, A.: *Lightwave Technology: Telecommunication Systems*. Wiley Interscience, 2005.
- [14] Guo, Y.; Li, H.; Chiang, K. S.: *Nonlinear photonics*. New York: Springer, 2002, ISBN 9622018610.
- [15] Hodžić, A.: *Investigations of high bit rate optical transmission systems employing a channel data rate of 40 Gb/s*. Disertační práce, Technischen Universität Berlin, Berlin, 2004.
- [16] Hwang, B.; Tonguz, O.: A generalized suboptimum unequally spaced channel allocation technique. I. In IM/DD WDM systems. *IEEE Transactions on Communications*, rok vol. 46, ssue 8: s. 1027–1037, ISSN 00906778. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=705403>
- [17] ITU-T: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. Recommendation G.694.1, International Telecommunication Union, Geneva, or 2012.
- [18] ITU-T: Transmission characteristics of optical components and subsystems. Recommendation G.671.1, International Telecommunication Union, Geneva, or 2012.
- [19] Karfaa, Y. M.; Ismail, M.; Abbou, F. M.; aj.: Effects of four-wave mixing crosstalk in WDM networks on the transmitted optical frequencies and wavelengths of channels for various fiber types. *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, 2007: s. 1–5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4603976>

- [20] Manzoor, H. U.; Salfi, A. U.; Mehmood, T.; aj.: Reduction of Four Wave Mixing by employing circular polarizers in DWDM optical networks. *2015 12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, 2015: s. 637–640. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7058574>
- [21] Moncef B. Tayahi, B. R., Sivakumar Lanka: Four Wave Mixing in Closely Spaced DWDM Optical Channels. *International Journal of Microwave and Optical Technology*, , 2, August 2006.
- [22] Sharan, L.; Chaubey, V. K.: Design and simulation of long-haul 32 40 Gb/s Duobinary DWDM link in the presence of non-linearity with under-compensated dispersion. *2012 IEEE 3rd International Conference on Photonics*, 2012: s. 210–214. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6379838>
- [23] Singh, S. P.; Singh, N.; Ferreira, M. F. S.; aj.: NONLINEAR EFFECTS IN OPTICAL FIBERS. *Progress In Electromagnetics Research*, rok vol. 73, 2007: s. 209–259.
- [24] Sýkora, J.: Princip WDM. 2004. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=princip-wdm&cislocclanku=2004072805>
- [25] Sunnerud, H.; Hansryd, J.; Andrekson, P.; aj.: Impact of PMD on FWM crosstalk in WDM systems. *Optical Fiber Communication Conference. Technical Digest Postconference Edition. Trends in Optics and Photonics Vol.37 (IEEE Cat. No. 00CH37079)*, 2000: s. 34–36. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=868514>
- [26] Yariv, A.; Pepper, D. M.: Amplified reflection, phase conjugation, and oscillation in degenerate four-wave mixing. In *Optics Letters*, rok vol. 1, 1977.
- [27] Zacharias, J.; S, V. M.; Narayanan, V.: Four-wave mixing suppression by combining phase modulation and dispersion management with data rates up to 10 Gbps. *2013 International Conference on Control Communication and Computing (ICCC)*, 2013: s. 157–161. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6731642>
- [28] Zhou, J.; Park, N.; Dawson, J.; aj.: Efficiency of broadband four-wave mixing wavelength conversion using semiconductor traveling-wave amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, rok vol. 6, ssue 1, 1994: s. 50–52, ISSN 1041-1135. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=265886>



- [29] FAISAL, Mohammad, Mashad Uddin SALEH, Iqbal HASAN a Nabeela KAUSER. Effect of FWM in dispersion-managed ultra-high speed DWDM transmission system. *2012 International Symposium on Telecommunication Technologies*. IEEE, 2012, s. 35-37. DOI: 10.1109/ISTT.2012.6481560. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6481560>
- [30] RASHEED, Iftikhar, Muhammad ABDULLAH, Qazi Md. Hamza MANSOOR a ZIA-UR-REHMAN. Novel Approaches for Suppression of Four Wave Mixing in WDM System Using Concocted Modulation Techniques. *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology*. 2012. DOI: 10.1109/fit.2012.19.
- [31] NEOKOSMIDIS, I., T. KAMALAKIS, A. CHIPOURAS a T. SPHICOPOULOS. New techniques for the suppression of the four-wave mixing-induced distortion in nonzero dispersion fiber WDM systems. *Journal of Lightwave Technology*. 2005, vol. 23, issue 3, s. 1137-1144. DOI: 10.1109/JLT.2004.841448. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1417009>
- [32] RAJIV RAMASWAMI, Kumar N. *Optical Networks a Practical Perspective*. 3rd ed. Burlington: Elsevier, 2009. ISBN 978-008-0920-726.
- [33] HE, Guangsheng a Song H LIU. *Physics of nonlinear optics*. River Edge, NJ: World Scientific, c1999, xxii, 552 p. ISBN 98-102-3319-1.
- [34] YANPENG ZHANG, Zhiqiang Nie. *Coherent control of four-wave mixing*. Beijing: Higher Education Press, 2011. ISBN 978-364-2191-152.
- [35] SUMMERFIELD, M.A. a R.S. TUCKER. Optimization of pump and signal powers for wavelength converters based on FWM in semiconductor optical amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1996, vol. 8, issue 10, s. 1316-1318. DOI: 10.1109/68.536640. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=536640>
- [36] KAI SONG a M. PREMARATNE. Effects of SPM, XPM, and four-wave-mixing in L-band EDFAs on fiber-optic signal transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000, vol. 12, issue 12, s. 1630-1632. DOI: 10.1109/68.896330. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=896330>
- [37] TOULOUSE, J. Optical nonlinearities in fibers: review, recent examples, and systems applications. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2005, vol. 23, issue 11, s. 3625-3641 [cit. 2015-05-10]. DOI: 10.1109/JLT.2005.855877. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1561392>

- [38] MISHRA, B.K., Lochan JOLLY a Karishma MHATRE. Analysis of Four Wave Mixing Effect in WDM Communication System for Different Channel Spacing. 2013. Dostupné z: <http://research.ijcaonline.org/icwet2013/number1/icwet1349.pdf>
- [39] STOLEN, R. a J. BJORKHOLM. Parametric amplification and frequency conversion in optical fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1982, vol. 18, issue 7, s. 1062-1072. DOI: 10.1109/JQE.1982.1071660. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1071660>
- [40] AISSA, Sonia a Martin MAIER. Towards seamless Fiber-Wireless (FiWi) access networks: Convergence and challenges. *2007 ICTON Mediterranean Winter Conference*. IEEE, 2007, s. 1-6. DOI: 10.1109/ICTONMW.2007.4446987. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4446987>
- [41] FREUDE, Wolfgang, Rene SCHMOGROW, Bernd NEBENDAHL, Marcus WINTER, Arne JOSTEN, David HILLERKUSS, Swen KOENIG, Joachim MEYER, Michael DRESCHMANN, Michael HUEBNER, Christian KOOS, Juergen BECKER a Juerg LEUTHOLD. Quality metrics for optical signals: Eye diagram, Q-factor, OSNR, EVM and BER. *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2012, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICTON.2012.6254380. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6254380>
- [42] AGRAWAL, G. *Lightwave technology: telecommunication systems*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2005, xv, 461 p. ISBN 04-712-1572-4.

# Seznam obrázků

2.1	FWM efekt s a) rovnoměrnými rozestupy a b) nerovnoměrnými rozestupy mezi kanály [15] . . . . .	16
3.1	Schématický model optického systému . . . . .	20
3.2	Schéma simulace . . . . .	21
3.3	Smyčka optického vlákna . . . . .	22
3.4	Vstupní optické spektrum pro kanálový odstup 50 GHz . . . . .	22
3.5	Kanálový rozestup 12,5 GHz . . . . .	23
3.6	Kanálový rozestup 25 GHz . . . . .	24
3.7	Kanálový rozestup 40 GHz . . . . .	24
3.8	Kanálový rozestup 50 GHz . . . . .	25
3.9	Kanálový rozestup 75 GHz . . . . .	25
3.10	Chybovost BER v závislosti na kanálovém rozestupu . . . . .	26
3.11	Q faktor v závislosti na kanálovém rozestupu . . . . .	27
3.12	Diagram oka v závislosti na kanálovém rozestupu . . . . .	27
3.13	Diagram oka pro kanálový rozestup 12,5 GHz . . . . .	28
3.14	Diagram oka pro kanálový rozestup 20 GHz . . . . .	29
3.15	Diagram oka pro kanálový rozestup 25 GHz . . . . .	29
3.16	Diagram oka pro kanálový rozestup 40 GHz . . . . .	30
3.17	Diagram oka pro kanálový rozestup 75 GHz . . . . .	30
3.18	Schéma simulace FWM jevu . . . . .	32
3.19	Smyčka optického vlákna . . . . .	33
3.20	Výstupní spektrum pro vstupní výkon -5 dBm . . . . .	33
3.21	Výstupní spektrum pro vstupní výkon 0 dBm . . . . .	34
3.22	Výstupní spektrum pro vstupní výkon 5 dBm . . . . .	34
3.23	Výstupní spektrum pro vstupní výkon 10 dBm . . . . .	35
3.24	Výstupní spektrum pro vstupní výkon 15 dBm . . . . .	35
3.25	Diagram oka pro výkonovou úroveň -5 dBm . . . . .	36
3.26	Diagram oka pro výkonovou úroveň 0 dBm . . . . .	37

3.27	Diagram oka pro výkonovou úroveň 5 dBm . . . . .	37
3.28	Diagram oka pro výkonovou úroveň 10 dBm . . . . .	38
3.29	Diagram oka pro výkonovou úroveň 15 dBm . . . . .	38
3.30	Chybovost BER v závislosti na vstupním výkonu . . . . .	39
3.31	Diagram oka v závislosti na vstupním výkonu . . . . .	40
3.32	Q faktor v závislosti na vstupním výkonu . . . . .	41
3.33	Schéma simulace . . . . .	43
3.34	Vstupní optické spektrum . . . . .	44
3.35	Hodnota disperze 0 ps/nm/km . . . . .	45
3.36	Hodnota disperze 1 ps/nm/km . . . . .	46
3.37	Hodnota disperze 2 ps/nm/km . . . . .	46
3.38	Hodnota disperze 4 ps/nm/km . . . . .	47
3.39	Hodnota disperze 11 ps/nm/km . . . . .	47
3.40	Výkon v závislosti na disperzi . . . . .	48
4.1	Schéma zapojení experimentu . . . . .	49
4.2	Kanálový rozestup 12,5 GHz . . . . .	50
4.3	Kanálový rozestup 25 GHz . . . . .	51
4.4	Kanálový rozestup 50 GHz . . . . .	51
4.5	Kanálový rozestup 100 GHz . . . . .	52
4.6	Kanály a FWM produkty pro zesílení 43 dB . . . . .	53
4.7	Kanály a FWM produkty pro zesílení 34 dB . . . . .	54
4.8	Kanály a FWM produkty pro zesílení 31 dB . . . . .	54
4.9	Kanály a FWM produkty pro zesílení 43 dB . . . . .	56
4.10	Kanály a FWM produkty pro zesílení 33 dB . . . . .	56
4.11	Kanály a FWM produkty pro zesílení 31 dB . . . . .	57
4.12	Případ - dva stejné lasery . . . . .	58
4.13	Případ - dva různé lasery . . . . .	59

# Seznam tabulek

3.1	Tabulka výsledků pro změnu kanálového rozestupu . . . . .	31
3.2	Výsledné hodnoty při změně výkonové úrovně . . . . .	36
4.1	Výsledky - dva stejné lasery . . . . .	58
4.2	Výsledky - dva různé lasery . . . . .	59