

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra telekomunikační techniky**

**Vliv optovláknových fyzikálních jevů závislých na polarizaci na  
optický přenos**

**květen 2022**

**Diplomant: Bc. Vojtěch Baštář**  
**Vedoucí práce: Ing. Michal Lucki, Ph.D.**



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci 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: 17. 5. 2022

.....

podpis diplomanta

## **Poděkování**

Děkuji své rodině a blízkým, zejména své sestře a rodičům, za jejich neutuchající podporu v průběhu celého studia. Dále děkuji vedoucímu práce Ing. Michalovi Luckimu, Ph.D. za jeho vstřícnost a za velice cenné rady a připomínky, které mi v průběhu psaní práce poskytnul.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Baštář** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **474227**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Specializace: **Komunikační sítě a internet**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vliv optovláknových fyzikálních jevů závislých na polarizaci na optický přenos**

Název diplomové práce anglicky:

**Influence of Polarization-dependent Fiber-optic Physical Phenomena on Optical Transmission**

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte závislost vybraných fyzikálních jevů a technik na polarizaci optického záření v optovláknovém přenosovém řetězci (např. nelineární FWM, disperze, vlnový multiplex, kompatibilita jednotlivých prvků). Prozkoumejte vliv změny polarizace na jednotlivé prvky a jevy a celkový dopad na optický přenos. Vyhodnoťte nutnost nastavení a udržování polarizace ve studovaných případech, kdy destruktivní účinky nejsou zanedbatelné a eliminujte tyto negativní důsledky. V situacích, kdy vliv polarizace není destruktivní (např. eliminace FWM s použitím rotující polarizace, polarizační multiplex pro účely navýšení přenosové rychlosti), použijte polarizaci pro zlepšení optického přenosu. Kvalitu přenosu vyhodnoťte s použitím BER, jako jednoho z klíčových parametrů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] M. Fok et al., Polarization Effect on Optical XOR Performance Based on Four-Wave Mixing, IEEE Photonics Technology Letters, Volume: 22, Issue: 15, 2010.
- [2] Z. Yu et al., Distributed birefringence dispersion measurement for polarization-maintaining fiber based on optimization method, 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), Jeju, South Korea, 2017.
- [3] G. Bosco et al., Performance Limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in High-Speed PM-QPSK Systems, IEEE Photonics Technology Letters, Volume: 22, Issue: 15, 2010.

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: **21.01.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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



**Abstrakt:**

Tato diplomová práce se zabývá vlivem optovláknových fyzikálních jevů závislých na polarizaci na optický přenos. Cílem je představit destruktivní účinky polarizace a možná využití polarizace v optických systémech v případech, kdy její účinky destruktivní nejsou. V rámci práce jsou demonstrovány výhody polarizační multiplexu. Zkoumán je vliv polarizace na jevy, které se projevují v jednojádřových vláknech, jako je CD nebo FWM. Data, pomocí kterých jsou vyhodnocovány přenosové vlastnosti, byla získána pomocí simulačního nástroje OptSim. V práci je představena potenciální cesta k optimalizaci 32-kanálového DWDM systému pomocí rotující polarizace.

**Klíčová slova:**

polarizace, optovláknová komunikace, DWDM, CD, FWM, polarizační multiplex, OptSim

**Abstract:**

This master's thesis deals with the influence of polarization-dependent physical fiber-optic phenomena on optical transmission. The goal is to present destructive effects of polarization and the possible utilization of polarization in optical systems in cases when its effects are not destructive. The thesis demonstrates the advantages of polarization multiplexing. The impact of polarization on single-mode fiber effects like CD and FWM is examined. Data used for the evaluation of transmission properties were obtained by the OptSim simulation tool. This thesis presents a potential way to the 32 channel DWDM system optimization via rotating polarization.

**Keywords:**

polarization, optical fiber communication, DWDM, CD, FWM, polarization multiplexing, OptSim





# Obsah

Seznam obrázků .....	xi
Seznam tabulek .....	xii
Seznam zkratk .....	xiii
<b>1. Úvod.....</b>	<b>1</b>
1.1. Cíle práce.....	1
1.2. Struktura práce.....	2
<b>2. Aktuální stav problematiky a související teorie.....</b>	<b>3</b>
2.1. Polarizace optického signálu ve vláknech .....	3
2.2. Modulace.....	5
2.2.1. Modulace OOK .....	6
2.2.2. Modulace DQPSK.....	7
2.2.3. Modulace PM-DQPSK.....	9
2.3. Vlnový multiplex.....	12
2.3.1. Systémy využívající hrubý vlnový multiplex (CWDM) .....	13
2.3.2. Systémy využívající hustý vlnový multiplex (DWDM).....	14
2.4. Lineární jevy v optických vláknech .....	16
2.4.1. Útlum jednovidových vláken a jeho kompenzace.....	16
2.4.2. Chromatická disperze (CD) jednovidových vláken a její kompenzace .....	17
2.4.3. Polarizační vidová disperze (PMD) jednovidových vláken a její kompenzace .....	18
2.5. Nelineární jevy v optických vláknech .....	20
2.5.1. Nelineární jevy vycházející z Kerrova efektu .....	20
2.5.2. Nelineární rozptyl.....	23
<b>3. Metoda.....</b>	<b>24</b>
3.1. OptSim.....	24
3.1.1. Rozvržení simulačního prostředí v OptSim .....	24
3.1.2. Metoda Time Domain Split-step .....	26
3.2. Nástroje pro vyhodnocení výsledků.....	26

<b>4. Simulace vlivu polarizace na optický přenos .....</b>	<b>29</b>
4.1. Vliv polarizace v kombinaci s disperzí na FWM u dvoukanálových WDM systémů .....	29
4.1.1. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u dvoukanálového systému s OOK modulací.....	30
4.1.2. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u dvoukanálového systému s DQPSK modulací.....	32
4.1.3. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u dvoukanálového systému s PM-DQPSK modulací .....	33
4.2. Vliv polarizace v kombinaci s disperzí na FWM u čtyřkanálových WDM systémů .....	34
4.2.1. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u čtyřkanálového systému s OOK modulací.....	35
4.2.2. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u čtyřkanálového systému s DQPSK modulací.....	38
4.2.3. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u čtyřkanálového systému s PM-DQPSK modulací .....	39
4.3. Vliv malých úhlů rotace polarizačního stavu na čtyřkanálové WDM systémy .....	40
4.3.1. Vliv rotace polarizačního stavu kolem jedné osy na FWM.....	41
4.3.2. Vliv rotace polarizačního stavu kolem tří os na FWM .....	43
4.4. Závislost přenosových vlastností na polarizaci u vícekanálových WDM systémů.....	45
4.4.1. Varianty rotující polarizace pro 32-kanálový WDM systém využívající rotaci kolem tří os .....	46
4.4.2. Závislost interakce polarizace a FWM na rozteči kanálů u 32-kanálových WDM systémů .....	51
<b>5. Závěr .....</b>	<b>55</b>
<b>Zdroje.....</b>	<b>57</b>

## Seznam obrázků

<b>Obr. 2.1:</b> Řez dvojitým Fresnelovým kosočtvercem, převzato z [11].....	4
<b>Obr. 2.2:</b> Schéma vysílače využívajícího modulaci OOK.....	6
<b>Obr. 2.3:</b> Schéma přijímače signálu využívajícího modulaci OOK.....	7
<b>Obr. 2.4:</b> Schéma vysílače využívajícího modulaci OOK.....	8
<b>Obr. 2.5:</b> Schéma bloku DQPSK_mod.....	8
<b>Obr. 2.6:</b> Schéma přijímače signálu využívajícího modulaci DQPSK.....	9
<b>Obr. 2.7:</b> Schéma vysílače využívajícího modulaci PM-DQPSK.....	11
<b>Obr. 2.8:</b> Schéma bloku polmux_qpsk.....	11
<b>Obr. 2.9:</b> Schéma přijímače signálu využívajícího modulaci PM-DQPSK.....	12
<b>Obr. 2.10:</b> Principiální schéma WDM systému, převzato z [34].....	13
<b>Obr. 2.11:</b> Porovnání rastrů CWDM a DWDM, převzato z [41].....	15
<b>Obr. 2.12:</b> Zkreslení pulzu vlivem CD, převzato z [37].....	17
<b>Obr. 2.13:</b> Ilustrace vlivu PMD, převzato z [1].....	19
<b>Obr. 2.14:</b> Ilustrace produktů vznikajících vlivem FWM, převzato z [18].....	22
<b>Obr. 3.1:</b> Příklad schématu zapojení.....	24
<b>Obr. 3.2:</b> Oko rozhodnutí, převzato z [70].....	27
<b>Obr. 3.3:</b> BER vs. Q faktor, převzato z [72].....	28
<b>Obr. 4.1:</b> Blokové schéma simulace se dvěma kanály s využitím OOK modulace.....	30
<b>Obr. 4.2:</b> Spektra na výstupu trasy (2-kanálový systém s OOK modulací) ve variantách: (a) disperze 0 ps/(nm·km) bez rotace, (b) disperze 0 ps/(nm·km) s rotací, (c) disperze 2 ps/(nm·km) bez rotace, (d) disperze 2 ps/(nm·km) s rotací.....	31
<b>Obr. 4.3:</b> Výkonová úroveň produktu FWM pro OOK modulaci (simulace 2-kanálového systému) ...	31
<b>Obr. 4.4:</b> Výkonová úroveň produktu FWM pro DQPSK modulaci (simulace 2-kanálového systému).....	32
<b>Obr. 4.5:</b> Výkonová úroveň produktu FWM pro PM-DQPSK modulaci (simulace 2-kanálového systému).....	34
<b>Obr. 4.6:</b> Blokové schéma čtyřkanálového vysílače s OOK modulací.....	35
<b>Obr. 4.7:</b> Spektrum na výstupu trasy (4-kanálový systém s OOK modulací) pro variantu 0 ps/(nm·km) bez rotace.....	36
<b>Obr. 4.8:</b> Výkonová úroveň produktu FWM pro OOK modulaci (simulace 4-kanálového systému).....	37
<b>Obr. 4.9:</b> Výkonová úroveň produktu FWM pro DQPSK modulaci (simulace se čtyřmi kanály).....	38

<b>Obr. 4.10:</b> Výkonová úroveň produktu FWM pro modulaci PM-DQPSK (simulace se čtyřmi kanály) .....	40
<b>Obr. 4.11:</b> Výkonová úroveň produktu FWM pro různé úhly rotace kolem jedné osy (simulace 4-kanálového systému) .....	42
<b>Obr. 4.12:</b> Výkonová úroveň produktu FWM pro různé úhly rotace kolem tří os (simulace 4-kanálového systému) .....	43
<b>Obr. 4.13:</b> Blokové schéma simulace WDM systému se třiceti dvěma kanály (DQPSK modulace) .....	46
<b>Obr. 4.14:</b> Spektrum na výstupu trasy (32-kanálový systém s DQPSK modulací) pro variantu 0 ps/(nm·km) bez polarizace .....	48
<b>Obr. 4.15:</b> Spektrum na výstupu trasy (32-kanálový systém s DQPSK modulací) pro variantu 1 ps/(nm·km) s polarizací .....	48
<b>Obr. 4.16:</b> Bitová chybovost signálu na konci trasy pro zkoumané kombinace polarizace a disperze (WDM systém s 32 kanály a DQPSK modulací) .....	51
<b>Obr. 4.17:</b> Spektra DWDM na výstupu trasy u systému s 32 kanály, DQPSK modulací, disperzí vláken 0 ps/(nm·km) bez použití polarizace ve variantách: (a) rozteč kanálů 12,5 GHz, (b) rozteč kanálů 25 GHz, (c) rozteč kanálů 50 GHz, (d) rozteč kanálů 100 GHz .....	52
<b>Obr. 4.18:</b> Spektra DWDM na výstupu trasy u systému s 32 kanály, modulací DQPSK, disperzí vláken 0 ps/(nm·km) s použitím polarizační varianty číslo 5: (a) rozteč kanálů 12,5 GHz, (b) rozteč kanálů 25 GHz .....	53

## Seznam tabulek

<b>Tab. 4.1:</b> Hodnoty BER na konci trasy (OOK modulace) .....	38
<b>Tab. 4.2:</b> Hodnoty BER na konci trasy (DQPSK modulace) .....	39
<b>Tab. 4.3:</b> Osy a úhly rotace u simulovaných variant .....	47
<b>Tab. 4.4:</b> Bitová chybovost signálu na konci trasy pro zkoumané kombinace polarizace a disperze (WDM systém s 32 kanály a DQPSK modulací) .....	51
<b>Tab. 4.5:</b> Bitová chybovost signálu na konci trasy pro zkoumané varianty rozteče kanálů (WDM systém s 32 kanály a DQPSK modulací) .....	54

## Seznam zkratek

- ASE** Amplified Spontaneous Emission
- BER** Bit Error Rate
- CD** Chromatic Dispersion
- CMA** Constant Modulus Algorithm
- CW** Continuous Wave
- CWDM** Coarse Wavelength Division Multiplexing
- DCF** Dispersion Compensating Fiber
- DQPSK** Differential Quadrature Phase Shift Keying
- DWDM** Dense Wavelength Division Multiplexing
- EDC** Electronic Dispersion Compensation
- EDFA** Erbium Doped Waveguide Amplifier
- FBG** Fiber Bragg Grating
- FWM** Four Wave Mixing
- GSNR** Generalised Signal to Noise Ratio
- LMS** Least Mean Square
- LMS** Least Mean Square
- MAN** Metropolitan Area Network
- MZM** Mach-Zehnder Modulator
- NLI** Non-Linear Interference
- NRZ** Non-return-to-Zero
- OOK** On-Off Keying
- PDL** Polarization Dependent Loss
- PDM** Polarization Division Multiplexing
- PM-16QAM** Polarization Multiplexed-Quadrature Amplitude Modulation
- PM-DPSK** Polarization Multiplexed-Differential Phase Shift Keying
- PM-DQPSK** Polarization Multiplexed-Differential Quadrature Phase Shift Keying
- PM-QPSK** Polarization Multiplexed-Quadrature Phase Shift Keying
- PMD** Polarization Mode Dispersion
- RA** Raman Amplifier
- RSOP** Rotation of the State of Polarization
- RZ** Return-to-Zero
- SBS** Stimulated Brillouin Svattering
- SNR** Signal to Noise Ratio

**SOA** Semiconductor Optical Amplifier  
**SOP** State of Polarization  
**SPM** Self Phase Modulation  
**SRS** Stimulated Raman Scattering  
**TDSS** Time Domain Split-step  
**WDM** Wavelength Division Multiplexing  
**XPM** Cross Phase Modulation

# 1. Úvod

Optické komunikační systémy jsou v současné době nepostradatelnou součástí telekomunikačních a datových sítí. Optické vlákno se díky svým fyzikálním vlastnostem a nízké pořizovací ceně stalo nejpoužívanějším přenosovým médiem. Vzhledem k neustále narůstající poptávce po navýšení přenosové kapacity je nutné zmíněné fyzikální vlastnosti optických vláken a s nimi související jevy zkoumat.

Jedním z jevů, které mohou výrazným způsobem ovlivnit přenosové vlastnosti optických komunikačních systémů, je polarizace. Zejména u dálkových vysokokapacitních spojů, které jsou využívány pro mezinárodní a mezikontinentální přenos, je potřeba brát polarizaci a s ní spojené efekty v úvahu. Ve snaze dosáhnout co možná největších přenosových rychlostí na velmi dlouhé vzdálenosti jsou optické systémy optimalizovány tak, aby byly polarizační jevy eliminovány, pokud jsou pro optický přenos destruktivní, anebo jsou polarizační jevy naopak využívány k optimalizaci systému, pokud je pomocí nich možné dosáhnout lepších přenosových vlastností.

Vlivem polarizace může docházet ke zhoršení přenosových vlastností, zejména pokud optický systém využívá vlnový multiplex a polarizace interaguje s jinými nežádoucími jevy ve vláknech, jako je například disperze. Naopak v případě nelineárního jevu čtyřvlnného směšování je možné polarizaci využít pro zlepšení přenosových vlastností. Modulace využívající polarizační multiplex navíc umožňují dosažení vyšších přenosových rychlostí a v některých případech i vykazují větší odolnost proti nežádoucím jevům.

## 1.1. Cíle práce

Hlavním cílem práce je prozkoumat vliv polarizace na jevy v optických vláknech a celkový dopad polarizace na optický přenos. Dílčí cíle práce jsou:

- představit možné destruktivní účinky polarizace a způsoby jejich potlačení,
- představit možné varianty vylepšení přenosových vlastností v případech, kdy účinky polarizace destruktivní nejsou.

V práci je kladen důraz zejména na demonstraci možných výhod využití polarizačního multiplexu a na interakci polarizace s jevy, které se projevují v jednovlákových vláknech a mohou ovlivnit přenosové vlastnosti u systémů využívajících vlnový multiplex.

Pro dosažení uvedených cílů bylo nutné prostudovat závislost vybraných fyzikálních jevů a technik na polarizaci a prozkoumat a seznámit se se simulačním prostředím nástroje OptSim, který je v rámci této diplomové práce používán. Kvalita přenosu je vyhodnocována pomocí bitové chybovosti.

## ***1.2. Struktura práce***

Tato diplomová práce je rozdělena do celkem pěti částí, přičemž první částí je samotný úvod. Druhá část se zabývá aktuálním stavem problematiky. V jejích kapitolách a podkapitolách je popsána nezbytná teorie poskytující přehled o zkoumaných technologiích a jevech a zároveň jsou zde diskutovány vědecké práce zabývající se související problematikou. Ve třetí části jsou popsány metody použité pro provedení simulací a následné vyhodnocení výsledků. Právě simulace a jejich výsledky jsou podrobně diskutovány ve čtvrté části této diplomové práce. Poslední pátá část pak obsahuje shrnutí dosažených výsledků, celkové zhodnocení práce a jsou zde uvedena i možná budoucí rozšíření a způsoby, jak by na tuto práci mohlo být možné navázat.



## 2. Aktuální stav problematiky a související teorie

V následujících kapitolách a podkapitolách bude stručně popsána teorie, kterou je užitečné znát v souvislosti s technologiemi, které jsou v rámci simulací provedených v průběhu tvorby této práce používány. Stejně tak zde bude uvedena teorie, která popisuje sledované a diskutované jevy ovlivňující datový přenos optickými vlákny.

Kromě zmíněné teorie bude v těchto kapitolách popsán aktuální stav zkoumané problematiky. Tím jsou myšleny zejména vědecké články a výzkumy, které byly v době tvorby této práce stále relevantní a které se zabývají podobnou nebo přinejmenším související problematikou (fyzikální jevy a technologie) s problematikou zkoumanou a diskutovanou v rámci této diplomové práce. Některé tyto články zároveň sloužily jako inspirace pro některé z provedených simulací.

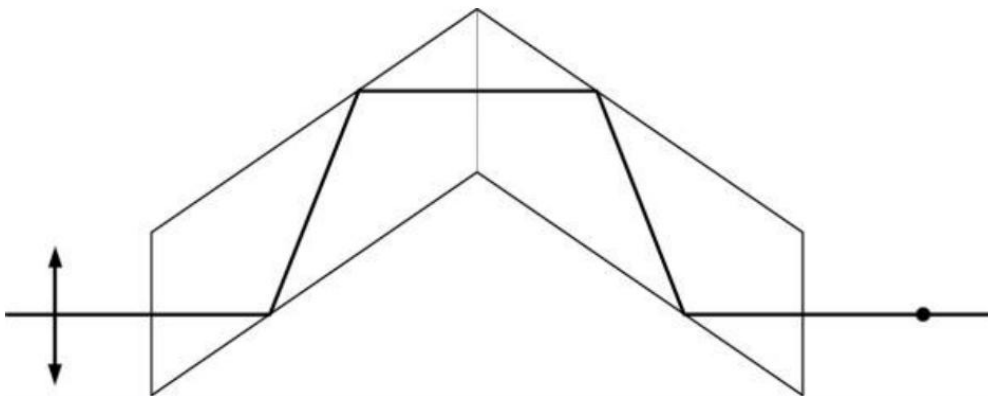
### 2.1. Polarizace optického signálu ve vláknech

V této kapitole bude popsáno, jak se polarizace projevuje v kontextu přenosu dat optickými sítěmi, jak je možné polarizace dosáhnou před vysláním signálu, jak k polarizaci může docházet v průběhu přenosu a jaké následky nebo případně využití může polarizace mít. Praktická část práce se zabývá vlivem polarizace na jevy a technologie, které se uplatňují v optických přenosech, a naopak zde není diskutován jev polarizace jako takový. Z toho důvodu je tato část zaměřená zejména na představení technologií použitých v simulacích, jevů, které jsou v simulacích zkoumány, a je zde diskutován případný vliv polarizace na tyto technologie a jevy. Fyzikální základ pojmu polarizace vycházející z elektromagnetismu je podrobně rozebrán například v [1, kapitola 2], [2, kapitola 1.2] nebo ve [3, kapitola 2.4].

Z možných případů, kdy může mít polarizace pozitivní vliv na optický přenos, jsou v rámci této diplomové práce podrobeny zkoumání zejména dvě oblasti využití, přičemž v obou případech slouží polarizace k navýšení spektrální účinnosti [6]. Jednou z těchto oblastí využití je polarizační multiplex v rámci modulace přenášeného signálu (blíže popsáno v kapitole 2.2.3) a druhou je pak potlačení čtyřvlnného směšování (angl. Four Wave Mixing, FWM) s využitím polarizace kanálů (blíže popsáno v kapitole 2.5.1). V případě polarizačního multiplexu, tedy například u modulace PM-QPSK (Polarization Multiplexed-Quadrature Phase Shift Keying) nebo PM-16QAM (Polarization Multiplexed-Quadrature Amplitude Modulation), je využíváno přenosu dvou informačních proudů pomocí dvou vzájemně ortogonálních polarizačních stavů (angl. State of Polarization, SOP). Prakticky to znamená, že jsou tyto dvě polarizace vzájemně otočeny o  $90^\circ$  [8]. V případě potlačování FWM pomocí polarizace je využíván velmi podobný princip. Stejně jako v případě polarizačního multiplexu se jedná o rotující polarizaci (tedy o vzájemné otočení jednotlivých polarizačních stavů o určitý úhel), ale k polarizaci dochází o krok později. Polarizovány jsou zde již samotné kanály, kterými jsou

odesílána data v rámci vlnového multiplexu (angl. Wavelength Division Multiplexing, WDM), přičemž cílem je, aby dva sousední kanály byly vždy otočeny o jiný úhel [4].

V rámci simulací provedených v průběhu vypracování této diplomové práce bylo výše uvedené rotující polarizace dosaženo v obou případech (u polarizačního multiplexu a potlačování FWM) pomocí optického prvku, který v simulačním nástroji OptSim představuje funkci polarizačního rotátoru (angl. polarization rotator). Jedná se o optické zařízení, které mění SOP optického signálu na svém vstupu. Toto zařízení rotuje polarizační vektor kolem jedné z polarizačních os (polarizační rotátor využívaný v provedených simulacích umožňuje rotaci kolem tří os) vstupujícího optického paprsku o zvolený úhel [12]. Na základě technologie, pomocí které je této rotace dosahováno, můžeme polarizační rotátory rozdělit na několik typů. Zmínit můžeme rotátory využívající Faradayův jev [13], rotátory využívající dvojlom za pomoci půlvlnných a čtvrtvlnných destiček [14] nebo hranolové rotátory, kde je rotace dosahována několikanásobným odrazem uvnitř hranolu [15]. Na obrázku 2.1 je pro ilustraci uveden jako příklad hranolového rotátoru takzvaný dvojitý Fresnelův kosočtverec. Ten využívá čtyři vnitřní odrazy k provedení polarizační rotace o  $90^\circ$ , takže světelný paprsek na jeho výstupu je polarizován ortogonálně k paprsku na jeho vstupu. Tento konkrétní polarizátor by se tedy dal použít u modulací využívajících polarizační multiplex [11, kapitola 5.8]. V dokumentaci simulačního nástroje OptSim [9] není nijak blíže specifikováno, kterou z uvedených technologií prvek plní funkci polarizačního rotátoru využívá. Dvojitý Fresnelův kosočtverec se jeví jako vhodná volba pro rotaci o  $90^\circ$  v případě, kdy by na tuto práci bylo navázáno praktickými experimenty.



**Obr. 2.1:** Řez dvojitým Fresnelovým kosočtvercem, převzato z [11]

Polarizace pochopitelně nemá na přenos dat optickými spoji jen pozitivní vliv a naopak může vést k degradaci SNR (Signal to Noise Ratio) a k zásadnímu zhoršení kvality přenosu. Kromě dělení jevů objevujících se v optických vláknech na lineární a nelineární (blíže popsáno v kapitolách 2.4 a 2.5) můžeme podle [16] zdroje poškození nebo zhoršení kvality optického spoje rozdělit do dvou kategorií. Jednou kategorií jsou poškození deterministická, kam lze řadit například ASE (Amplified Spontaneous Emission) šum nebo NLI (Non-Linear Interference) šum způsobený Kerr efektem, který se skládá ze složek daných nelineárními jevy SPM (Self Phase Modulation), XPM (Cross Phase Modulation) a FWM (detailně popsáno v kapitole 2.5) [18, kapitola 2.2]. Dopad těchto deterministických poškození optického spoje na kvalitu přenosu je možné sledovat s využitím GSNR (Generalised Signal to Noise Ratio) [17]. Druhou kategorií jevů zhoršujících přenos jsou poškození náhodná, která vycházejí z nedokonalostí optických zařízení a vláken na trase. Všechna tato náhodná poškození jsou založena právě na problémech způsobených polarizací, přičemž konkrétně se jedná o PMD (Polarization Mode Dispersion), PDL (Polarization Dependent Loss) a RSOP (Rotation of the State of Polarization). PMD (detailně popsáno v kapitole 2.4.3) je primárně způsobováno dvojlomem vláken, kdy jsou signály s různými polarizačními stavy přenášeny různými rychlostmi [18, kapitola 2.1]. PDL se projevuje u komponent, jejichž vložný útlum, který přidávají do trasy, se liší v závislosti na SOP přenášeného signálu [18, kapitola 2.1]. RSOP je dáno faktem, že vlivem teplotního kolísání nebo ohybů může docházet k náhodným změnám dvojlomu vláken na trase a tím pádem i k náhodným změnám SOP [21].

## **2.2. Modulace**

Tato kapitola je zaměřena na popis a porovnání modulačních formátů využívaných v optických přenosových systémech. Modulace zde budou porovnávány z hlediska jejich spektrální účinnosti, struktury vysílačů a přijímačů a z hlediska potenciální použitelnosti ve WDM systémech s ohledem na složitost (komplexnost) používaných zařízení a přenosové vlastnosti. Popisovány zde budou modulační formáty využívané v rámci simulací provedených v průběhu vypracování této diplomové práce, přičemž každému z těchto modulačních formátů je věnována jedna z podkapitol této sekce. Konkrétně se jedná o modulace

- OOK (On-Off Keying),
- DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying),
- PM-DQPSK (Polarization Multiplexed-Differential Quadrature Phase Shift Keying).

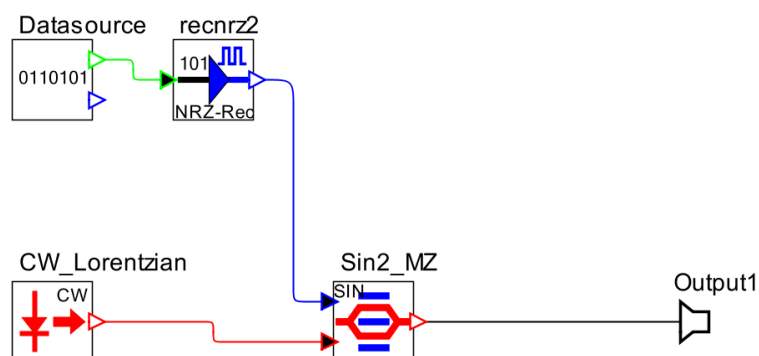
Tyto a další modulační formáty využívané ve WDM optovláknových ale i bezdrátových přenosových systémech jsou včetně související teorie detailně popsány například v [18, kapitola 5.3] nebo [23, kapitola 11].

V provedených simulacích jsou vždy na nosný světelný paprsek modulovány signálové posloupnosti typu NRZ (Non-return-to-Zero). Porovnání NRZ a RZ (Return-to-Zero) modulačních formátů je stručně uvedeno v kapitole 2.2.1.

### 2.2.1. Modulace OOK

Modulace OOK patří mezi amplitudové modulace, což znamená, že přenášená informace (přenášená data) je zakódovaná do amplitudy vysílaného optického signálu. Konkrétně se jedná o modulaci dvoustavovou neboli binární, což znamená, že vysílač na nosný optický signál moduluje jen jeden zdroj dat (viz obrázek 2.2), přičemž stav logické „1“ odpovídá vysílání optického signálu s určitým výkonem a stav logická „0“ odpovídá nulovému vysílacímu výkonu neboli absenci optického pulzu [25]. Modulace OOK může být realizována ve formátu NRZ anebo RZ, přičemž v provedených simulacích byla použita vždy varianta NRZ. RZ je z těchto dvou možností obecně považována za variantu s lepšími přenosovými vlastnostmi, a to zejména u dlouhých spojů [26]. Modulační formáty na bázi RZ vykazují oproti NRZ modulačním formátům větší odolnost proti mezisymbolové interferenci (angl. Intersymbol Interference, ISI) a některým lineárním a nelineárním zkreslujícím jevům na trase [6]. Naopak hlavní výhodou NRZ formátů oproti RZ formátům je jednoduchost struktury a konfigurace vysílačů a přijímačů. Tento fakt v kombinaci s poměrně slušnou odolností proti chromatické disperzi vláken na trase je hlavním důvodem, proč byla modulace NRZ-OOK u WDM systémů používána mnohem častěji než modulace RZ-OOK [24]. V současnosti se však vlivem větší poptávky po přenosové kapacitě přechází na komplexnější modulační formáty, které vykazují větší spektrální účinnost, neboť modulace OOK přenáší jen jeden bit na symbol.

Na obrázku 2.2 je uvedeno schéma zapojení vysílače použité v provedených simulacích. Vysílaná datová posloupnost generuje obdélníkový NRZ elektrický signál, který je následně modulován pomocí MZM (Mach-Zehnder Modulator) [27] na nosný optický signál. Ten je generován pomocí laseru pracujícího v režimu spojitě vlny (angl. Continuous Wave, CW).



**Obr. 2.2:** Schéma vysílače využívajícího modulaci OOK

Na obrázku 2.3 je schéma přijímače používaného pro simulace zkoumající systémy využívající modulaci OOK. Jak již bylo uvedeno, jedná se o poměrně jednoduchou strukturu. Signál využívající modulaci OOK je ve většině případů detekován přímo [18, kapitola 5.3]. Přijatý optický signál projde optickým filtrem typu pásmová propust, který z optického spektra vyfiltruje signál na sledované frekvenci (jeden z vysílaných kanálů, pokud se bavíme o WDM systémech). Takto filtrovaný optický signál je pak pomocí PIN fotodiody převeden na signál elektrický, který následně prochází elektrickým filtrem typu dolní propust za účelem potlačení šumu.



**Obr. 2.3:** Schéma přijímače signálu využívajícího modulaci OOK

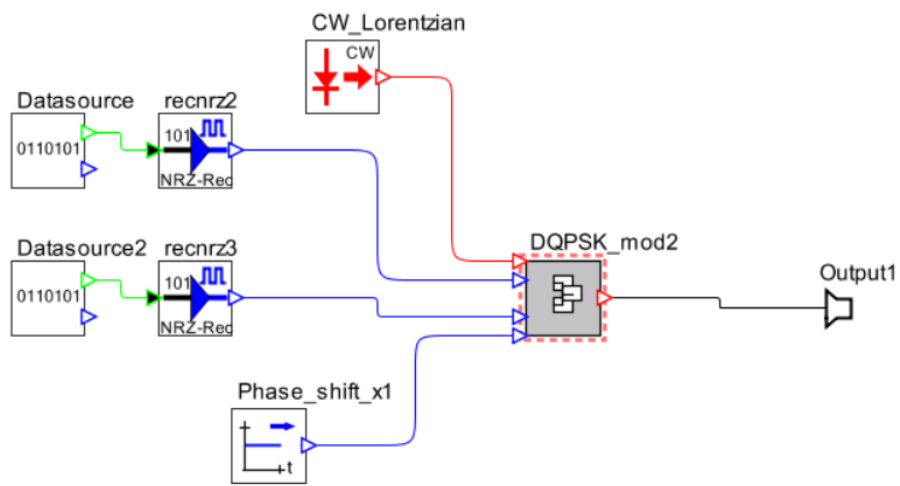
## 2.2.2. Modulace DQPSK

Modulace DQPSK patří mezi takzvané víceúrovňové modulační formáty, což je kategorie, do které řadíme modulace přenášející více než jeden bit na symbol. U modulace DQPSK jsou přenášeny dva bity na symbol odpovídající jednomu fázovému posuvu z množiny  $\{0, +\pi/2, -\pi/2, \pi\}$  [24]. To je dvojnásobný počet bitů na symbol oproti modulaci OOK diskutované v předchozí kapitole. Díky tomuto faktu je přechodem z modulace OOK na DQPSK možné zdvojnásobit bitovou rychlost při zachování stejné symbolové rychlosti nebo případně zachovat stejnou bitovou rychlost při snížení symbolové rychlosti na polovinu.

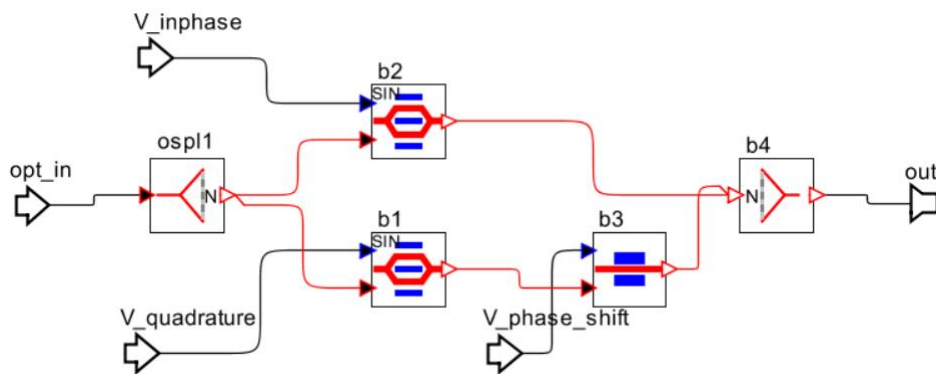
V [52] jsou porovnávány modulace RZ-OOK, NRZ-OOK, duobinární modulace a DQPSK z pohledu citlivosti přijímače ve 40 Gb/s WDM systému. Z analyzovaných modulací vykazovala DQPSK nejlepší výsledky. V [53] jsou porovnávány modulace OOK a DQPSK při použití ve WDM pasivní optické síti. V rámci simulací bylo prokázáno, že pomocí modulace DQPSK je možné dosáhnout vyšší kvality přenosu (nižší chybovost). Různé modulační formáty, konkrétně NRZ, RZ, CRZ (Chirped RZ), CSRZ (Carrier Suppressed RZ), DPSK a DQPSK, jsou v [54] porovnávány z hlediska odolnosti proti nelineárním jevům a PMD. Z výsledků simulací plyne, že modulace NRZ-DQPSK je za přítomnosti nelinearity odolnější proti PMD než zbylé ze simulovaných modulací.

Využití modulace DQPSK je vhodnou cestou k navýšení přenosové kapacity ve WDM systémech. Zároveň je z výsledků uvedených analýz možné konstatovat, že modulace DQPSK má lepší přenosové vlastnosti než v minulé kapitole popsaná modulace OOK.

Schéma zapojení bloku plnicího v provedených simulacích funkci vysílače je uvedené na obrázku 2.4. Na obrázku 2.5 je pak schéma zapojení bloku *DQPSK\_mod* (viz obrázek 2.4), který v simulacích plní funkci DQPSK modulátoru. Optický signál generovaný laserem je pomocí rozbočovače rozdělen do dvou větví a v každé z těchto větví je jeden MZM plnicí funkci fázového modulátoru (otáčí fázi v závislosti na průběhu NRZ elektrického signálu). V jedné z větví pak signál projde ještě fázovým posunovačem (angl. phase shifter) a následně jsou již namodulované signály z obou větví pomocí optického slučovače spojeny, aby dohromady tvořily jeden výstupní signál.

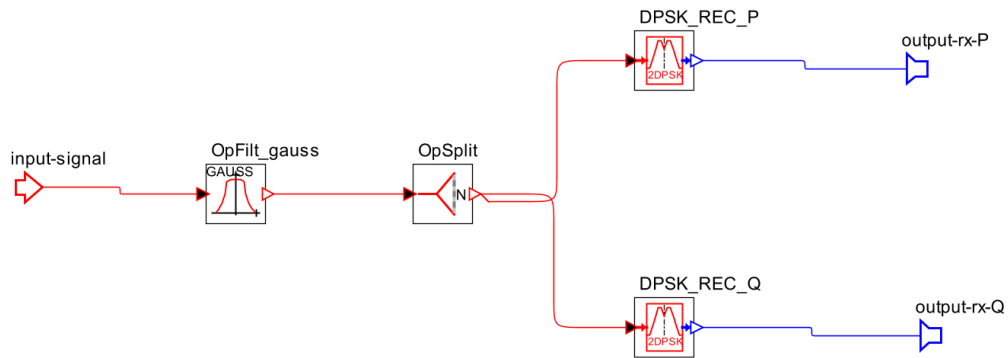


**Obr. 2.4:** Schéma vysílače využívajícího modulaci OOK



**Obr. 2.5:** Schéma bloku *DQPSK\_mod*

Na obrázku 2.6 je uvedeno schéma přijímače používaného pro simulace zkoumající systémy využívající modulaci DQPSK. Podobně, jako bylo ve vysílači potřeba spojit do jednoho signálu symboly vytvořené na soufázové (angl. In phase, I) a kvadrurní (angl. Quadrature, Q) ose, je v přijímači nutné přijatý optický signál rozdělit po průchodu optickým filtrem typu pásmová propust do dvou větví. V těchto dvou větvích je převáděna I a Q složka přijatého optického signálu na signál elektrický pomocí DPSK (Differential Phase Shift Keying) přijímačů. DPSK přijímače (bloky *DPSK\_REC* na obrázku 2.6) se skládají z Mach-Zahnerova interferometru, který má dva optické výstupy, a dvou ideálních PIN fotodiód. Při průchodu interferometrem dochází k rozdělení na dva optické signály, mezi kterými je zpoždění  $\tau$ , které odpovídá době trvání jednoho bitu. Tyto dva optické signály jsou detekovány pomocí zmíněných PIN fotodiód a výstup DPSK přijímače pak odpovídá rozdílu mezi těmito dvěma detekovanými signály [9].



**Obr. 2.6:** Schéma přijímače signálu využívajícího modulaci DQPSK

### 2.2.3. Modulace PM-DQPSK

Modulace PM-DQPSK patří mezi modulace využívající polarizační multiplex (angl. Polarization Division Multiplexing, PDM). Ve výsledku to znamená, že jsou data přenášena s využitím dvou vzájemně ortogonálních polarizačních stavů, čehož je dosaženo pomocí polarizačního rotátoru (viz kapitola 2.1). Přechodem z modulace DQPSK na PM-DQPSK opět (podobně jako při přechodu z OOK na DQPSK) zdvojnásobíme spektrální účinnost, což můžeme považovat za hlavní výhodu použití polarizačního multiplexu.

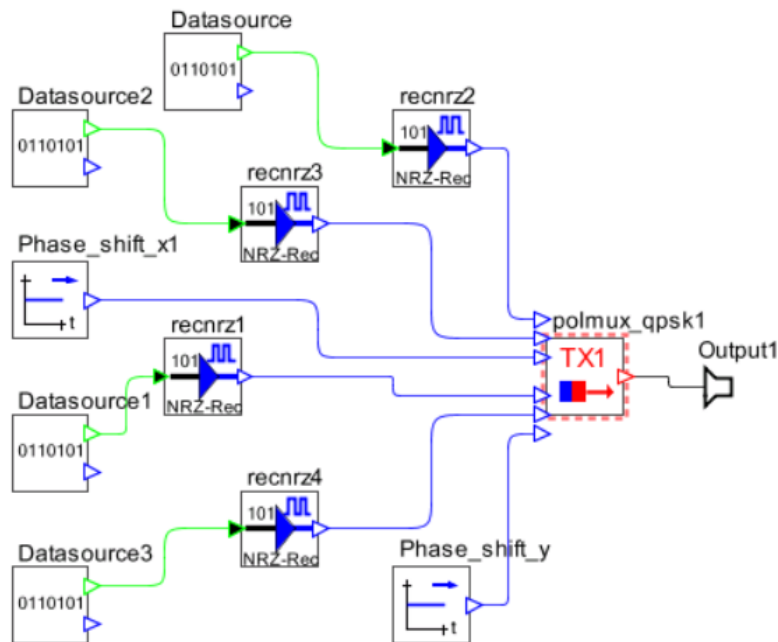
Potřeba škálování DWDM systémů za účelem dosažení větších přenosových kapacit je diskutována v [55]. Jako jedna z možných variant řešení tohoto problému je demonstrován stabilní systém přenášející data o rychlosti 112 Gb/s na vzdálenost 960 km využívající PM-DQPSK modulaci a automatické monitorování SOP. Podobný experiment je popsán v [56], kde je zkoumána spolehlivost systému využívající modulaci PM-DQPSK, který přenáší data rychlostí 100 Gb/s. Získaná experimentální data potvrzují dlouhodobou stabilitu zkoumaného systému. V [57] jsou porovnávány 43 Gb/s modulace PM-DPSK a PM-DQPSK z hlediska jejich vhodnosti pro použití ve velmi dlouhých

optických spojích. Experimentálně je demonstrována větší odolnost modulace PM-DPSK proti nelineárním jevům, díky čemuž je s využitím modulace PM-DPSK dosáhnout o přibližně 40 % delší přenosové vzdálenosti než u modulace PM-DQPSK. Z hlediska maximálního dosahu a maximální přenosové vzdálenosti jsou v [58] porovnávány modulace PM-QPSK, PM-8QAM (Polarization Multiplexed-8 Quadrature Modulation) a PM-16QAM vysílající s modulační rychlostí 27,75 GBd. V rámci simulací bylo zjištěno, že pomocí modulace PM-QPSK je možné dosáhnout rychlosti až 14 Tb/s s využitím kanálu v C pásmu, zatímco s modulací PM-16QAM je možné při zachování maximální bitové chybovosti  $10^{-4}$  dosáhnout rychlosti i 27 Gb/s. Pomocí modulace PM-QPSK je však díky její větší odolnosti proti nežádoucím jevům možné dosáhnout přenosové vzdálenosti až 2400 km, přičemž s pomocí modulace PM-16QAM pouhých 300 km.

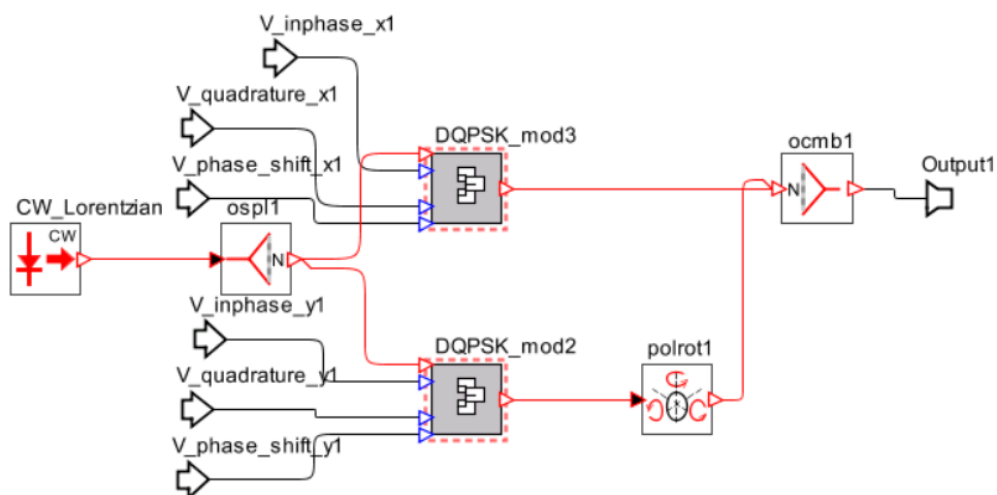
Využití polarizačního multiplexu je velice efektivní způsob navýšení přenosové kapacity ve WDM systémech. Z výše popsaných analýz a experimentů se ze zkoumaných modulací využívajících polarizační multiplex zdá být modulace PM-DQPSK vhodným kompromisem z hlediska dosažitelné přenosové kapacity a vzdálenosti. Zároveň tato modulace projevuje stabilní přenosové vlastnosti.

Schéma zapojení bloku plnicího v provedených simulacích funkci vysílače je uvedené na obrázku 2.7. Na obrázku 2.8 je pak schéma zapojení bloku *polmux\_qpsk* (viz obrázek 2.7), ve kterém dochází k polarizační multiplexaci. Ze schémat je patrné, že vysílače pracující s PDM jsou o něco komplexnější, ale kromě polarizačního rotátoru (prvek *polrot1* v obrázku 2.8) nejsou využívána žádná zařízení, se kterými nebylo pracováno u modulací popsaných v předchozích dvou kapitolách. Ve vysílači je optický signál z laseru rozdělen do dvou paralelních větví a v obou z nich prochází DQPSK modulátory (funkce popsána v kapitole 2.2.2), které na nosný optický signál modulují vždy dva elektrické signály generované datovým tokem (dohromady se tedy jedná o 4 datové toky). V jedné z větví pak ještě s pomocí polarizačního rotátoru dochází k otočení o  $180^\circ$  a následně jsou signály z obou větví spojeny v jeden výstupní optický signál.





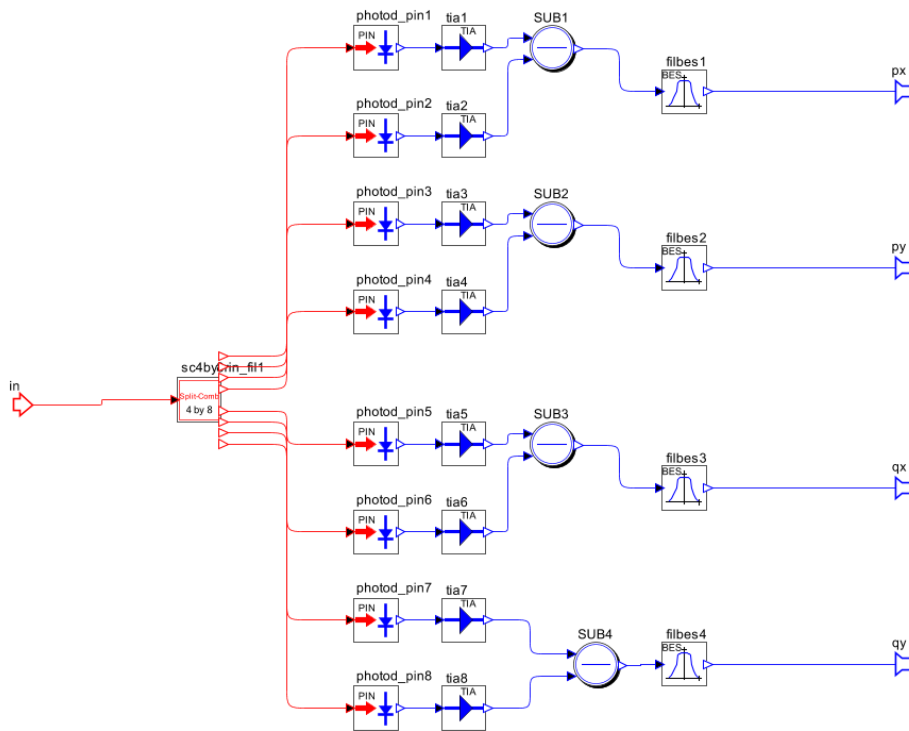
**Obr. 2.7:** Schéma vysílače využívajícího modulaci PM-DQPSK



**Obr. 2.8:** Schéma bloku polmux\_qpsk

Podobně jako vysílače jsou i přijímače u systémů využívajících PDM poměrně komplexní. Schéma přijímače používaného v simulacích zkoumající systémy s modulací PM-DQPSK je na obrázku 2.9. Po odfiltrování požadované frekvence pomocí pásmové propusti (zapojené před přijímač samotný) signál vstupuje do bloku, který je ve schématu označen jako *sc4by8rin\_fil*. V tomto bloku je signál rozdělen na dvě polarizační komponenty pomocí PBS (Polarization Beam Splitter), jejichž funkce a realizace je blíže popsána např. v [29]. Takto oddělené polarizační složky pak vstupují do 90° hybridních obvodů, kde dochází k interferenci se signálem z lokálního oscilátoru a výstupy těchto hybridů pak odpovídají I a Q složkám jednotlivých polarizačních komponent. Bližší popis funkce

a realizace 90° hybridního obvodu je popsána např. v [30]. Zapojením PIN fotodiod na 8 dostupných výstupů je pak možné získat všechny čtyři složky přenášeného signálu pomocí režimu vyvážené fotodetekce, tedy metody fotodetekce, kdy výsledný elektrický signál získáváme pomocí rozdílu proudů ze dvou fotodiod [31]. Vysílané bitové posloupnosti pak byly v rámci provedených simulací z takto detekovaných složek získány pomocí PM-QPSK přijímače využívajícího algoritmus LMS (Least Mean Square) a tréninkovou sekvenci [9].

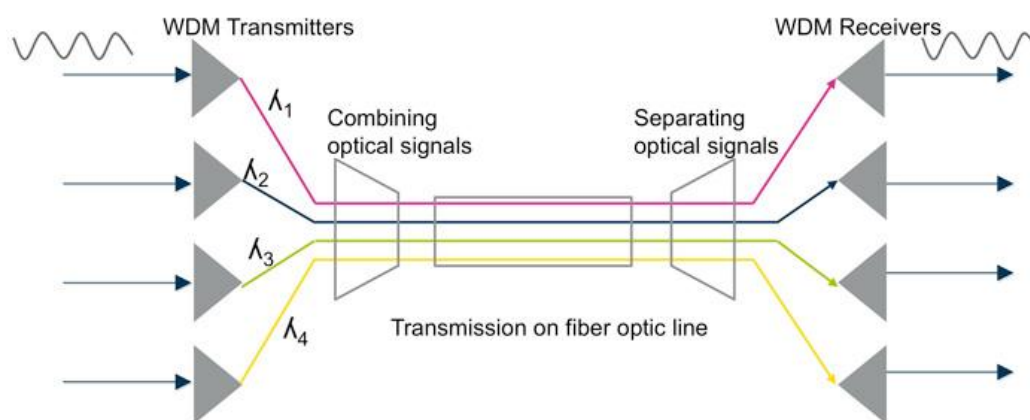


**Obr. 2.9:** Schéma přijímače signálu využívajícího modulaci PM-DQPSK

### 2.3. Vlnový multiplex

Technologie vlnového multiplexu (angl. Wavelength Division Multiplexing, WDM) vychází z myšlenky vysílání několika datových toků jedním optickým vláknem současně. Každý z těchto datových toků je vyslán na jiné vlnové délce (na jiné frekvenci), přičemž všechny tyto vlnové délky musí být vzájemně ortogonální (nezávislé) [33, kapitola 1.2]. WDM systémy se skládají z  $n$  vysílačů a přijímačů, jejichž počet se může řádově pohybovat až ve stovkách (více v kapitole 2.3.2). Ve zmíněných vysílačích je na nosný optický paprsek generovaný laserem namodulován přenášený datový tok, přičemž každý laser vysílá na jiné vlnové délce. Tyto vlnové délky (přenosové kanály) jsou následně sloučeny pomocí multiplexoru a navázány do jednoho optického vlákna. Po průchodu optickou trasou jsou jednotlivé kanály od sebe pomocí demultiplexoru opět odděleny a dále zpracovány v přijímačích [18, kapitola 1.1]. Principiální schéma WDM systému je na obrázku 2.10.

Používané modulační formáty a schémata vysílačů použitých v rámci provedených simulací jsou popsány výše v kapitolách 2.2.1 až 2.2.3.



**Obr. 2.10:** Principiální schéma WDM systému, převzato z [34]

Hlavní výhodou a důvodem využití vlnového multiplexu je značné navýšení přenosové rychlosti oproti jednocanálovým systémům. Využívá-li WDM systém  $n$  vlnových délek, pak celková kapacita systému odpovídá součtu všech přenosových rychlostí na jednotlivých kanálech. Další výhody využití WDM systémů jsou [35]:

- flexibilita v přidávání kanálů i v průběhu trasy,
- možnost využití jednovidových vláken používaných u jednocanálových systémů,
- snížení ceny výstavby spoje vlivem snížení potřebného počtu vláken,
- snadná škálovatelnost – do zavedených systémů je možné přidat další kanály nebo navýšit přenosovou rychlost v již zavedených kanálech.

ITU-T v současnosti definuje dva standardy vlnového multiplexu. Jedním je takzvaný hrubý vlnový multiplex (angl. Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM) a druhým je hustý vlnový multiplex (angl. Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM). Oba tyto standardy jsou popsány v kapitolách 2.3.1 a 2.3.2.

### 2.3.1. Systémy využívající hrubý vlnový multiplex (CWDM)

Standard CWDM je detailně popsán v rámci ITU-T G.694.2 [36]. Hrubý vlnový multiplex pracuje na velmi širokém rozmezí vlnových délek. S tím souvisí i poměrně výrazná rozteč mezi jednotlivými kanály, kterou tento standard vlnového multiplexu využívá. Na obrázku 2.11 v kapitole 2.3.2 je uvedeno rozložení kanálů (rastr) využívaných v CWDM systémech tak, jak je definováno v ITU-T G.694.2. Zároveň je do obrázku vynesena závislost měrného útlumu vláken na vlnové délce.

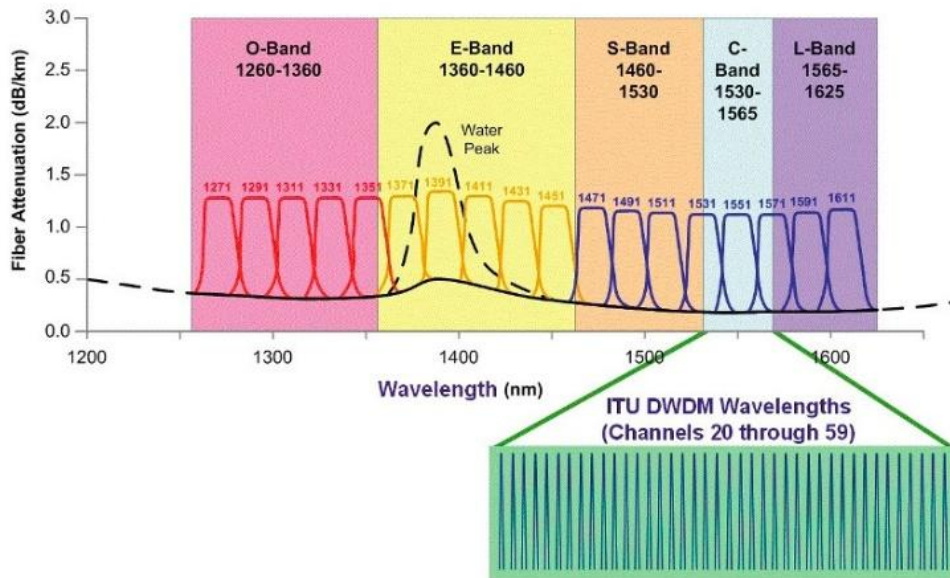
CWDM umožňuje využití až 18 kanálů s centrálními vlnovými délkami v rozmezí 1270 až 1610 nm, přičemž rozteč kanálů je 20 nm s možnou odchylkou 6-7 nm. CWDM systémy jsou primárně určeny k použití v metropolitních sítích (angl. Metropolitan Area Network, MAN). Hlavní výhodou CWDM systémů je možnost využití levnějších méně stabilních laserů, které vyzařují světlo s větší šířkou spektra. Nevýhodou je naopak výrazně nižší přenosová kapacita než u DWDM systémů [36]. Zároveň se v CWDM systémech projevují rozdílné vlastnosti přenosu jednotlivými kanály vlivem jejich velké rozteče. Uvažujeme-li standardně používané optické vlákno definované v ITU-T G.652 [39], pak platí, že měrný útlum se u kanálů ležících v pásmu O pohybuje kolem 0,35 dB/km, zatímco v pásmu C je měrný útlum jen přibližně 0,2 dB/km (viz obrázek 2.11). Velké rozdíly mezi jednotlivými pásmy jsou, i co se týče chromatické disperze [38].

### **2.3.2. Systémy využívající hustý vlnový multiplex (DWDM)**

Standard DWDM je detailně popsán v rámci ITU-T G.694.1 [40]. Hustý vlnový multiplex pracuje na rozdíl od hrubého s mnohem užšími kanály, jejichž rozteč je v porovnání s CWDM také výrazně menší. Zároveň DWDM kanály leží jen ve dvou pásmech, konkrétně v pásmech C a L. V ITU-T G.694.1 jsou definovány následující čtyři varianty fixní rozteče kanálů (rozteče jsou uváděny častěji ve frekvenční doméně než v doméně vlnových délek z důvodu velmi malých rozestupů):

- 12,5 GHz (odpovídá 0,1 nm),
- 25 GHz (odpovídá 0,2 nm),
- 50 GHz (odpovídá 0,4 nm),
- 100 GHz (odpovídá 0,8 nm) a celé násobky 100 GHz.

Referenční (středová) frekvence, od které jsou odvozovány další ostatní kanály, je 193,1 THz. Porovnání rastrů CWDM a DWDM je na obrázku 2.11.



**Obr. 2.11:** Porovnání rastrů CWDM a DWDM, převzato z [41]

Využití DWDM přináší oproti CWDM řadu výhod. Zatímco u CWDM jsou kanály rozloženy přes pásma O, E, S, C a L (viz obrázek 2.11), DWDM vysílá na vlnových délkách ležících jen v pásmech C (1530-1565 nm) a L (1565-1625 nm). V těchto dvou pásmech je měrný útlum vláken menší než v ostatních pásmech a zároveň je téměř konstantní, což znamená, že přenosové vlastnosti na jednotlivých kanálech se nebudou lišit tak, jak je tomu u CWDM systémů. Další značnou výhodou je navýšení přenosové kapacity díky velkému počtu přenosových kanálů, kterých mohou být v DWDM systémech řádově stovky. Například v [42] bylo dosaženo přenosové kapacity 36,480 Tb/s pomocí 320 kanálů s roztečí 25 GHz rozprostřených přes pásma C a L, přičemž na každém z těchto kanálů jsou data přenášena rychlostí 114 Gb/s. DWDM formát navíc umožňuje využití takzvaného flexibilního rastru, kde se může u jednotlivých kanálů lišit jejich šířka v závislosti na požadavcích sítě. Naopak nevýhodou DWDM oproti CWDM je nutnost použití dražších a komplexnějších komponent. Zejména pak laserů, které musí vlivem hustého osazení kanálů ve spektru vyzařovat světlo s velmi malou šířkou spektra a na přesně daných frekvencích (vlnových délkách) [40]. V simulacích, ve kterých jsou zkoumány WDM systémy, byly v rámci této práce použity vždy rozteče kanálů odpovídající formátu DWDM.

## 2.4. Lineární jevy v optických vláknech

Přenos optovláknovými systémy je výrazně závislý na typu použitých vláken na trase a souvisejících přenosových jevech. V jednokanálových i WDM systémech hojně využívaná jednovidová vlákna, která jsou definovaná v rámci v ITU-T G.694.2 [39], vykazují silnou závislost některých parametrů (např. měrný útlum, disperze) na frekvenci a nelineární chování. Jevy zhoršující kvalitu přenosu, které jsou způsobené těmito neideálními vlastnostmi vláken, je možné rozdělit na lineární a nelineární. Mezi lineární jevy se řadí [18, kapitola 2.1]:

- útlum,
- chromatická disperze (angl. Chromatic Dispersion, CD),
- polarizační vidová disperze (angl. Polarisation Mode Dispersion, PMD).

Z uvedených efektů byl v rámci simulací zkoumán zejména vliv chromatické a polarizační vidové disperze.

### 2.4.1. Útlum jednovidových vláken a jeho kompenzace

Celkový útlum vkládaný do trasy při přenosu optickými vlákny se skládá z několika dílčích složek. Těmito složkami jsou [18, kapitola 2.1]:

- ztráty způsobené materiálem vlákna (Rayleighův rozptyl, útlum absorpcí),
- ztráty způsobené ohyby vlákna (mikroohyby, makroohyby),
- ztráty závislé na polarizaci (angl. Polarization Dependent Loss, PDL).

Útlum vláken, způsobený ztrátami vzniklými vlivem materiálu vlákna, je potřeba kompenzovat pomocí optických zesilovačů. Optické zesilovače je možné dělit z pohledu jejich umístění na trase podle standardu ITU-T G.662 [44] na výkonové zesilovače (angl. boosters), in-line zesilovače a předzesilovače. Optické zesilovače je zároveň možné dělit i z hlediska technologie, kterou využívají, přičemž tři nejčastěji používané typy optických zesilovačů ve WDM systémech jsou polovodičové zesilovače (angl. Semiconductor Optical Amplifier, SOA), zesilovače s dotací erbia (angl. Erbium Doped Waveguide Amplifier, EDFA) a Ramanovy zesilovače (angl. Raman Amplifier, RA). Uvedené typy optických zesilovačů jsou detailně popsány v [43, kapitola 6].

Kompenzace PDL je vzhledem k náhodnému charakteru tohoto jevu výrazně komplikovanější. Vlivem PDL mohou být dva signály s odlišným polarizačním stavem při průchodu optickými komponentami utlumovány jiným způsobem. Vzhledem k tomu, že se SOP může v průběhu přenosu náhodně měnit, je vliv PDL na přenos jen těžko předvídatelný a je nutné ho kompenzovat až digitálně v rámci zpracování signálu přijímačem [18, kapitola 2.1]. Jeden z možných způsobů kompenzace PDL je popsán v [45], kde je v přijímačích používajících Stokesovy vektory za tímto účelem implementován adaptivní algoritmus, pomocí kterého je možné monitorovat a kompenzovat PDL i v případě rychlých

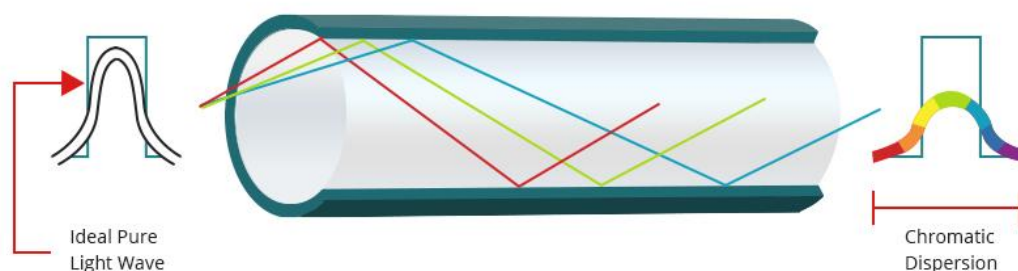
změn SOP. V rámci provedených simulací nebyly využity komponenty, ve kterých by mohlo k PDL docházet.

## 2.4.2. Chromatická disperze (CD) jednovidových vláken a její kompenzace

Chromatická disperze je dalším nepříznivým jevem, který je při přenosu přes jednovidová vlákna nutné řešit. Vzhledem k faktu, že koeficient chromatické disperze v jednovidových vláknech roste společně s vlnovou délkou [39], je potřeba tento jev řešit zejména u DWDM systémů, kde jsou využívány kanály ležící v pásmech C a L, tedy v pásmech obsahujících vysoké hodnoty vlnových délek (viz obrázek 2.11 v kapitole 2.3.2).

Používané zdroje záření nejsou monochromatické a vyzařované optické záření se tedy skládá z určitého množství vlnových délek. Vlivem CD jsou jednotlivé spektrální složky vysílaného optického záření přenášeny jinou rychlostí, což vede na rozšíření (v případě kladné disperze) nebo zúžení (v případě záporné disperze) vysílaného pulzu. Vliv CD je ilustrován na obrázku 2.12. Zkreslení pulzu pak může docházet k překrývání po sobě jdoucích symbolů a následně chybné detekci bitu přijímačem [18, kapitola 2.1]. Chromatická disperze se skládá z materiálové, vlnodné a profilové disperze. Tyto tři složky jsou detailně popsány v [43, kapitola 2.3]. K potlačení chromatické disperze jsou využívány zejména následující tři způsoby [18, kapitola 3.2.5]:

- disperzi kompenzující vlákna (angl. Dispersion Compensating Fibers, DCF),
- disperzi kompenzující mřížky, např. Braggovy mřížky (angl. Fiber Bragg Grating, FBG),
- elektronická kompenzace disperze (angl. Electronic Dispersion Compensation, EDC).



**Obr. 2.12:** Zkreslení pulzu vlivem CD, převzato z [37]

Zapojení DCF do přenosové trasy bylo zejména v prvním desetiletí 21. století díky jednoduchosti implementace nejpoužívanějším způsobem kompenzace CD. DCF mají velký a ve většině případů záporný koeficient chromatické disperze. Při použití jednovidových vláken dlouhých desítky nebo stovky kilometrů tedy stačí zapojit do trasy výrazně kratší DCF a koeficienty chromatické disperze těchto vláken se od sebe vzájemně odečtou. Například v [47] je představeno

vlákno s koeficientem chromatické disperze  $-124 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  schopné pracovat ve frekvenčních pásmech E, S, C, L, U s velmi malou odchylkou disperze  $\pm 0,1252 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ . Nevýhodou této metody je, že DCF vkládají do trasy značný útlum (desetiny dB/km) a zároveň je průměr jádra těchto vláken velmi malý, což může vést ke škodlivým nelineárním jevům [18, kapitola 3.2.5]. V [46] je analyzován vliv zapojení DCF do trasy za účelem potlačení CD. Pomocí všech tří zkoumaných variant zapojení DCF, tedy konkrétně „pre-compensation“ (zapojení DCF před jednovidové vlákno), „post-compensation“ (zapojení DCF za jednovidové vlákno) a „mix-compensation“ (kombinace pre-kompence a post-kompence), je možné úspěšně potlačit CD a vylepšit tak kvalitu přenosu (snížit bitovou chybovost). Varianta zapojení „mix-compensation“ navíc vedla k výraznému potlačení nelineárních efektů použitého DCF.

Braggovy mřížky jsou dalším často používaným optickým prvkem, který je určený ke kompenzaci CD. Kompenzační efekt FBG vychází z odrazů určitých spektrálních komponent. Každá spektrální komponenta se odrazí v jiné části mřížky, následkem čehož je, že komponenty při průchodem mřížkou urazí různé vzdálenosti. FBG oproti DCF vkládá do trasy mnohem menší útlum a zároveň je levnější [18, kapitola 3.2.5]. V [59] jsou v rámci simulací porovnávány výše zmíněné metody kompenzace CD ve WDM pasivních optických sítích. Zatímco pomocí DCF bylo dosaženo navýšení maximální přenosové vzdálenosti o 19,3 % oproti původním 57 km, pomocí FBG byla přenosová vzdálenost navýšena dokonce o 26,3 %. FBG se tak jeví jako vhodnější varianta kompenzace CD u vysokorychlostních WDM systémů. V provedených simulacích byly pro kompenzaci CD použity právě disperzi kompenzující mřížky.

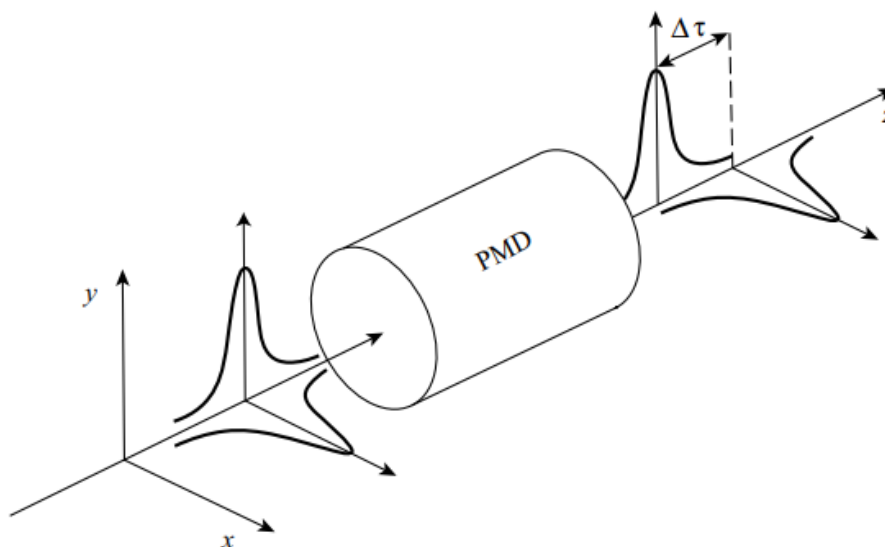
### **2.4.3. Polarizační vidová disperze (PMD) jednovidových vláken a její kompenzace**

Další jev způsobující zkreslení pulzů v jednovidových vláknech je po chromatické disperzi polarizační vidová disperze. Ta se bohužel může projevovat bez ohledu na to, jestli je chromatická disperze kompenzována nebo ne. PMD je způsobena dvojlomem vlákna vycházejícím z nedokonalostí při výrobě nebo z mechanického namáhání vlákna (např. mikroohyby) [1, kapitola 3.6].

Vid, šířící se jednovidovým vláknem, se skládá ze dvou vzájemně ortogonálních polarizačních stavů. Vlivem PMD se tyto dva polarizační stavy šíří rozdílnými rychlostmi a na výstupu vlákna je pak mezi nimi určitá časová prodleva, jejíž velikost závisí na vlnové délce přenášeného světelného paprsku. Toto zpoždění mezi polarizačními stavy pak, podobně jako je tomu u CD, vede na zkreslení přenášených pulzů, jejich vzájemný překryv, mezisymbolovou interferenci a následně zhoršení kvality přenosu (nárůst BER) [18, kapitola 2.1.3]. Vliv PMD je ilustrován na obrázku 2.13. Oproti ostatním disperzím (viz kapitola 1.4.2) je PMD výrazně menší. U přenosu dlouhými optickými spoji o vysokých rychlostech (nad 2,5 Gb/s) však PMD může výrazně zhoršit přenosové vlastnosti a tento problém je



tedy nutné řešit. PMD je časově proměnný jev a je tedy značně komplikované ho monitorovat a kompenzovat [33, kapitola 8.2.3]. Kompenzační metody PMD je možné rozdělit na metody optické a elektronické [43, kapitola 7.9.4].



**Obr. 2.13:** Ilustrace vlivu PMD, převzato z [1]

Elektronická kompenzace PMD probíhá za pomoci převodu přenášeného signálu z optické domény na elektrickou. Využívány jsou transversální (příčné) filtry, které elektrický signál rozdělí do několika větví, ve kterých dochází ke zpoždění signálu v závislosti na detekovaném PMD. Parametry těchto filtrů jsou dynamicky upravovány pomocí kontrolního algoritmu [43, kapitola 7.9.4]. V [48] jsou diskutovány varianty elektronické kompenzace PMD využívající algoritmy CMA (Constant Modulus Algorithm) a LMS (Least Mean Square), přičemž pro dosažení nejoptimálnějších výsledků je doporučováno provedení kompenzace jak před odesláním, tak po přijetí signálu. V [49] je představen dynamický systém pro příjem signálu využívajícího polarizační multiplex. Tento systém je schopen monitorovat změny SOP až 50x rychleji než CMA algoritmus a následně kompenzovat PMD.

Kompenzace PMD v optické doméně využívá podobně jako elektronická kompenzace zpožďovací větve. Signál je v optickém PMD kompenzátoru rozdělen do dvou větví, přičemž v každé z těchto větví se pracuje s jedním ze dvou polarizačních stavů přenášeného vidu. V jedné z větví je rychleji se šířící polarizační stav zpožděn a signály z obou větví jsou následně opět sloučeny [43, kapitola 7.9.4]. V [50] je pomocí simulací testována optická varianta kompenzace PMD ve vysokorychlostních systémech využívající pro oddělení polarizačních stavů optický filtr. Zkoumána

byla varianta s fixními a adaptivními parametry filtru, přičemž pomocí adaptivní kompenzace bylo dosaženo výrazně lepších výsledků.

Výše popsané metody kompenzace PMD jsou velmi komplexní a vlivem náhodného charakteru PMD ne vždy vedou k uspokojivým výsledkům. Ideálně by tedy v optických systémech měla být používána vlákna, u kterých k PMD nedochází, a s jejich pomocí předcházet nežádoucím důsledkům tohoto jevu. Při kompenzování CD pomocí DCF je proto vhodné použít vlákna zachovávající polarizační stav. Polarizaci zachovávající vlákno dopované GeO<sub>2</sub> určené ke kompenzaci CD je představeno v [51]. Navržené vlákno má velmi vysoký koeficient CD -856,15 ps/(nm·km) a zároveň vykazuje vlastnosti vhodné k potlačení PMD.

## **2.5. Nelineární jevy v optických vláknech**

V optických systémech běžně používaná vlákna vyrobená z materiálů na bázi oxidu křemičitého vykazují nelineární vlastnosti. Tyto nelinearity se typicky plně projevují jen v případě systémů s vysokým vysílacím výkonem a u systémů přenášející data na velmi dlouhé vzdálenosti. Zejména u dálkových WDM systémů pak mohou nelinearity vlákna vést k omezení přenosové kapacity. Nelineární jevy je možné rozdělit do dvou skupin. Jednou skupinou jsou jevy způsobené Kerrovým efektem, vycházející z nelineárního indexu lomu vlákna  $n_2$ , a druhou skupinou jsou takzvané rozptylové jevy, které jsou způsobeny interakcemi přenášeného světla s částicemi ve vlákně [18, kapitola 2.2].

### **2.5.1. Nelineární jevy vycházející z Kerrova efektu**

Nelineární jevy vycházející z Kerrova efektu je možné u WDM systémů dále dělit na interkanálové (mezikanálové) a intrakanálové (uvnitř jednoho kanálu), přičemž míra, do jaké jevy z těchto dvou skupin ovlivňují přenosové vlastnosti, je dána parametry systému. Závažnost nelinearit vycházejících z Kerrova efektu závisí například na výkonových úrovních, chromatické disperzi vláken nebo na bitové rychlosti. Obecně je však možné prohlásit, že z nelinearit spadajících do této kategorie má na přenos WDM systémy největší dopad vlastní fázová modulace (angl. Self Phase Modulation, SPM), křížová modulace (angl. Cross Phase Modulation, XPM) a čtyřvlnné směšování (angl. Four Wave Mixing, FWM) [18, kapitola 2.2]. Z těchto tří zmíněných nelinearit je v rámci simulací zkoumán jev FWM a jeho vliv na přenosové vlastnosti optického systému.

SPM je jev, při kterém vlivem změny intenzity signálu dochází ke změně indexu lomu ve vlákně. Přeneseně se tak mění i okamžitá frekvence záření a dochází tak k takzvanému frekvenčnímu čirpu. U vzestupné hrany dochází ke snížení frekvence optické nosné a u sestupné hrany naopak ke zvýšení frekvence. SPM sama o sobě nezpůsobuje zhoršení kvality přenosu, vzhledem k tomu, že vlivem zmíněných frekvenčních posuvů (čirpu) nedochází ke změně tvaru pulzu jako takového, ale k rozšíření

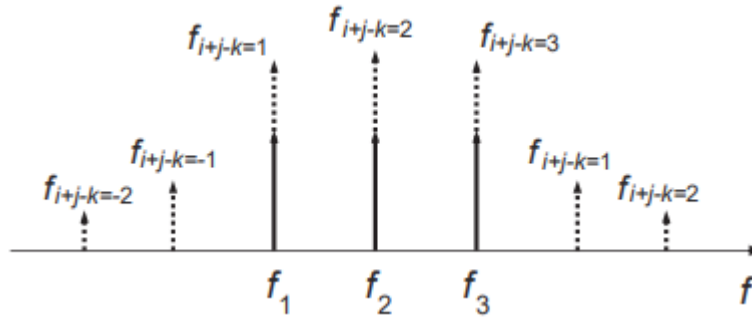
jeho spektra. V kombinaci s chromatickou disperzí ale může SPM přenosové vlastnosti zhoršit poměrně zásadním způsobem. Jev SPM je detailněji popsán v [1, kapitola 5.1]. V [60] je pomocí simulací zkoumán vliv SPM v kombinaci s CD na přenos ve WDM systému. Ze získaných výsledků vyplývá, že vliv SPM roste s výkonovou úrovní na výstupu předzesilovače. Zároveň je pro omezení vlivu SPM zásadní kompenzace CD (viz kapitola 2.4.2). SPM u WDM systémů neovlivňuje pulzy (konkrétně spektra pulzů) v sousedních kanálech a tento jev se tedy řadí mezi intrakanálové jevy.

Ve WDM systémech dochází vlivem Kerrova jevu kromě výše popsané změny okamžité frekvence záření také k ovlivňování průběhu fáze mezi sousedními kanály. Tento jev je označován jako XPM. Následkem zmíněných interakcí mezi přenosovými kanály dochází k překryvu pulzů a stejně jako u SPM pak i k rozšíření jejich spektra. V kombinaci s disperzí pak tento jev může u WDM systémů vést k výraznému zhoršení přenosových vlastností [1, kapitola 5.1]. Vliv XPM v kombinaci s CD na komunikaci WDM systémy je detailně zkoumán pomocí numerických simulací v [61]. Výsledky ukazují, že vlivem kombinace XPM a CD je výrazně ovlivňováno chování přenášených pulzů a zároveň také dochází ke značnému omezení maximální přenosové vzdálenosti. V [62] je představena optoelektronická metoda pro kompenzaci XPM založená na rotaci fáze. U simulovaného WDM systému bylo pomocí této metody u 28 Gbd QPSK kanálu na konci 3200 km dlouhé trasy dosaženo vylepšení Q faktoru o 2,7 dB. Vzhledem k tomu, že XPM způsobuje největší škody v kombinaci s CD, je právě kompenzace CD (viz kapitola 2.4.2) pro potlačení vlivu XPM zcela zásadní, stejně jako tomu je u SPM.

FWM je nelineární jev, který na rozdíl od výše zmíněných jevů vzniká za účasti dvou a více kanálů (vlnových délek), které jsou přenášeny optickým vláknem. Šíří-li se vláknem současně tři vlnění, pak tato vlnění mohou nelineárně interagovat a vytvářet nová vlnění. Frekvence, na kterých vznikají tyto produkty čtyřlenného směšování, jsou dány vztahem

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (2.1),$$

kde  $f_{ijk}$  [Hz] je frekvence vlnění vzniklého vlivem FWM a  $f_i$  [Hz],  $f_j$  [Hz] a  $f_k$  [Hz] jsou frekvence vlnění, která se vláknem šířila původně. Nová vlnění mohou vznikat na nových frekvencích, ale i na frekvencích totožných s původními třemi vlněními [1, kapitola 6.1]. Nově vznikající vlnění v případě tří přenášených kanálů jsou ilustrována na obrázku 2.14. Pro vznik FWM produktů musí být splněna takzvaná podmínka fázového souladu, kterou je obtížné splnit u vláken s nenulovou disperzí. FWM je proto velmi nebezpečným jevem ve WDM systémech, u kterých leží kanály blízko vlnové délce odpovídající nulové disperzi použitých vláken [43, kapitola 2.6.3].



**Obr. 2.14:** Ilustrace produktů vznikajících vlivem FWM, převzato z [18]

FWM může u WDM systémů způsobovat značné zhoršení přenosových vlastností vlivem přeslechů mezi kanály a přidavného šumu. Z toho důvodu je nutné čtyřvlňnému směšování předcházet nebo tento jev po jeho vzniku vhodně kompenzovat. V [65] je zkoumán vliv FWM na přenos WDM systému v závislosti na výkonových hladinách, počtu kanálů, rozteči kanálů nebo přenosové rychlosti. Podobně jako u ostatních nelineárních jevů je možné zmírnit dopad FWM snížením výkonu na vstupu vláken. Zároveň bylo experimentálně zjištěno, že vliv FWM je menší u systémů s menším počtem kanálů, větší roztečí kanálů a menšími přenosovými rychlostmi. Dále jsou v [65] diskutovány metody potlačení FWM. Za nejúčinnější způsob potlačení FWM je považováno výše uvedené využití vláken s nenulovou disperzí. Vliv chromatické disperze na FWM je sledován v [66]. Pomocí simulací tříkanálového WDM systému zde bylo ukázáno, že FWM se na přenosu projevuje nejvíce v případě nulové disperze vláken, přičemž dopad FWM klesá s rostoucí disperzí. Další cestou k potlačení FWM je použití nerovné rozteče mezi kanály (rozteč mezi každými dvěma kanály se liší). Tato metoda je zkoumána v [67]. Ačkoliv nerovná rozteč mezi kanály vedla u zkoumaného systému k částečnému potlačení FWM, tato metoda byla vyhodnocena jako méně efektivní, než autoři práce čekali. V [68] je představen šestikanálový WDM systém využívající polarizační prokládání, přičemž u sudých kanálů je polarizační stav otočen o  $90^\circ$  oproti nepolarizovaným lichým kanálům. Pomocí této metody využívající polarizační rotaci bylo dosaženo značného potlačení FWM produktů a bitová chybovost klesla řádově z  $10^{-10}$  na  $10^{-21}$ . Právě metoda potlačení FWM pomocí polarizační rotace je v této práci detailně zkoumána v rámci provedených simulací.

## 2.5.2. Nelineární rozptyl

Při nelineárním rozptylu dochází k nepružné změně (nedochází k návratu do původního stavu) energie fotonu na nižší úroveň, přičemž vzniklá změna energie nabývá formy fononu. Zároveň dochází ke vzniku rozptýleného záření na jiné frekvenci, než je frekvence nosné vlny. Do této skupiny nelineárních jevů patří stimulovaný Ramanův rozptyl (angl. Stimulated Raman Scattering, SRS) a stimulovaný Brillouinův rozptyl (angl. Stimulated Brillouin Scattering, SBS) [43, kapitola 2.6.1].

V případě SRS je generován optický fonon, což má za následek to, že k posunu frekvence (vzniku rozptýleného záření) dochází v obou směrech, tedy směrem k vyšším i nižším frekvencím, než je frekvence nosné vlny. Velikost tohoto frekvenčního posuvu, stejně jako šířka spektra vzniklého rozptýleného záření, se pohybuje řádově v jednotkách THz. SRS je zásadním problémem u WDM systémů, protože může způsobovat přeslechy mezi sousedními kanály. V takovém případě kanály s vyššími frekvencemi přenášejí část svého výkonu na kanály s nižšími frekvencemi [1, kapitola 11]. Zejména u DWDM systémů je nutné brát SRS v úvahu a přizpůsobit tomuto jevu parametry systému (bitrate, výkonové úrovně, rozteč kanálů, atd.). Vliv SRS na přenos DWDM systémy je detailně zkoumán v [63]. Experimentálně bylo zjištěno, že vliv SRS narůstá s počtem kanálů WDM systému a také s výkonovou úrovní přenášeného signálu. Zároveň z provedených simulací vyplývá, že se SRS projevuje méně u DWDM systémů s menší roztečí kanálů.

SBS vzniká podobným způsobem jako SRS. Na rozdíl od Ramanova rozptylu je u Brillouinova rozptylu generován akustický fonon, z čehož plyne několik dalších odlišností. K posunu frekvence v případě SBS dochází jen ve zpětném směru (vznik rozptýleného záření na nižší frekvenci než frekvence nosné vlny), přičemž tento posun je o tři řády menší než v případě SRS (cca 10 GHz). Zároveň má vznikající rozptýlené záření větší intenzitu a výrazně užší spektrum (desítky MHz), než je tomu u SRS. Z toho důvodu je SBS nebezpečný zejména v systémech, které využívají lasery vyzařující světlo s malou šířkou spektra. U těchto systémů může SBS způsobovat značný útlum a tím zhoršení SNR [1, kapitola 12]. V [64] je zkoumán vliv SBS na přenosové vlastnosti v DWDM systémech. Pomocí simulací bylo zjištěno, že výkonový práh pro vznik SBS se pohybuje nejnižší ze všech nelineárních jevů (řádově v jednotkách mW), a proto tento jev musí být považován za jeden z nejdominantnějších nelinearit v DWDM systémech. V rámci simulací docházelo vlivem SBS k frekvenčnímu posuvu o 11 až 13 GHz, což u DWDM systémů s roztečí kanálů 12,5 GHz způsobovalo značné přeslechy. Pro účinnou limitaci vlivu SBS je nutné nastavit WDM systém tak, aby výkonová úroveň na vstupu vláken nepřekračovala zmíněný výkonový práh pro vznik SBS.

### 3. Metoda

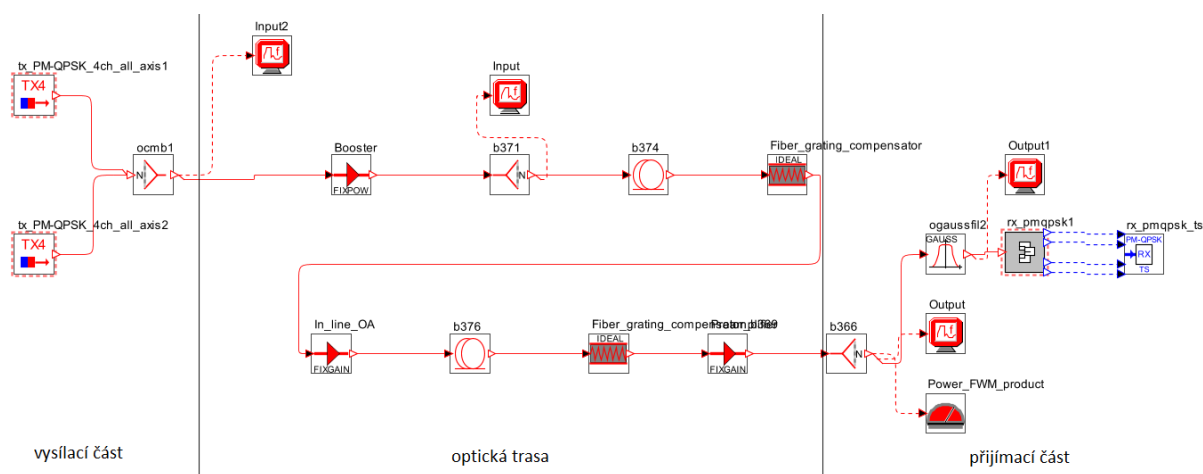
V následujících kapitolách (kapitoly 3.1 až 3.3) budou stručně popsány metody a nástroje použité k provedení simulací zkoumaných systémů a k následnému vyhodnocení výsledků. Popsáno bude simulační prostředí nástroje OptSim, metoda TDSS (Time Domain Split-step), bitová chybovost (angl. Bit Error Rate, BER) a oko rozhodnutí.

#### 3.1. OptSim

V rámci této diplomové práce byl pro zkoumání vlivu polarizace na přenos optickými komunikačními systémy využit simulační nástroj OptSim. Pomocí tohoto softwaru je možné zkoumaný systém pozorovat jakožto sadu vzájemně propojených bloků, z nichž každý představuje komponentu nebo subsystém komunikačního systému. OptSim obsahuje rozsáhlou knihovnu elektronických a optických komponent, pomocí kterých je možné sestavit a zkoumat systémy využívající nejnovější technologie z oblasti datové komunikace a telekomunikace. OptSim umožňuje simulace provádět v režimech „block mode“ a „sample mode“ [69].

##### 3.1.1. Rozvržení simulačního prostředí v OptSim

Pro efektivní simulování a zkoumání vlivu polarizace na optický přenos bylo nutné v simulačním prostředí OptSim vytvořit řadu schémat. Jako příklad je na obrázku 3.1 uvedeno schéma zapojení 8-kanálového WDM systému využívajícího modulaci PM-DQPSK. Všechna vytvořená schémata jsou si svou strukturou podobná a je možné je rozdělit na část vysílací, přijímací a na optickou trasu (viz sekce oddělené svíslými čarami na obrázku 3.1). Jednotlivá vytvořená schémata se pak od sebe liší počtem a typem použitých vysílačů ve vysílací části, typem přijímače v přijímací části nebo parametry komponent (vlákna, zesilovače, mřížky) na optické trase.



Obr. 3.1: Příklad schématu zapojení

Vysílací část vytvořených schémat se skládá z několika vysílačů, jejichž počet závisí na počtu kanálů zkoumaného WDM systému. Na ukázkovém schématu na obrázku 3.1 se vysílací část skládá ze dvou vysílacích bloků, přičemž každý z těchto dvou bloků obsahuje 4 vysílače. Samotné vysílače se pak svou strukturou liší v závislosti na použitém modulačním formátu. Vysílače pro modulační formáty používané v simulacích jsou popsány v kapitolách 2.2.1 až 2.2.3. Dalším blokem ve vysílací části schémat je multiplexor, který slučuje vysílané kanály do jednoho optického signálu. Kromě typu a počtu vysílačů ve vysílací části se zkoumané systémy mohou lišit parametry některých komponent z této části schématu. Vlastnosti systému jsou nejvíce ovlivňovány parametry laserů ve vysílačích, u kterých je možné nastavit výkonovou úroveň na výstupu laseru, šířku spektra vyzařovaného paprsku nebo vlnovou délku, na které bude laser vysílat, a tím i rozteč kanálů WDM systému.

Na vysílací část schématu navazuje optická trasa, která se skládá z optických vláken, zesilovačů, mřížek pro kompenzaci chromatické disperze a případně také komponent vkládajících do trasy PMD. Lineární a nelineární jevy (viz kapitoly 2.4 a 2.5), jejichž interakce s polarizací je zkoumána v rámci této diplomové práce, jsou z velké části závislé na vlastnostech použitých optických vláken. Přenosové vlastnosti simulovaných WDM systémů proto z velké části vycházejí z konkrétního nastavení bloků představujících optická vlákna (bloky *b374* a *b376* na obrázku 3.1). OptSim umožňuje u optických vláken nastavit parametry jako koeficient chromatické disperze, měrný útlum nebo délku. Záporná disperze mřížek a zisk vkládaný do trasy zesilovači se mění v souladu se změnou parametrů vláken tak, aby byla v simulovaných systémech chromatická disperze a útlum vláken vždy plně kompenzovány.

Poslední částí schémat simulovaných WDM systémů je přijímací část. Ta je tvořena demultiplexorem, filtrem pro oddělení pozorovaného kanálu, přijímačem a bloky pro měření bitové chybovosti a výkonové úrovně (více v kapitole 3.2). Typ přijímače závisí stejně jako u vysílačů na modulaci, kterou daný systém využívá. Schémata přijímačů použitých v simulacích jsou spolu s detailním popisem jejich funkce uvedena v kapitolách 2.2.1 až 2.2.3.

### 3.1.2. Metoda Time Domain Split-step

OptSim, podobně jako ostatní komerční nástroje určené pro simulaci optických systémů, využívá takzvanou metodu Split Step. Ta slouží k integrování vlnové rovnice popisující šíření vlnění optickým vláknem. Tato rovnice má tvar

$$\frac{\delta A(t,z)}{\delta z} = \{L + N\}A(t,z) \quad (3.1),$$

kde  $A(t,z)$  je optické pole,  $L$  je lineární operátor zodpovědný za disperzi a ostatní lineární jevy a  $N$  je nelineární operátor, který odpovídá nelineárním jevům (rozptyly, jevy vycházející z Kerrova efektu). Integrační metoda Split-step aplikuje  $L$  a  $N$  do  $A(t,z)$  samostatně po malých úsecích vlákna délky  $\Delta z$  [69].

Zatímco nelineární operátor  $N$  je vždy počítán v časové doméně, operátor  $L$  je možné počítat jak v časové, tak ve frekvenční doméně. Podle způsobu výpočtu  $L$  se metoda Split-step dělí na dvě varianty, kterými jsou Time Domain Split-step (TDSS) a Frequency Domain Split-step (FDSS). TDSS počítá  $L$  v časové doméně pomocí konvoluce následujícím způsobem:

$$A_L[n] = A[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A[k]h[n-k] \quad (3.2),$$

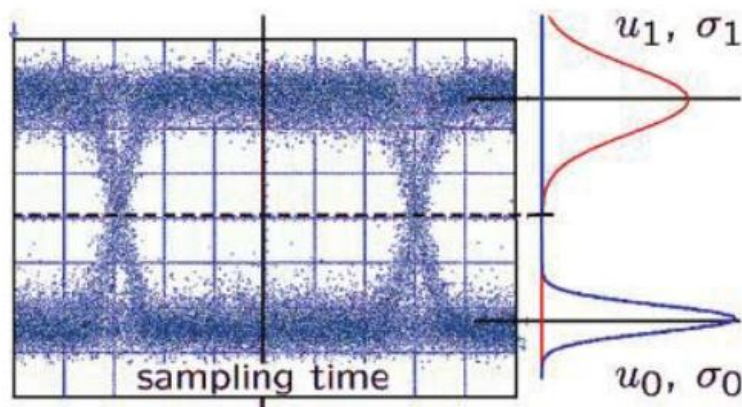
kde  $A[n]$  je signál v diskretním čase a  $h[n]$  je impulzová odezva v diskretním čase [69].

Implementace FDSS je oproti TDSS výrazně jednodušší, a z tohoto důvodu byla tato metoda hojně využívána v první generaci optických simulátorů. Produktem FDSS je však na rozdíl od TDSS kruhová konvoluce, která vytváří aliasing, což je problém, kterému se při použití této metody nelze vyhnout. Z toho důvodu s sebou nese použití TDSS řadu výhod, jako je například zmíněná absence aliasingu, možnost širokopásmových simulací nebo téměř dvojnásobná výpočetní rychlost operátoru  $L$  oproti FDSS. Simulační nástroj OptSim využívá metodu TDSS [69].

## 3.2. Nástroje pro vyhodnocení výsledků

Po vytvoření schémat zapojení, nastavení parametrů optických komponent a provedení simulací je nutné kvantifikovat a vyhodnotit přenosové vlastnosti zkoumaných optických přenosových systémů. Za tímto účelem jsou v případě binárních digitálních systémů nejčastěji používanými parametry Q faktor a bitová chybovost (angl. Bit Error Rate, BER) [69]. Dalším nástrojem pro vyhodnocení kvality přenosu je oko rozhodnutí, což je grafické vyjádření superpozice všech přijatých bitů. Podle tvaru oka rozhodnutí je možné určit příčinu zkreslení přenášeného signálu, přičemž více „otevřené“ oko odpovídá vyšší kvalitě přenosu. Příklad oka rozhodnutí je uveden na obrázku 3.2.





**Obr. 3.2:** Oko rozhodnutí, převzato z [70]

Q faktor, neboli faktor kvality, odpovídá poměru signálu ku šumu (angl. Signal to Noise Ratio, SNR) v rozhodovacím obvodu přijímače, přičemž větší hodnota Q faktoru odpovídá větší kvalitě přenosu. V rámci doporučení ITU-T G.976 [71] je Q faktor definován vztahem

$$Q = \frac{u_1 - u_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.3),$$

kde  $u_1$ [V] a  $u_0$ [V] jsou napěťové úrovně v přijímači odpovídající logické 1 a 0 a  $\sigma_1$ [V] a  $\sigma_0$ [V] jsou standardní odchylky. Na obrázku 3.2 je uvedeno, jak lze hodnoty  $u_{1,0}$  a  $\sigma_{1,0}$  ze vztahu (3.3) získat z oka rozhodnutí.

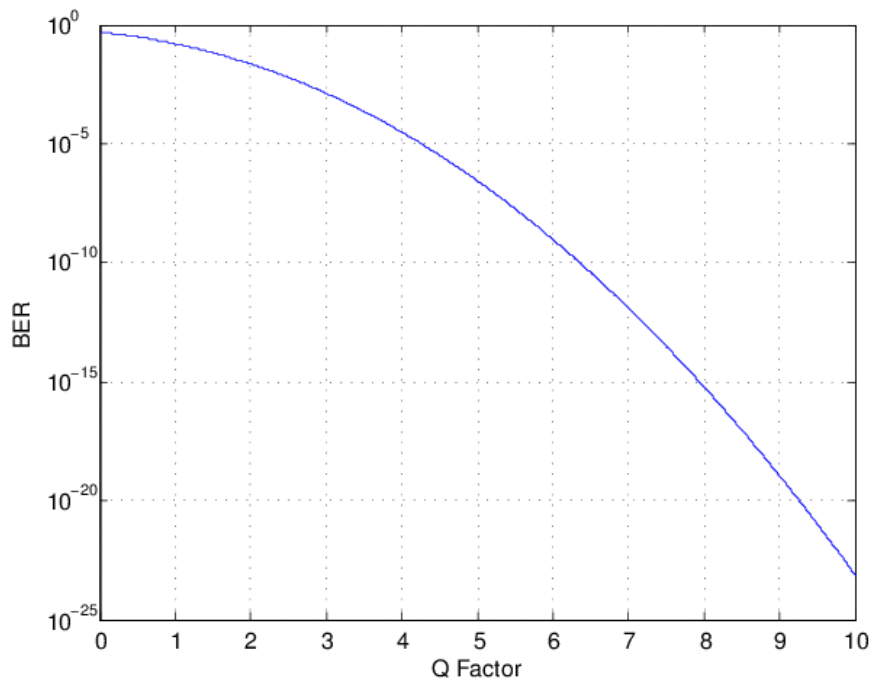
V této práci byly výsledky simulací vyhodnocovány zejména pomocí BER. Hodnota BER je dána následujícím vztahem:

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{total}} \quad (3.4),$$

kde  $N_{total}$  [-] je celkový počet všech přenesených bitů za určitý časový interval a  $N_{error}$  [-] je počet bitů, které v tomto intervalu bylo přeneseno chybně [69]. BER tedy udává, kolik procent ze všech přenášených bitů bylo přeneseno chybně. Cílem optimalizace simulovaných systémů je dosáhnout co nejmenší hodnoty BER na výstupu. Vztah mezi BER a Q faktorem je dán vztahem

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.5).$$

Závislost BER na Q faktoru je vynesena na obrázku 3.3.



**Obr. 3.3:** BER vs. Q faktor, převzato z [72]

## 4. Simulace vlivu polarizace na optický přenos

V rámci demonstrace vlivu polarizace na vlastnosti optického přenosu byla v simulačním prostředí OptSim provedena řada simulací. Sledována byla zejména interakce polarizace s FWM a CD ve WDM systémech. Všechny níže popsané simulace byly provedeny vícekrát se stejnými parametry pro ověření opakovatelnosti výsledků. Výsledky simulací jsou porovnávány pro tři modulační formáty, konkrétně OOK, DQPSK a PM-DQPSK, a různé hodnoty disperze vláken na trase.

Veškeré konkrétní naměřené hodnoty bitové chybovosti nebo výkonových úrovní uvedené v následujících kapitolách jsou platné jen pro konkrétní sledované zapojení a nastavení jednotlivých prvků. Konkrétní naměřená čísla tedy není možné považovat za obecně platné výsledky a v kontextu této práce jsou proto diskutovány spíše změny a rozdíly mezi získanými hodnotami způsobené aplikováním polarizace. Tyto změny v naměřených hodnotách vhodně vypovídají o vlivu polarizace na pozorovaný systém.

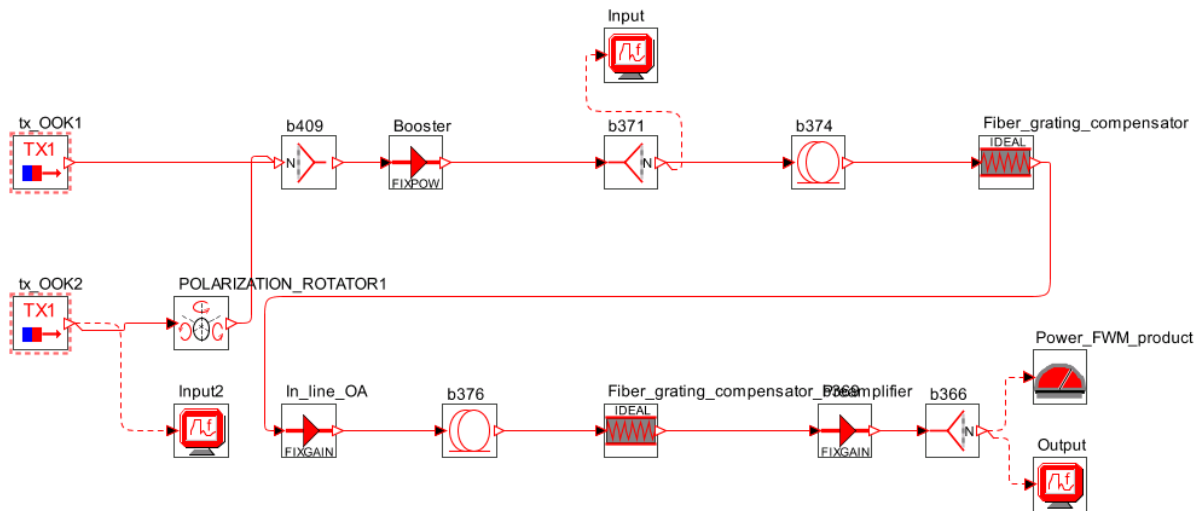
### 4.1. Vliv polarizace v kombinaci s disperzí na FWM u dvoukanálových WDM systémů

Před zkoumáním rozsáhlejších WDM systémů (systémů s více kanály) byl vliv polarizace na FWM testován pro dva kanály. Schéma zapojení simulovaných systémů je pro všechny tři výše uvedené modulace totožné (kromě samotných vysílačů a modulátorů). Jako příklad je na obrázku 4.1 uvedeno zapojení systému využívající OOK modulaci.

Signál je v simulacích generován vždy pomocí dvou CW laserů, které vysílají na frekvencích 192,975 THz a 193,025 THz s výkonovou úrovní 0 dBm. Schémata samotných vysílačů, včetně použitých modulátorů, jsou uvedena a detailně popsána v kapitolách 2.2.1 až 2.2.3. Signály jsou po vygenerování sloučeny, zesíleny na 6 dBm a navázány do trasy, která je tvořena dvěma optickými vlákny, mřížkami pro kompenzaci disperze a zesilovači pro kompenzaci útlumu vláken. Obě vlákna na trase mají délku 100 km a měrný útlum 0,2 dB/km.

Signál z 2. vysílače (na frekvenci 193,025 THz) je před sloučením se signálem z 1. vysílače pomocí polarizačního rotátoru otočen na ose  $s_2$  o 0, 45, 90, 135 nebo 180 stupňů. Zároveň je měněna disperze vláken na trase. Konkrétně jsou simulace provedeny pro disperzi 0, 1, 2, 3 a 4 ps/(nm·km). Simulace byly provedeny pro všechny možné kombinace disperze a rotující polarizace. Celkem je tedy simulováno vždy 25 variant nastavení parametrů.

Disperze a útlum vláken na trase jsou vždy plně kompenzovány pomocí mřížek a zesilovačů umístěných hned za optická vlákna, přičemž mřížky jsou nastaveny tak, aby jejich koeficient chromatické disperze byl opačný (záporný) oproti koeficientu chromatické disperze vláken. Zesilovače jsou nastaveny tak, aby přenášené záření zesílily o 20 dB, tedy o stejný počet dB, o který je signál po průchodu vláknou utlumen.

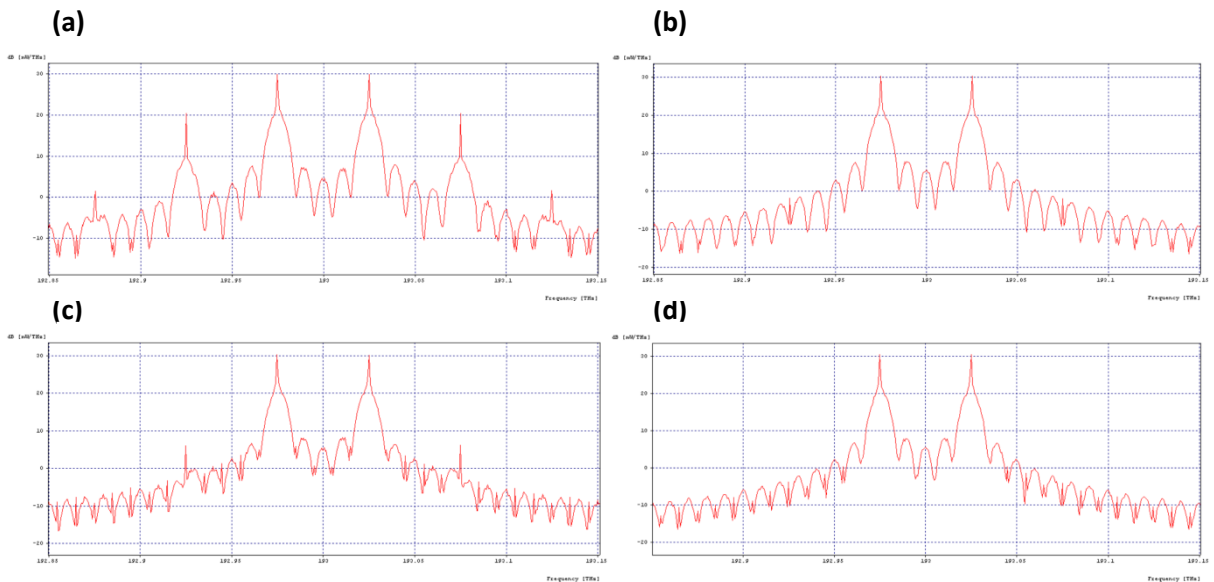


**Obr. 4.1:** Blokové schéma simulace se dvěma kanály s využitím OOK modulace

#### 4.1.1. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u dvoukanalového systému s OOK modulací

V následující kapitole jsou popsány a diskutovány výsledky simulací výše uvedeného systému pro OOK modulaci. Schéma použitého vysílače je uvedené na obrázku 1.2 v kapitole 2.2.1. Datový zdroj použitý k řízení MZM je nastaven na rychlost 10 Gb/s.

Na obrázku 4.2 jsou optická spektra naměřená na konci trasy pro varianty s disperzí vlákna 0 a 2 ps/(nm·km) a pro rotaci SOP 0° a 180°. Zejména ve spektru u varianty bez disperze a bez rotace (viz obrázek 3a) jsou patrná maxima na nových frekvencích vznikající vlivem FWM. Tyto nové frekvence mají mezi sebou stejnou rozteč jako původní kanály (50 GHz). Ve spektrech u ostatních tří sledovaných variant, tedy variant, kdy je jeden z kanálů polarizován, nebo jsou na trase použita vlákna s nenulovou disperzí, jsou tyto produkty FWM výrazně potlačeny. Nenulová disperze vláken na trase a rotující polarizace kanálů se tedy jeví jako použitelné řešení pro potlačení čtyřvlňného směšování.

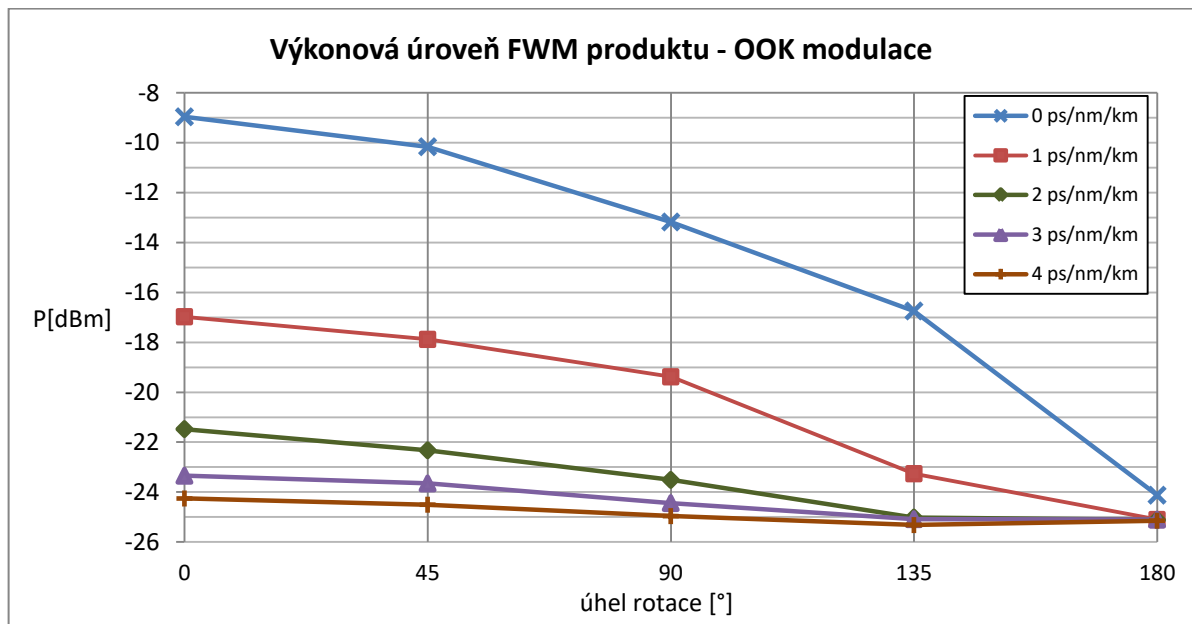


**Obr. 4.2:** Spektra na výstupu trasy (2-kanálový systém s OOK modulací) ve variantách:

(a) disperze 0 ps/(nm·km) bez rotace, (b) disperze 0 ps/(nm·km) s rotací,

(c) disperze 2 ps/(nm·km) bez rotace, (d) disperze 2 ps/(nm·km) s rotací

Pro vyhodnocení a porovnání vlivu všech 25 simulovaných kombinací disperze a polarizace (viz kapitola 4.1) byla na konci trasy měřena výkonová úroveň jednoho z produktů FWM. Konkrétně se jedná o produkt vznikající na frekvenci 193,075 THz. Naměřené výkonové úrovně jsou vyneseny do grafu na obrázku 4.3.



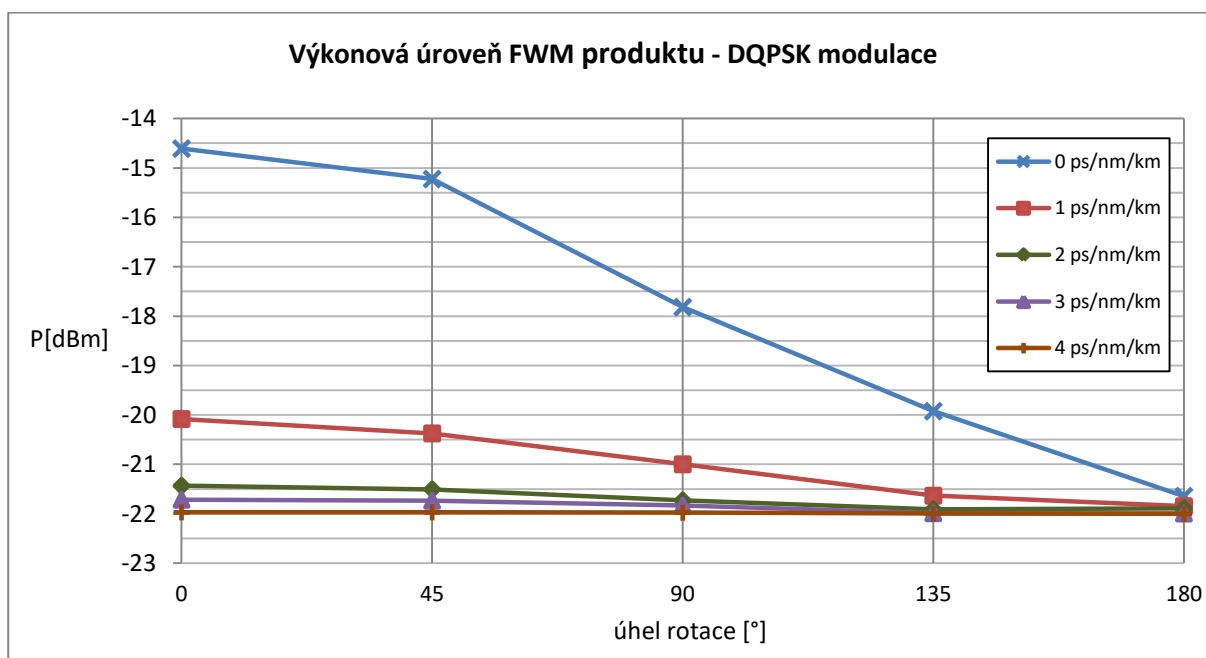
**Obr. 4.3:** Výkonová úroveň produktu FWM pro OOK modulaci (simulace 2-kanálového systému)

Při pohledu na graf je zřejmé, že zásadní vliv na čtyřlenné směšování má zejména disperze vláken. Pro disperzi 1 ps/(nm·km) a především pro nulovou disperzi dosahují produkty FWM mnohem větších výkonových úrovní, než je tomu pro disperze vláken od 2 ps/(nm·km) výše. Nicméně pomocí rotující polarizace je podle všeho možné čtyřlenné směšování výrazně potlačit. Z grafu je patrné, že při použití rotace o 180° dosahuje sledovaný FWM zanedbatelně malých výkonových úrovní, a to i v případě, kdy jsou na trase použita vlákna s nulovou disperzí. Pro disperzi 1 ps/(nm·km) se jeví jako dostatečné řešení použití rotace o 135°. Pro větší hodnoty disperze je sice s využitím polarizace možné dosáhnout o něco většího potlačení sledovaného produktu FWM, ale v těchto případech je měřená výkonová úroveň velmi malá i bez použití polarizace.

#### 4.1.2. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u dvoukanálového systému s DQPSK modulací

Další zkoumanou variantou dvoukanálového WDM systému byl systém využívající DQPSK modulační formát. Schémata použitého vysílače a modulátoru jsou podobně jako v případě OOK modulace uvedena v teoretické části této práce, a to konkrétně v kapitole 2.2.2. Datové zdroje použité k řízení MZ modulátorů jsou nastaveny na rychlost 10 Gb/s.

Vliv všech 25 simulovaných kombinací disperze a polarizace (viz kapitola 4.1) je opět možné vyhodnotit z naměřených výkonových úrovní dominantního vrcholu jednoho z produktů čtyřlenného směšování. Naměřené výkonové úrovně jsou vyneseny do grafu na obrázku 4.4.



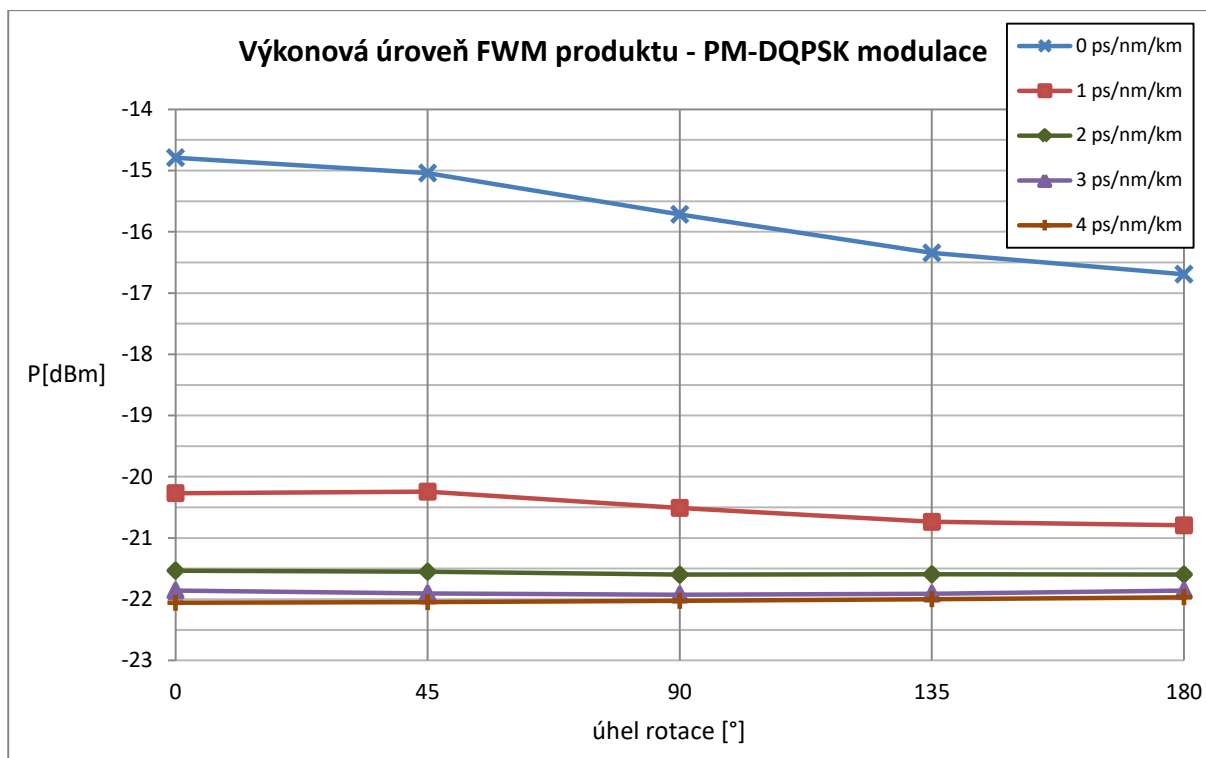
**Obr. 4.4:** Výkonová úroveň produktu FWM pro DQPSK modulaci  
(simulace 2-kanálového systému)

Z grafu lze podobně jako u OOK modulace pozorovat, že zásadní vliv na čtyřvlonné směšování má zejména disperze vláken. V porovnání s OOK modulací je zde ale měřená výkonová úroveň produktu FWM pro variantu s nulovou disperzí a rotací přibližně o 5 dB nižší. Stejně tak se zdá být na rozdíl od modulace OOK použití vláken s disperzí 1 ps/(nm·km) dostatečným řešením pro potlačení FWM, i bez použití polarizace. Co se týče systému s vlákny s nulovou disperzí, lze v tomto případě dosáhnout výrazného utlumení FWM použitím polarizační rotace o dostatečný úhel, stejně jako tomu bylo u varianty s modulací OOK. V tomto případě se jeví jako dostatečné použití rotace o 135°. Další podobnost s OOK variantou je značný útlum produktů FWM v případě použití vláken s větší disperzí, přičemž použití polarizace tento útlum opět nijak výrazně nezlepšuje. U modulace DQPSK toto platí i pro disperzi vláken 1 ps/(nm·km), zatímco pro modulaci OOK byla potřeba disperze větší.

#### **4.1.3. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u dvoukanalového systému s PM-DQPSK modulací**

V této kapitole jsou popsány a diskutovány výsledky simulací systému popsaného v kapitole 4.1 pro PM-DQPSK modulaci. Na rozdíl od kapitol 4.1.1 a 4.1.2 se tedy jedná o variantu dvoukanalového systému využívající modulační formát s polarizačním multiplexem. Schémata použitého vysílače a bloku, ve kterém je prováděn polarizační multiplex, jsou uvedena v kapitole 2.2.3. Datové zdroje použité k řízení MZ modulátorů jsou stejně jako v předchozích případech nastaveny na rychlost 10 Gb/s.

Na obrázku 4.5 je uveden graf naměřených výkonových úrovní dominantního vrcholu jednoho z produktů čtyřvlonného směšování. Z tohoto grafu je možné vyhodnotit vliv jednotlivých kombinací disperze a rotující polarizace obdobně jako v kapitolách 4.1.1 a 4.1.2.



**Obr. 4.5:** Výkonová úroveň produktu FWM pro PM-DQPSK modulaci  
(simulace 2-kanálového systému)

Z grafu je patrné, že v tomto případě má zvolená polarizace na potlačení čtyřvlňného směšování jen velmi malý, dalo by se říct až neznamatelný vliv. Po porovnání naměřených hodnot s hodnotami pro DQPSK modulaci (viz obr. 4.4 v kapitole 4.1.2) lze konstatovat, že PM-DQPSK modulace je u dvoukanálového systému proti FWM v případě nulové disperze a rotace přibližně stejně odolná jako DQPSK. U OOK a DQPSK modulací však na rozdíl od PM-DQPSK bylo možné dosáhnout pomocí polarizace značného útlumu produktu FWM, a to i v případě, kdy jsou na trase použita optická vlákna s nulovou disperzí. Navyšováním úhlu rotace nebylo u systému s PM-DQPSK dosaženo žádného většího útlumu FWM a v tomto případě je tedy pro potlačení čtyřvlňného směšování nutné použít vlákna s nenulovou disperzí. Je-li disperze vláken na trase nenulová (alespoň 1 ps/(nm·km)), jsou produkty FWM dostatečně utlumeny, stejně jako tomu bylo u modulace DQPSK.

## 4.2. Vliv polarizace v kombinaci s disperzí na FWM u čtyřkanálových WDM systémů

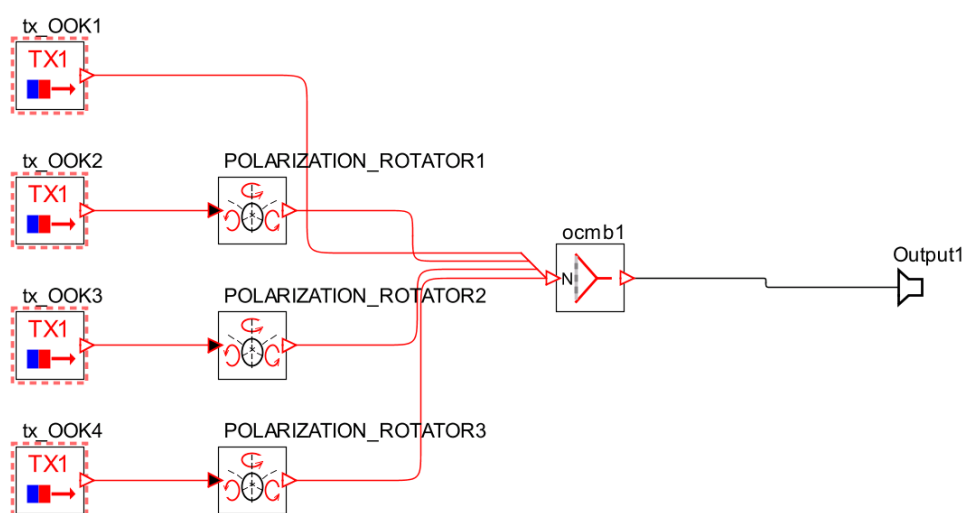
Výsledky získané simulováním dvoukanálových systémů ukazují na potenciální cestu k optimalizaci optického přenosu pomocí polarizace a lze z nich vycházet u simulací čtyřkanálových systémů. Obdobně jako v kapitolách 4.1.1 až 4.1.3 jsou schémata zapojení simulovaných systémů pro



všechny tři zkoumané modulační formáty (OOK, DQPSK a PM-DQPSK) totožná. Tato schémata jsou velmi podobná zapojení na obrázku 4.1 v kapitole 4.1 a liší se jen použitím vysílacího bloku, který obsahuje vždy čtyři vysílače. Jako příklad je na obrázku 4.6 uveden tento vysílací blok pro OOK modulaci.

Parametry vláken použitých na trase a vysílačů jsou totožné s parametry v simulacích dvoukanálových systémů (viz kapitola 4.1). Jediným rozdílem je využití čtyř laserů oproti dvěma, přičemž rozteč frekvencí, na kterých tyto lasery vysílají, je stále 50 GHz.

Ve snaze potlačit čtyřvlonné směšování je v následujících simulacích aplikována rotující polarizace na tři vysílané vlnové délky z celkových čtyř (viz obrázek 4.6), tak aby byl polarizační stav každého kanálu o určitý úhel posunut od ostatních. Simulace byly provedeny pro disperze vláken 0, 1, 2, 3 a 4 ps/(nm·km), stejně jako u dvoukanálových systémů. Zároveň byly testovány různé varianty rotující polarizace. Tyto varianty jsou blíže popsány v kapitole 4.2.1. Disperze a útlum vláken na trase jsou vždy plně kompenzovány pomocí mřížek a zesilovačů.

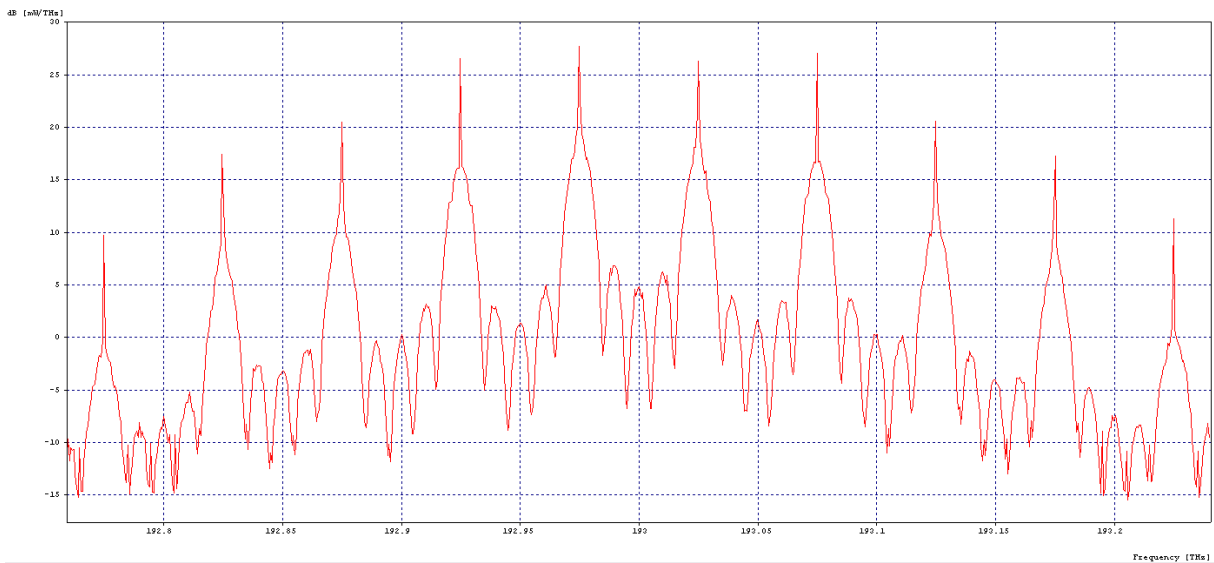


**Obr. 4.6:** Blokové schéma čtyřkanálového vysílače s OOK modulací

#### 4.2.1. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u čtyřkanálového systému s OOK modulací

V této kapitole jsou uvedeny a diskutovány výsledky simulací výše popsaného systému pro modulaci OOK. Schéma použitého vysílače a modulátoru je uvedené na v kapitole 2.2.1.

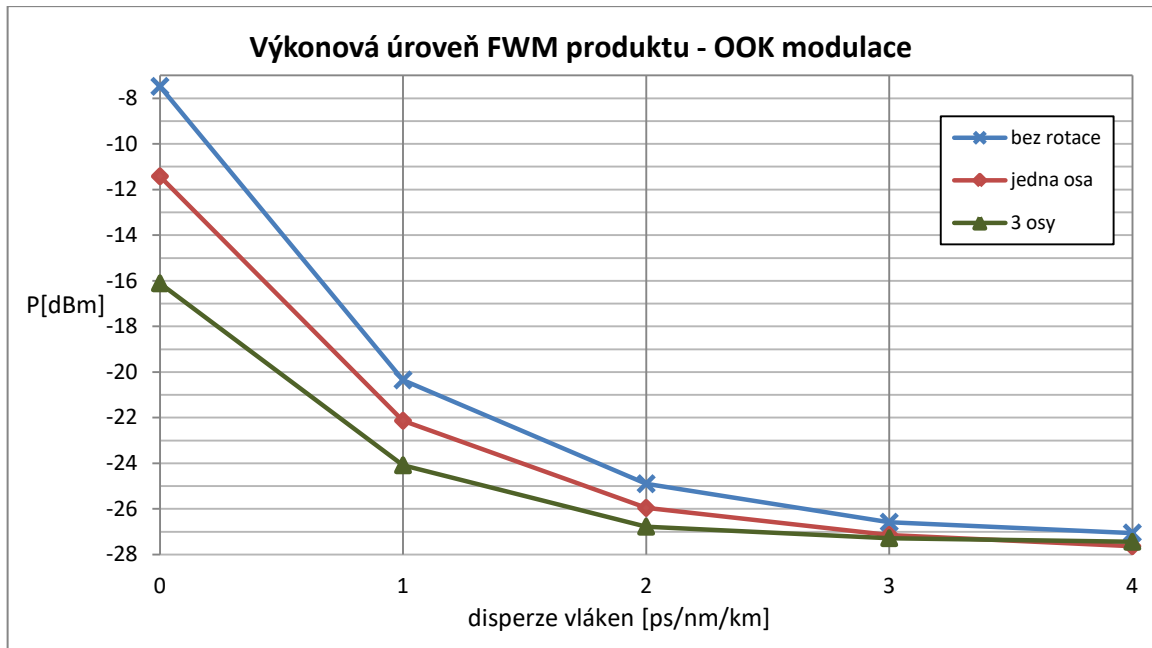
Na obrázku 4.7 je pro demonstraci FWM u čtyřkanálových systémů uvedeno optické spektrum naměřené na konci trasy pro variantu s disperzí vlákna 0 ps/(nm·km) a bez použití rotující polarizace. Jedná se tedy o variantu, u které nejsou produkty FWM nijak potlačovány. Porovnáním se spektry dvoukanálových systémů (viz obrázek 4.2 v kapitole 4.1.1) je patrné, že s rostoucím počtem kanálů roste i počet vznikajících FWM produktů a zvyšuje se tak dopad FWM na kvalitu přenosu.



**Obr. 4.7:** Spektrum na výstupu trasy (4-kanálový systém s OOK modulací)  
pro variantu 0 ps/(nm·km) bez rotace

Celkově byly simulovány tři různé varianty rotující polarizace (v kombinaci s různými disperzemi vláken na trase se tedy jedná o 15 simulačních běhů). První varianta je nastavená tak, aby k polarizaci nedocházelo a bylo pak možné pozorovat potenciální zlepšení u zbylých dvou variant. Druhá varianta využívá rotaci kolem jedné osy, a to konkrétně kolem osy  $s_2$ . První kanál polarizován není (viz obrázek 4.6) a zbylé 3 kanály jsou otočeny o 90, 135 a 180 stupňů. Třetí varianta pak využívá rotaci kolem všech tří os, přičemž každý kanál (opět kromě prvního) je otočen kolem jedné ze tří os o 180°.

Pro vyhodnocení a porovnání vlivu všech simulovaných kombinací disperze a polarizace byla na konci trasy měřena výkonová úroveň dominantního vrcholu FWM produktu, který je k vysílaným kanálům nejbližší. Konkrétně se jedná o produkt vznikající na frekvenci 193,125 THz. Naměřené výkonové úrovně jsou vyneseny do grafu na obrázku 4.8.



**Obr. 4.8:** Výkonová úroveň produktu FWM pro OOK modulaci  
(simulace 4-kanálového systému)

Vzhledem k průběhu uvedeného grafu lze konstatovat, že pro dosažení výrazného utlumení produktů FWM je nutné použít na trase vlákna s disperzí alespoň 2 ps/(nm·km). Nicméně i v případě nulové disperze vláken je možné dosáhnout poměrně zdatelného potlačení FWM. Použitím rotující polarizace kolem všech tří os bylo dosaženo útlumu o přibližně 9 dB oproti variantě bez polarizace.

Ačkoli výše uvedený graf poměrně slušně vypovídá o potlačení čtyřvlákného směšování ve zkoumaných případech, pro vyhodnocení kvality přenosu bude směřodatnější hodnota BER naměřená na konci trasy. Hodnoty BER pro první kanál (kanál na frekvenci 192,925 THz) jsou uvedeny v tabulce 4.1, přičemž zkoumány byly disperze vláken 0 a 1 ps/(nm·km). Z grafu na obrázku 4.8 je patrné, že pro disperzi vláken 2 ps/(nm·km) a větší je dosahováno už poměrně výrazného útlumu a tudíž lze na výstupu trasy očekávat velmi nízkou chybovost. Z hodnot v tabulce jednoznačně vyplývá, že nejlepších výsledků (největšího potlačení FWM) je dosaženo u varianty využívající rotující polarizaci kolem všech tří os. Zde bylo i pro nulovou disperzi dosaženo velmi nízkých hodnot BER, konkrétně  $4,15 \cdot 10^{-11}$ , což znamená snížení o 9 řádů oproti variantě bez polarizace. U disperze vláken 1 ps/(nm·km) pak bylo při použití jakékoliv ze dvou uvedených variant polarizace dosaženo v podstatě minimálních měřitelných hodnot BER (minimální měřitelná hodnota BER je u použitého diagnostického nástroje  $1,00 \cdot 10^{-40}$ ).

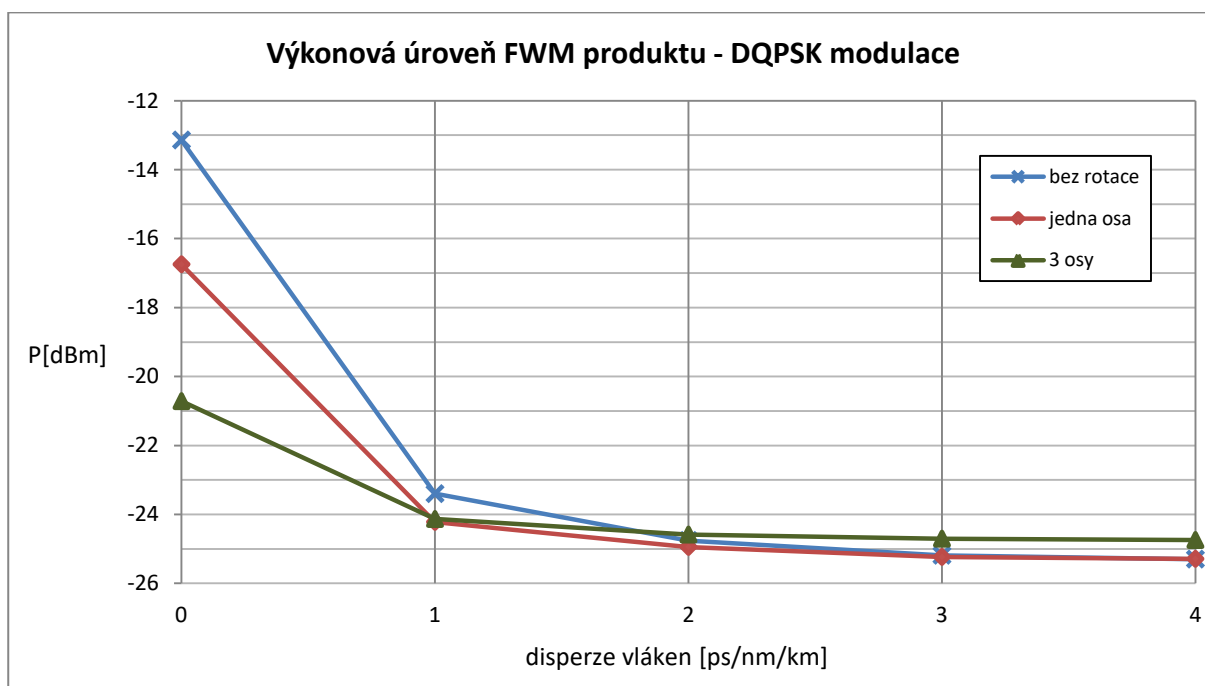
<i>disperze vláken [ps/(nm·km) ]</i>	<i>BER<sub>bez polarizace</sub> [-]</i>	<i>BER<sub>jedna osa</sub> [-]</i>	<i>BER<sub>tři osy</sub> [-]</i>
0	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-6}$	$4,15 \cdot 10^{-11}$
1	$4,99 \cdot 10^{-16}$	$3,11 \cdot 10^{-40}$	$1,00 \cdot 10^{-40}$

**Tab. 4.1:** Hodnoty BER na konci trasy (OOK modulace)

#### 4.2.2. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u čtyřkanalového systému s DQPSK modulací

Výsledky diskutované v této kapitole odpovídají variantě čtyřkanalového systému, který využívá DQPSK modulaci. Parametry tohoto systému jsou uvedeny v kapitole 4.2 a schémata použitého vysílače a modulátoru jsou v kapitole 2.2.2. Aby bylo možné získané výsledky porovnávat s variantou využívající OOK modulaci, byly simulace provedeny pro tři varianty rotující polarizace v kombinaci s disperzí vláken 0, 1, 2, 3 a 4 ps/(nm·km). Tyto tři varianty polarizace kanálů jsou popsány v kapitole 4.2.1.

Pro vyhodnocení a porovnání vlivu všech simulovaných kombinací disperze a polarizace byla na konci trasy měřena výkonová úroveň dominantního vrcholu FWM produktu, který je k vysílaným kanálům nejbližší. Naměřené výkonové úrovně jsou vyneseny do grafu na obrázku 4.9.



**Obr. 4.9:** Výkonová úroveň produktu FWM pro DQPSK modulaci  
(simulace se čtyřmi kanály)

Při porovnání tohoto grafu s případem OOK modulace (viz obrázek 4.8 v kapitole 4.2.1), je možné zaznamenat několik rozdílů. DQPSK modulace se zdá být v souladu se simulacemi dvoukanálových systémů o něco odolnější proti čtyřvlňnému směšování než OOK modulace. Pro nulovou disperzi vláken na trase dosahuje výkonová úroveň měřeného produktu o několik dB nižších výkonových hladin. Zejména pro variantu s rotací kolem tří os je útlum tohoto produktu opravdu výrazný. Zároveň je zřejmé, že při použití nenulové disperze dochází ke značnému potlačení FWM bez ohledu na to, jaká varianta polarizace je použita.

Stejně jako u modulace OOK byla i zde měřena hodnota BER na konci trasy. V tabulce 4.2 jsou uvedeny hodnoty naměřené pro nulovou disperzi vláken na trase a pro disperzi 1 ps/(nm·km). V souladu s výše uvedeným grafem je z tabulky možné vyčíst výrazné potlačení FWM pomocí rotující polarizace i při nulové disperzi vláken. Pomocí varianty rotace kolem tří os bylo dosaženo snížení BER o 18 řádů (z  $10^{-6}$  na  $10^{-24}$ ) a lze tedy konstatovat, že vhodné použití rotující polarizace u systémů využívajících DQPSK modulaci vede ke zlepšení přenosových vlastností.

<b>disperze vláken [ps/(nm·km) ]</b>	<b>BER<sub>bez polarizace</sub> [-]</b>	<b>BER<sub>jedna osa</sub> [-]</b>	<b>BER<sub>tři osy</sub> [-]</b>
0	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$5,46 \cdot 10^{-17}$	$2,51 \cdot 10^{-24}$
1	$3,13 \cdot 10^{-29}$	$1,83 \cdot 10^{-38}$	$1,00 \cdot 10^{-40}$

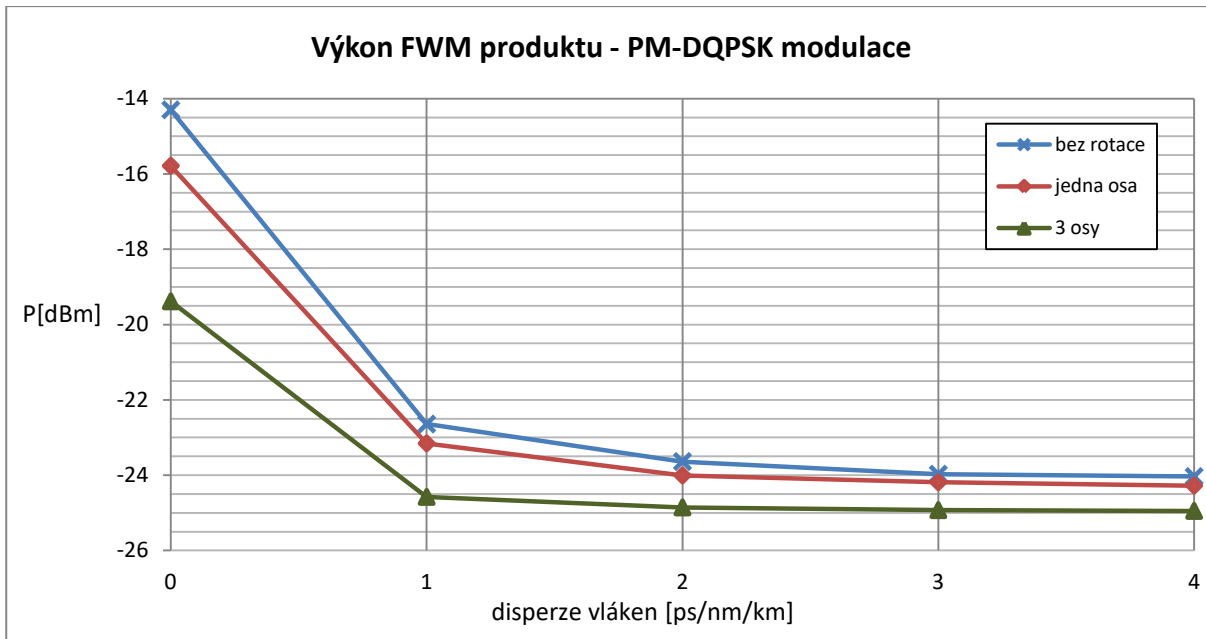
**Tab. 4.2:** Hodnoty BER na konci trasy (DQPSK modulace)

### 4.2.3. Simulace potlačení FWM pomocí polarizace u čtyřkanálového systému s PM-DQPSK modulací

Za účelem demonstrace chování modulačního formátu využívajícího polarizační multiplex byl systém popsán v kapitole 4.2 simulován i ve variantě s PM-DQPSK modulací. Schéma použitého vysílače a modulátoru je uvedené v kapitole 2.2.3.

Pro modulaci PM-DQPSK byly provedeny simulace s totožnými parametry jako v případech modulací OOK a DQPSK. Jedná se tedy o 15 kombinací polarizace a disperze, které jsou popsány v kapitole 4.2.1.

Naměřené výkonové úrovně dominantního vrcholu sledovaného produktu čtyřvlňného směšování jsou vyneseny do grafu na obrázku 4.10.



**Obr. 4.10:** Výkonová úroveň produktu FWM pro modulaci PM-DQPSK  
(simulace se čtyřmi kanály)

Z grafu je patrné, že varianta bez polarizace a varianta s rotací kolem jedné osy mají velmi podobný průběh, který se od sebe liší jen o něco málo více než 1 dB, což je téměř zanedbatelné. Použitím rotace kolem jedné osy se tedy v aktuálním nastavení sledovaného systému nepodařilo dosáhnout uspokojivého potlačení FWM. Výkonové úrovně sledovaného produktu FWM jsou oproti tomu pro variantu rotace kolem tří os mnohem menší. Zejména pro případ nulové disperze je útlum způsobený touto variantou polarizace opravdu výrazný. Oproti variantě bez polarizace je výkonová úroveň produktu FWM snížena o přibližně 5,5 dB a naměřené výkonové úrovně se pohybují o několik dB níže než u zbylých dvou variant i v případě nenulové disperze vláken. Varianta využívající polarizaci kolem všech tří os se tím pádem jeví jako zajímavá možnost optimalizace systémů využívajících modulaci PM-DQPSK.

### **4.3. Vliv malých úhlů rotace polarizačního stavu na čtyřkanálové WDM systémy**

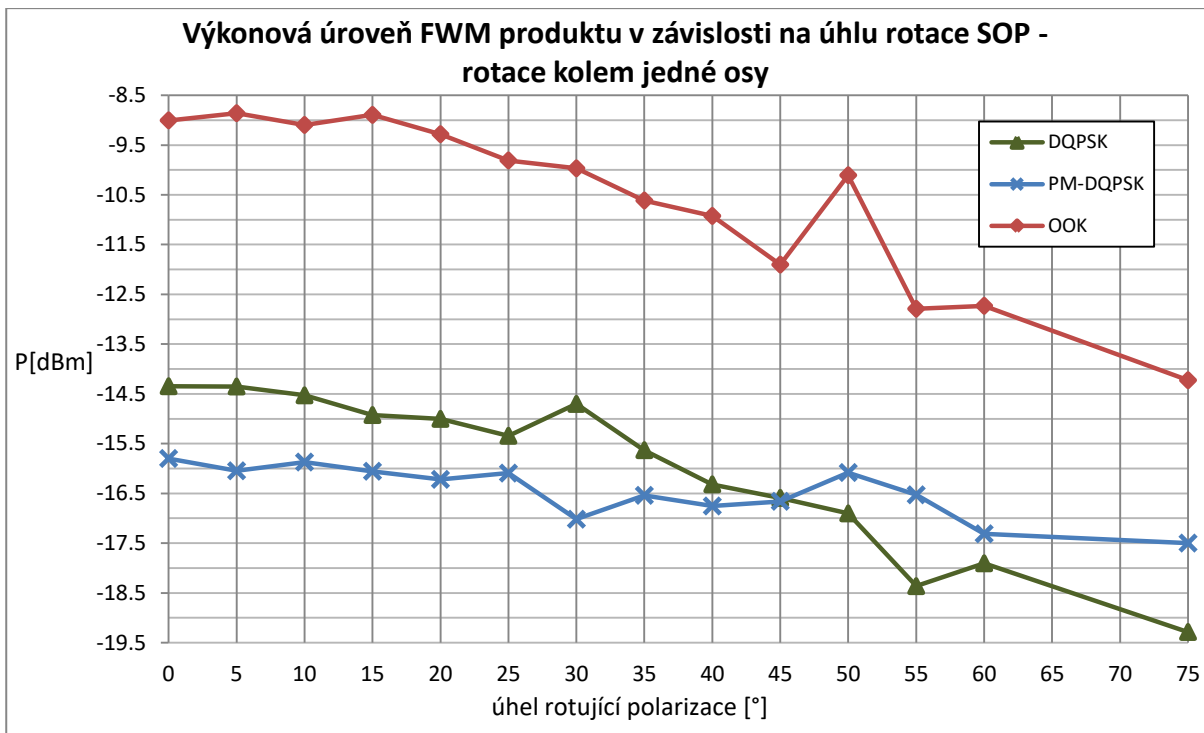
Z výsledků simulací dvoukanálových a čtyřkanálových systémů, které jsou zpracovány v předchozích kapitolách (viz kapitoly 4.1 a 4.2), vyplývá, že efektivního potlačení čtyřvlňného směšování je možné dosáhnout zejména použitím vláken s nenulovou disperzí. Nicméně využití rotující polarizace se také jeví jako adekvátní řešení problému FWM a i v případě použití vláken s nulovou disperzí bylo dosaženo v některých případech poměrně značného útlumu nežádoucích produktů čtyřvlňného směšování.

Ve zmíněných simulacích byla používána rotující polarizace vždy jen s většími úhly rotace. Konkrétně rotace o 90, 135 a 180 stupňů u simulací, ve kterých je využívána rotace kolem jedné osy, a rotace o 180 stupňů u simulací, u kterých je využívána rotace kolem tří os. Nabízí se tedy otázka, zda je možné nežádoucí produkty FWM do určité míry potlačit i při použití menších úhlů mezi vektory polarizace. Pro zkoumání závislosti FWM na rotující polarizaci s využitím menších úhlů jsou použita totožná zapojení čtyřkanálových systémů jako v kapitole 4.2, kde jediný rozdíl je v nastavení úhlů u polarizačních rotátorů umístěných ve vysílači (viz schéma na obrázku 4.6 v kapitole 4.2). Veškeré další parametry kromě samotných úhlů rotace byly ponechány stejné. Rotace o menší úhly by následně bylo možné použít i u simulací systému s větším množstvím kanálů.

#### **4.3.1. Vliv rotace polarizačního stavu kolem jedné osy na FWM**

Rotující polarizace kolem jedné osy vede k potlačení čtyřlenného směšování podle výsledků v kapitole 4.2 a jejích podkapitolách spíše v případě použití modulací, které nevyužívají polarizační multiplex. Zejména u DQPSK modulace bylo s pomocí rotace kolem jedné osy dosaženo solidního potlačení FWM. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, doposud byla rotace kolem jedné osy v simulacích nastavena vždy tak, že první kanál polarizován nebyl, druhý byl otočen o 90°, třetí o 135° a poslední čtvrtý o 180°. V této kapitole tedy bude zkoumáno, jaký vliv na čtyřlenné směšování bude mít rotující polarizace využívající menší než výše uvedené úhly.

Pro sledování vlivu menších úhlů byla použita stejná zapojení čtyřkanálových systémů jako v kapitole 4.2. Potlačení FWM je zkoumáno pomocí měření výkonové úrovně nežádoucího produktu FWM, který se ve spektru nachází nejbliže ke čtyřem původně vysílaným kanálům. Simulace byly provedeny pro varianty rotace kolem jedné osy s roztečí 5 až 75 stupňů. V případě rozteče 30° tedy není první kanál polarizován vůbec, druhý je otočen o 30° kolem  $s_2$ , třetí je kolem osy  $s_2$  otočen o 60° a čtvrtý kanál o 90°. Naměřené výkonové úrovně sledovaného produktu FWM jsou vyneseny do následujícího grafu.



**Obr. 4.11:** Výkonová úroveň produktu FWM pro různé úhly rotace kolem jedné osy (simulace 4-kanálového systému)

OOK modulace je ze tří zkoumaných modulací proti čtyřvlňnému směšování odolná nejméně, přičemž u varianty s DQPSK modulací se výkonová úroveň v použitém nastavení systému pohybuje přibližně o 5 dB níže. Co se týče samotného průběhu, tedy způsobu, jak zkoumané systémy reagují na narůstající úhel rotující polarizace, jsou si ale obě varianty využívající modulace bez polarizačního multiplexu velmi podobné. Výkonová hladina sledovaného produktu FWM s narůstajícím úhlem klesá, přičemž zaznamenaného poklesu je dosaženo pro úhly větší než 30°. Další zajímavostí jsou poměrně výrazné výkyvy ve vneseném průběhu, ke kterým docházelo i při několikanásobném opakování simulací vždy na stejných úhlech. U varianty využívající OOK se objevuje u úhlu 55° poměrně výrazný nárůst výkonové úrovně. K menšímu nárůstu výkonové úrovně dochází i u varianty využívající DQPSK, a to konkrétně u úhlu 30°. U této varianty se pak vyskytuje ještě prudký pokles výkonové úrovně u úhlu 55°. Použitím rotace kolem jedné osy bylo u obou variant dosaženo útlumu maximálně o několik dB, přičemž až od úhlu 55° docházelo k výraznějšímu útlumu.

Systém s PM-DQPSK modulací na rozdíl od výše diskutovaných variant bez polarizačního multiplexu na rotaci kolem jedné osy nereaguje skoro vůbec. Výkonová úroveň se téměř po celou dobu pohybuje kolem stejné hodnoty (zde se jedná konkrétně o -16 dB) a až pro úhly 60 a 75 stupňů dochází k mírnému útlumu. Výjimkou je výkyv, který se podobně jako u varianty s modulací DQPSK vyskytuje u rotace o 30°. PM-DQPSK modulace je sice sama o sobě proti FWM ze zkoumaných variant

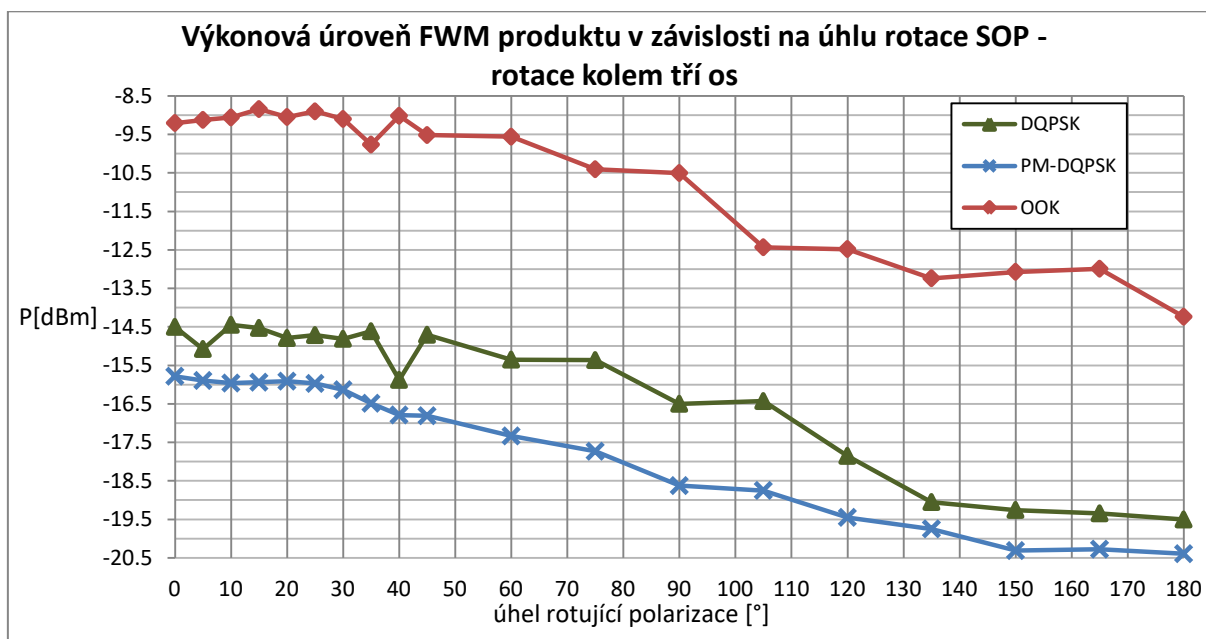


nejodolnější, ale při použití rotace kolem jedné osy dosahuje DQPSK modulace pro úhly větší než 45° lepších výsledků (většího útlumu).

### 4.3.2. Vliv rotace polarizačního stavu kolem tří os na FWM

Při pohledu na výsledky simulací v kapitolách 4.2.1 až 4.2.3 se jeví použití polarizace s rotací kolem tří os jako velmi účinný způsob potlačení nežádoucích produktů čtyřlíného směšování. Zejména v kombinaci s PM-DQPSK modulací bylo dosaženo velmi výrazného útlumu. Zatímco v doposud provedených simulacích byla použita rotace vždy o 180 stupňů, v této kapitole bude zkoumán vliv použití menších úhlů na potlačení čtyřlíného směšování. V rámci simulací je tedy pozorováno, jaké nejmenší úhly rotující polarizace by mohly vést k dostatečnému potlačení nežádoucích produktů FWM.

Pro zkoumání vlivu rotace o menší úhly na FWM byla použita stejná zapojení čtyřkanalových systémů jako v kapitole 4.2. Simulace byly opět pro porovnání provedeny pro systémy využívající OOK, DQPSK a PM-DQPSK modulace. Zkoumány byly varianty rotace o úhel v rozmezí 5 až 180 stupňů. Například v případě rotace o 30 stupňů tedy první kanál polarizován není a ostatní tři kanály jsou otočeny vždy kolem jedné ze tří os právě o 30 stupňů. Potlačení FWM je stejně jako v předchozích kapitolách zkoumáno pomocí měření výkonové úrovně produktu FWM, který je k původně vysílaným čtyřem kanálům nejbližší. Naměřené hodnoty výkonových úrovní jsou vyneseny do následujícího grafu.



**Obr. 4.12:** Výkonová úroveň produktu FWM pro různé úhly rotace kolem tří os  
(simulace 4-kanalového systému)

Z výkonových úrovní vynesných do grafu je možné konstatovat, že modulace DQPSK je proti čtyřvlňnému směšování výrazně odolnější než OOK modulace. Výkonová úroveň sledovaného produktu FWM se pro DQPSK modulaci pohybuje celou dobu přibližně o 6 dB níže. Zároveň je ale z grafu patrné, že tyto dvě modulace, které nevyužívají polarizační multiplex, reagují na narůstající úhel rotace velmi podobně. Rotace SOP o menší úhly nemá téměř žádný efekt a výkonová hladina produktu FWM se u obou modulací pohybuje na přibližně stejné úrovni. Až pro větší úhel rotace začíná docházet k útlumu. Jako minimální úhel rotace použitelný pro efektivní potlačení FWM se jeví úhel  $90^\circ$ . S ohledem na toto zjištění je možné vyhodnotit, že menší úhly rotace pro systémy s OOK a DQPSK modulacemi nevedou k optimalizaci systému a tuto variantu není třeba dále zkoumat. U simulací vícekanálových systémů (viz kapitola 4.4) je tedy potřeba brát v úvahu, že pro účinné potlačení čtyřvlňného směšování je nutné na jednotlivé kanály použít rotaci minimálně o  $90^\circ$ , přičemž ideálně by měla být použita rotace o  $180^\circ$ , tak jak bylo popsáno v kapitolách 4.2.1 a 4.2.2. Použitím rotace kolem tří os je možné pro varianty systémů s modulacemi OOK a DQPSK dosáhnout podobného útlumu jako v případě rotace kolem jedné osy.

PM-DQPSK modulace reaguje na narůstající úhel rotace velmi podobně jako ostatní dvě zkoumané modulace, které polarizační multiplex nevyužívají. V podstatě jediným rozdílem v průběhu je, že výkonová hladina sledovaného produktu FWM klesá u PM-DQPSK modulace stabilněji než v ostatních dvou případech. Malé úhly rotace opět nemají na potlačení FWM v podstatě žádný vliv, ale kolem  $30^\circ$  začíná docházet k plynulému poklesu výkonové hladiny, který pokračuje pro všechny další úhly a na rozdíl od ostatních dvou modulací nedochází k výrazným skokům či výkyvům. Co se týče použitelnosti menších úhlů ve vícekanálových systémech, platí, že k efektivnějšímu potlačení dochází až při rotaci  $90^\circ$  a optimálně by měla být použita rotace o alespoň  $120^\circ$ .

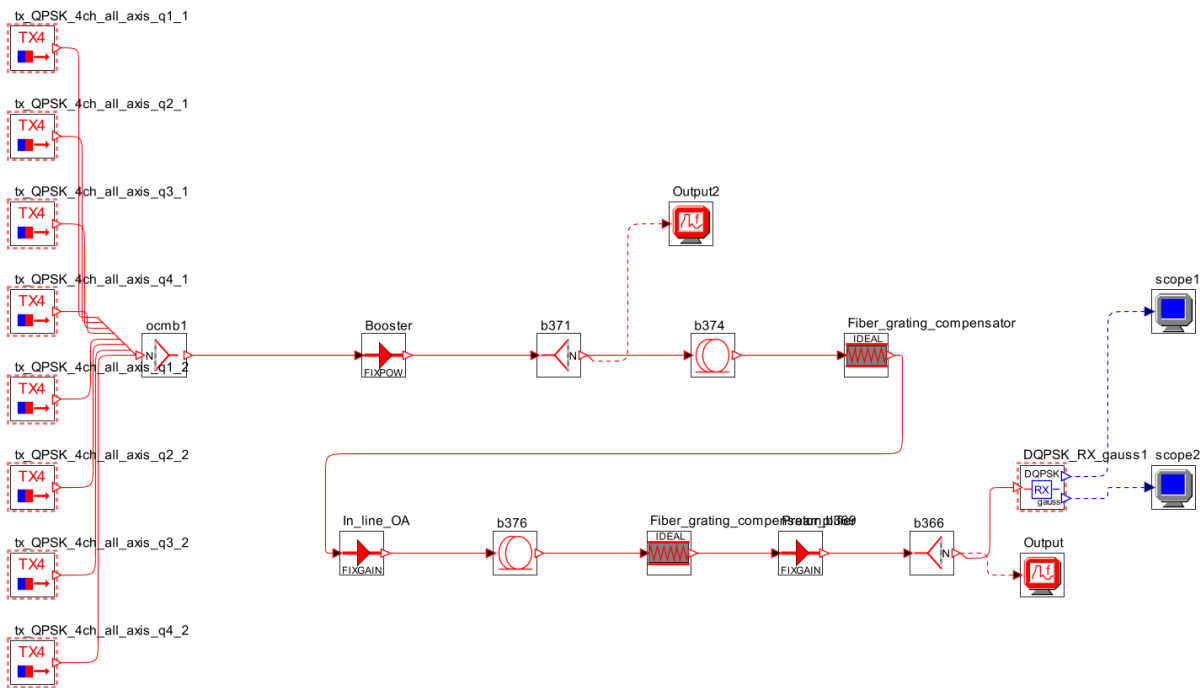
Z výše popsaných výsledků vyplývá, že PM-DQPSK modulace, tedy modulace, která jako jediná ze tří zkoumaných využívá polarizační multiplex, reaguje na narůstající úhel rotující polarizace v případě použití všech tří os rotace o něco lépe, než zbylé dvě modulace. U všech tří modulací je pomocí rotující polarizace s využitím tří os možné dosáhnout přibližně stejného útlumu, nicméně PM-DQPSK modulace je ze tří zkoumaných modulací proti FWM nejodolnější. Bez ohledu na úhel rotující polarizace se výkonová hladina sledovaného produktu FWM pohybuje u varianty s PM-DQPSK v aktuálním nastavení systému o více než 6 dB níže než u varianty s modulací OOK a až o 2 dB níže než u varianty s DQPSK modulací. Pro simulace vícekanálových systémů se tedy jeví jako vhodná volba PM-DQPSK modulace případně modulace DQPSK, která navíc na rozdíl od varianty využívající PM-DQPSK reaguje velmi dobře i na rotaci SOP kolem jedné osy (viz kapitola 4.3.1) a umožňuje tak dosažení optimalizace systému s využitím jednodušší implementace.

#### **4.4. Závislost přenosových vlastností na polarizaci u vícekanálových WDM systémů**

Simulace jednodušších (dvoukanálových a čtyřkanálových) systémů a jejich výsledky popsané v předchozích kapitolách sloužily zejména k ověření toho, zda má rotující polarizace na přenosové vlastnosti optického systému vůbec nějaký pozitivní vliv. Snazší implementovatelnost a větší přehlednost těchto systémů umožnila pozorování toho, jaké konkrétní kombinace rotující polarizace (velikosti úhlů a počet použitých os rotace) povedou na co možná nejefektivnější potlačení nežádoucích produktů FWM.

V této kapitole a jejích podkapitolách už budou zkoumány systémy, které jsou o poznání bližší současným komerčním systémům, a to minimálně co se týče počtu přenosových kanálů. Cílem této kapitoly je vyhodnotit s využitím poznatků získaných v předchozích kapitolách vliv polarizace na FWM v kombinaci s disperzí u 32-kanálových systémů a tyto systémy pomocí rotující polarizace optimalizovat. Hlavním pozorovaným parametrem už zde nebude výkonová hladina jednoho z nežádoucích produktů FWM, ale chybovost (BER) zaznamenaná po přijetí signálu jednoho z původních 32 kanálů. Chybovost závisí na mnoha dalších parametrech a jevech, které ale v této kapitole sledovány nebudou a pozornost bude věnována hlavně čtyřlínému směšování v kombinaci s disperzí vláken. Z toho důvodu nebude zájem upřen na konkrétní hodnoty chybovosti, ale spíše na změny a rozdíly v hodnotách BER mezi případy, kdy polarizace použitá není a kdy použitá je.

Schémata zkoumaných systémů vychází ze zapojení popsaného v kapitole 4.2. Jediným rozdílem (není-li brána v potaz změna některých parametrů) je použití většího počtu vysílačů, tak aby bylo vysíláno na 32 kanálech. Toho bylo docíleno paralelním zapojením osmi čtyřkanálových vysílačů, jejichž schéma je vyobrazeno na obrázku 4.6 v kapitole 4.2. Schéma celého tohoto zapojení je uvedeno níže na obrázku 4.13. Z předchozích kapitol vyplývá, že ze zkoumaných modulací by proti čtyřlínému směšování měla být nejodolnější modulace PM-DQPSK. Nicméně ve snaze získat užitečnější výsledky (zejména lépe interpretovatelné hodnoty BER) budou v této kapitole a jejích podkapitolách sledovány vždy systémy využívající modulaci DQPSK, která, jak vyplývá z předchozích kapitol, není v porovnání s PM-DQPSK z hlediska odolnosti proti FWM výrazně horší. Na polarizaci kanálů reaguje v případě rotace kolem jedné osy dokonce o něco lépe (viz graf na obrázku 4.11 v kapitole 4.3.1). Bližší odůvodnění volby modulace DQPSK je uvedeno v kapitole 4.4.1 v části, kde je zkoumána chybovost přenosu.



**Obr. 4.13:** Blokové schéma simulace WDM systému se třiceti dvěma kanály (DQPSK modulace)

#### 4.4.1. Varianty rotující polarizace pro 32-kanálový WDM systém využívající rotaci kolem tří os

Nejprve byl sledován systém, jehož parametry jsou podobné systémům popsaným v předchozích kapitolách. Datové zdroje jsou nastaveny na rychlost 10 Gb/s, výsílací výkonová úroveň použitých laserů je 0 dBm a rozteč jednotlivých kanálů je 50 GHz. Simulace byly stejně jako u čtyřkanálových systémů (viz kapitola 4.2) provedeny pro varianty vláken s disperzí 0, 1, 2, 3 a 4 ps/(nm·km).

Z předchozích kapitol vyplývá, že největšího potlačení FWM bylo v kombinaci se všemi sledovanými modulacemi včetně modulace DQPSK, která je v těchto WDM systémech použita, dosaženo s využitím rotace kolem všech tří os (viz kapitoly 4.2.1 až 4.2.3). Oproti dříve sledovaným čtyřkanálovým systémům se nyní nabízí mnohem větší množství možných kombinací a způsobů, jak jednotlivé kanály polarizovat. Zároveň je ale potřeba brát v úvahu, že pro menší úhly bylo dosahováno jen velmi malého nebo žádného útlumu výkonové úrovně sledovaného produktu FWM (viz obrázek 4.12 v kapitole 4.3.2). Potlačení čtyřvlňného směšování bylo zkoumáno celkem pro pět variant, přičemž pro usnadnění byla v těchto variantách na jednotlivých kanálech provedena rotace vždy jen kolem jedné ze tří možných os. Všech pět simulovaných variant je popsáno v tabulce 4.3. V tabulce je vždy uvedeno, o jaký úhel a kolem jaké osy byla pro daný kanál provedena rotující

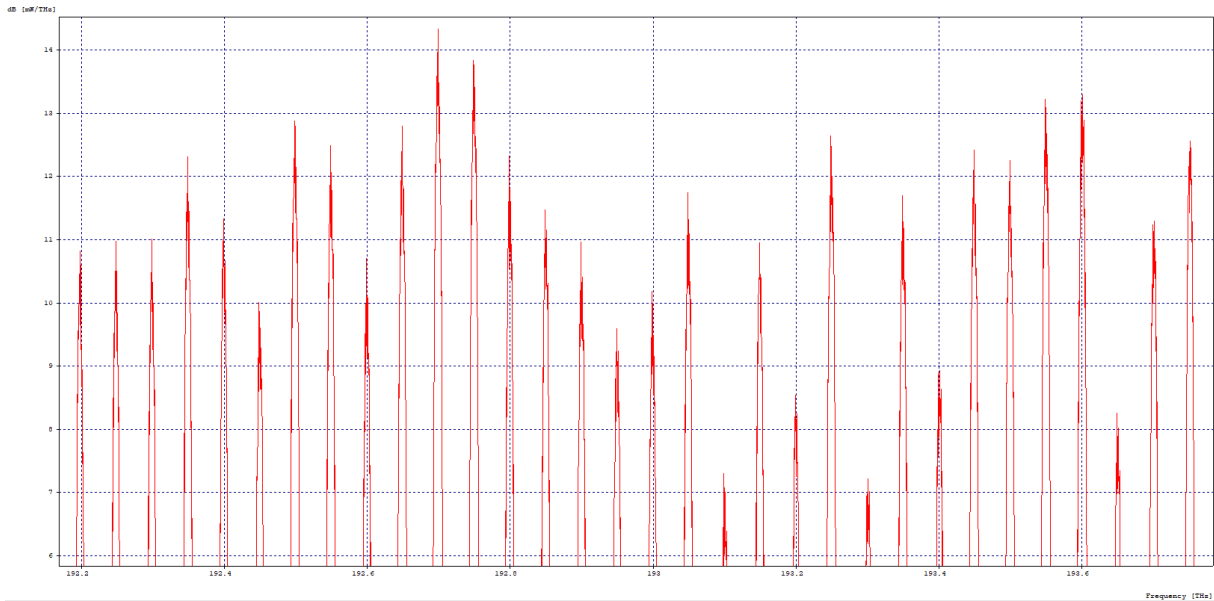
polarizace. Číslo kanálu odpovídá pořadí frekvence, na kterých jsou vysílány. Kanál 1 je tedy vysílán na nejnižší frekvenci (v tomto případě 192.2 THz) a kanál 32 naopak na nejvyšší frekvenci (v tomto případě 193.75 THz).

kanály	varianta 1 (osa/úhel rotace)	varianta 2 (osa/úhel rotace)	varianta 3 (osa/úhel rotace)	varianta 4 (osa/úhel rotace)	varianta 5 (osa/úhel rotace)
1/17	X	X	X	X	X
2/18	s1/60°	s1/90°	s1/180°	s1/60°	s1/180°
3/19	s2/60°	s2/90°	s2/180°	s2/60°	s2/180°
4/20	s3/60°	s3/90°	s3/180°	s3/60°	s3/180°
5/21	X	X	X	s1/120°	s1/180°
6/22	s1/120°	s1/180°	s1/180°	s2/120°	s2/180°
7/23	s2/120°	s2/180°	s2/180°	s3/120°	s3/180°
8/24	s3/120°	s3/180°	s3/180°	s1/180°	s1/180°
9/25	X	X	X	s2/180°	s2/180°
10/26	s1/180°	s1/90°	s1/180°	s3/180°	s3/180°
11/27	s2/180°	s2/90°	s2/180°	s1/240°	s1/180°
12/28	s3/180°	s3/90°	s3/180°	s2/240°	s2/180°
13/29	X	X	X	s3/240°	s3/180°
14/30	s1/240°	s1/180°	s1/180°	s1/300°	s1/180°
15/31	s2/240°	s2/180°	s2/180°	s2/300°	s2/180°
16/32	s3/240°	s3/180°	s3/180°	s3/300°	s3/180°

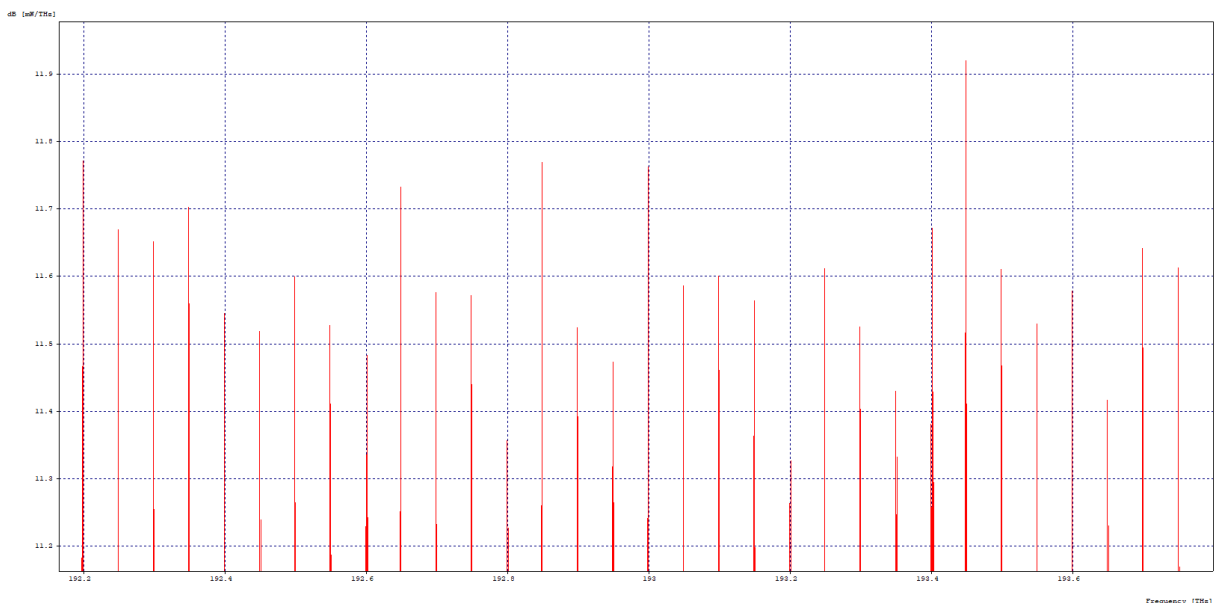
**Tab. 4.3:** *Osy a úhly rotace u simulovaných variant*

Pozitivní vliv nenulové disperze vláken a rotující polarizace na potlačení čtyřlenného směšování je patrný už při pohledu na spektrum na výstupu použité optické trasy. Za pomoci detailnějšího zobrazení vrcholů ve spektru, tedy naměřených výkonových úrovní na všech čtyřiceti vysílaných frekvencích, je možné vyhodnotit, že výkonové úrovně jednotlivých kanálů na konci trasy nikdy nejsou konstantní a dochází k jejich kolísání. Spektrum má tedy na první pohled vždy velmi podobný tvar, a to bez ohledu na to, jaká vlákna byla na trase, a jestli byla nebo nebyla použita polarizace. Při bližším zkoumání je však zřejmé, že hodnoty výkonových úrovní se u jednotlivých variant výrazně liší. V případě, kdy byla na trase použita vlákna s nulovou disperzí a kanály nebyly nijak polarizované, je rozdíl mezi nejsilnějším a nejslabším přijatým kanálem více než 5 dB (viz obrázek 4.14). Při použití polarizace (konkrétně varianty 1 popsané v tabulce 4.3) a vláken s nulovou disperzí je pak tento rozdíl

přibližně 1 dB a při použití polarizace a vláken s disperzí 1 ps/(nm·km) dokonce jen několik desetin dB (viz obrázek 4.15). Zde je potřeba podotknout, že uvedené konkrétní hodnoty výkonových úrovní v dB nejsou příliš relevantní, neboť závisí i na dalších parametrech, jako je například vysílací výkon nebo nastavení optických zesilovačů na trase. Co je ale podstatné, je fakt, že spektrum na výstupu trasy při použití polarizace vykazuje lepší vlastnosti a rozdíl mezi nejvyšší a nejmenší výkonovou hladinou přijatých kanálů je několikanásobně menší.



**Obr. 4.14:** *Spektrum na výstupu trasy (32-kanálový systém s DQPSK modulací)  
pro variantu 0 ps/(nm·km) bez polarizace*



**Obr. 4.15:** *Spektrum na výstupu trasy (32-kanálový systém s DQPSK modulací)  
pro variantu 1 ps/(nm·km) s polarizací*

Nyní se nabízí otázka, jestli výše popsanému trendu odpovídají i naměřené hodnoty BER. Zde se konečně dostáváme k hlavnímu důvodu, proč byla v této kapitole zvolena pro simulace modulace DQPSK namísto modulace PM-DQPSK. Přijímač používaný pro varianty využívající modulaci PM-DQPSK hodnotu BER neodhaduje, jako je tomu u modulace DQPSK, ale přímo měří. Minimální možná získatelná hodnota BER (nebereme-li v úvahu nulovou chybovost) je tím pádem značně omezená nastavenou délkou simulace a z toho vyplývajícím počtem vyslaných bitů. Délka simulace (nebo přesněji doba vysílání) byla ve všech simulacích nastavena na 1  $\mu$ s, což při rychlosti zdroje dat 10 Gb/s znamená, že bude vysláno celkem 10 000 bitů a minimální možná hodnota BER naměřená na přijímači je pak  $10^{-4}$  (1 chybný bit z 10 000). Pokud by měla být hodnota BER měřena v případě modulace PM-DQPSK přesněji, tedy pokud by bylo cílem dosahovat řádově mnohem menších hodnot, bylo by nutné zmíněnou dobu vysílání mnohonásobně zvýšit. Vzhledem ke složitosti zapojení a šířce sledovaného pásma (s rostoucí šířkou pásma roste i doba trvání běhu simulace) by však výraznější navýšení doby vysílání vedlo k tomu, že by se doba běhu simulace v případě zkoumání více variant polarizace a disperze vláken pohybovala řádově v desítkách hodin, ne-li ve dnech. To je bohužel v kontextu počtu provedených simulací v rámci této práce značně nepraktické a z hlediska nutnosti neustálého běhu používaného počítače jen velmi těžko proveditelné. Z toho důvodu byla ponechána délka vysílání 1  $\mu$ s a modulaci PM-DQPSK nahradila její varianta bez polarizačního multiplexu. Znovu je vhodné podotknout, že naměřené hodnoty chybovosti slouží především jako orientační čísla vhodná k porovnání zkoumaných kombinací polarizace a disperze.

Z předchozích kapitol vyplývá, že k potlačení čtyřvlenného směšování vede zejména použití optických vláken s nenulovou disperzí. Nyní tedy bude zkoumáno, je-li možné pomocí některé z výše uvedených variant polarizace kanálů (viz tabulka 4.3) dosáhnout výraznějšího potlačení FWM i při použití vláken s nulovou disperzí. V tabulce 4.4 jsou uvedeny všechny naměřené hodnoty bitové chybovosti.

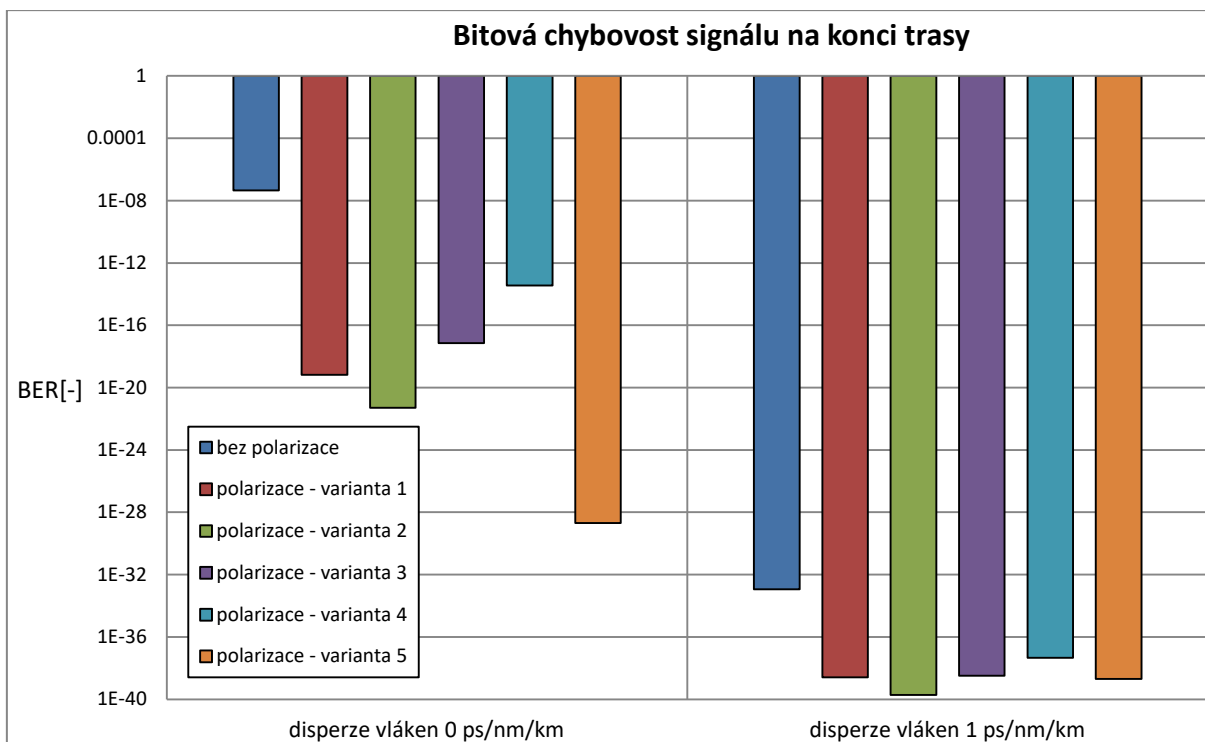
Z uvedených hodnot můžeme konstatovat, že použitím rotující polarizace je možné kvalitu přenosu výrazně vylepšit i zde u mnohakanálových WDM systémů, a to pro všechny zkoumané disperze vláken. Nejmarkantnější rozdíl je zřejmý při použití vláken s nulovou disperzí. Zatímco u varianty bez polarizace se chybovost pohybuje řádově kolem  $10^{-8}$ , u variant využívajících polarizaci je BER mnohem menší. I v nejhorším případě, kterým se zdá být varianta polarizace kanálů číslo 4, je chybovost řádově  $10^{-14}$ , což je pořád o 6 řádů lepší výsledek. Jednoznačně nejlepššího vylepšení chybovosti pak bylo dosaženo použitím varianty číslo 5 ( $BER = 2,07 \cdot 10^{-29}$  pro nulovou disperzi) a na pomyslné druhé místo se pak řadí varianta 2 ( $BER = 5,04 \cdot 10^{-22}$  pro nulovou disperzi). Na základě toho můžeme při pohledu na tyto dvě varianty v tabulce 4.3 vyvodit zajímavý závěr. Ve snaze potlačit FWM co nejefektivněji je zásadní použít co možná největší úhly rotující polarizace (u variant 2 a 5 se

jedná o úhel  $180^\circ$ ) a méně důležité je to, aby byly všechny kanály polarizovány vždy pokud možno jinou kombinací úhlu a osy otáčení (viz varianta 4).

Dalším zajímavým jevem, který z naměřených hodnot v tabulce 4.4 můžeme vypožorovat, je vliv narůstající disperze vláken na kvalitu přenosu (na chybovost). Z předchozích kapitol vyplývá, že použití vláken s nenulovou disperzí je velice účinnou metodou k potlačení čtyřvlňného směšování. Na základě tohoto faktu je tedy možné předpokládat, že s rostoucí disperzí vláken bude docházet k účinnějšímu potlačení FWM a tím i k poklesu chybovosti sledovaného signálu na výstupu optické trasy. Při pohledu na rozdíl v naměřených hodnotách BER mezi případy, kdy byla disperze vláken nastavena na  $0 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  a kdy na  $1 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ , tak tento předpoklad skutečně platí a dochází k výraznému poklesu chybovosti u všech variant polarizace. Nicméně při dalším navýšení disperze vláken na  $2 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  už reakce systému není tak jednoznačná a chybovost v některých případech (konkrétně u variant polarizace kanálů 1, 2 a 3) dokonce minimálně o jeden řád naroste. Podobný jev se objevuje i u varianty bez polarizace kanálů, kdy při zvýšení disperze vláken na trase z  $3 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  na  $4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  dochází k nárůstu chybovosti dokonce o 4 řády. Zde je potřeba si uvědomit, že ač disperze vede k účinnému potlačení čtyřvlňného směšování, stále se jedná o nežádoucí jev, který je v optických přenosových systémech nutné řešit. I přes to, že je disperze vláken na trase ve zkoumaných systémech plně kompenzována, je ze získaných hodnot BER patrné, že větší hodnoty disperze vláken mohou v kombinaci s rotující polarizací vést k mírnému zhoršení kvality přenosu. Vzhledem k výsledkům provedených simulací můžeme konstatovat, že u vícekanálových WDM systémů se zdá jako nejefektivnější způsob potlačení čtyřvlňného směšování kombinace polarizace přenosových kanálů a použití vláken s disperzí  $1 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ .

Na následujícím obrázku jsou pro větší názornost do grafu vyneseny naměřené hodnoty BER pro všech pět variant polarizace kanálů při použití vláken s disperzí  $0 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  a  $1 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ . Pro porovnání jsou v grafu uvedeny i případy, kdy polarizace použita nebyla. Z grafu je hned na první pohled patrný zejména obrovský rozdíl v kvalitě přenosu mezi variantami, kdy kanály polarizovány nebyly a kdy byla použita varianta polarizace kanálů číslo 5.





**Obr. 4.16:** Bitová chybovost signálu na konci trasy pro zkoumané kombinace polarizace a disperze (WDM systém s 32 kanály a DQPSK modulací)

BER [-] pro různé varianty polarizace						
disperze vláken	bez polarizace	varianta 1	varianta 2	varianta 3	varianta 4	varianta 5
0 ps/(nm·km)	$4,47 \cdot 10^{-8}$	$6,62 \cdot 10^{-20}$	$5,04 \cdot 10^{-22}$	$7,14 \cdot 10^{-18}$	$3,65 \cdot 10^{-14}$	$2,07 \cdot 10^{-29}$
1 ps/(nm·km)	$1,13 \cdot 10^{-33}$	$2,54 \cdot 10^{-39}$	$1,90 \cdot 10^{-40}$	$3,23 \cdot 10^{-39}$	$4,63 \cdot 10^{-38}$	$2,07 \cdot 10^{-39}$
2 ps/(nm·km)	$5,86 \cdot 10^{-36}$	$3,94 \cdot 10^{-37}$	$1,11 \cdot 10^{-39}$	$2,73 \cdot 10^{-38}$	$2,24 \cdot 10^{-38}$	$1,18 \cdot 10^{-39}$
3 ps/(nm·km)	$8,47 \cdot 10^{-37}$	$8,50 \cdot 10^{-38}$	$1,03 \cdot 10^{-38}$	$2,13 \cdot 10^{-38}$	$3,19 \cdot 10^{-39}$	$1,98 \cdot 10^{-39}$
4 ps/(nm·km)	$7,29 \cdot 10^{-33}$	$1,13 \cdot 10^{-39}$	$2,99 \cdot 10^{-38}$	$7,39 \cdot 10^{-37}$	$2,34 \cdot 10^{-40}$	$3,89 \cdot 10^{-39}$

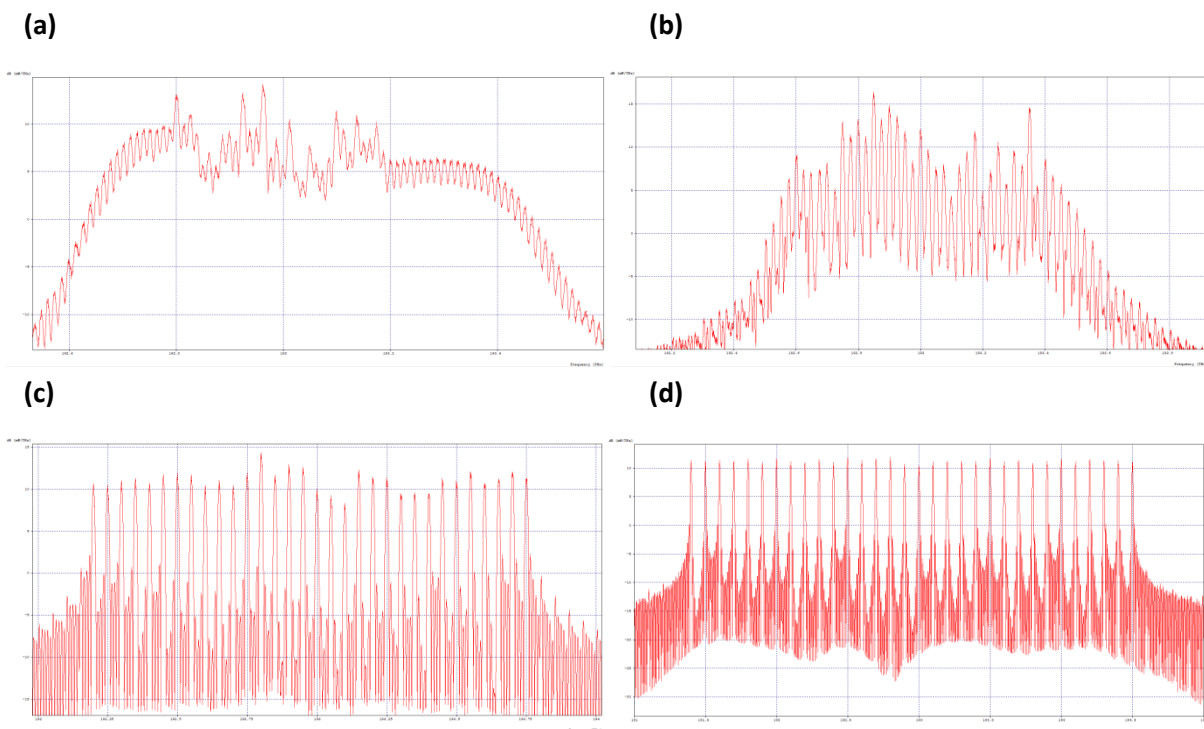
**Tab. 4.4:** Bitová chybovost signálu na konci trasy pro zkoumané kombinace polarizace a disperze (WDM systém s 32 kanály a DQPSK modulací)

#### 4.4.2. Závislost interakce polarizace a FWM na rozteči kanálů u 32-kanálových WDM systémů

Doposud byly v simulacích zkoumajících čtyřvlonné směšování a jeho vztah s polarizací sledovány jen systémy, ve kterých od sebe byly jednotlivé kanály vzdálené vždy o 50 GHz. Nyní by mohlo být zajímavé sledovat, změnila-li by se spolu se vzdáleností mezi kanály i intenzita interakce kanálů a tím i míra dopadu FWM na optický přenos. V této kapitole proto budou zkoumány

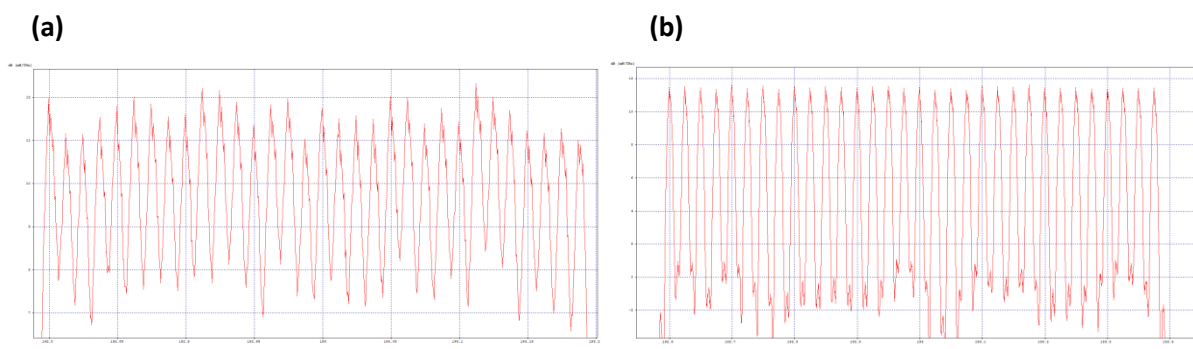
a diskutovány simulace systémů, u kterých je rozteč kanálů nastavena na 12,5 GHz, 25 GHz nebo 100 GHz, přičemž sledován bude vliv polarizace na kvalitu přenosu v těchto systémech.

Na obrázcích 4.17a až 4.17d jsou vyobrazena spektra na výstupu trasy pro variantu, kdy byla použita vlákna s nulovou disperzí a zároveň vysílané kanály nebyly polarizované. Jedná se tedy o variantu, kdy by se mělo čtyřvlonné směšování projevovat nejvíce. Z vyobrazených spekter je zřejmé, že s rostoucí vzdáleností mezi jednotlivými kanály vliv FWM na přenos klesá. Ve spektru na výstupu systému s roztečí kanálů 12,5 GHz lze jen velmi těžko rozpoznat 32 vysílaných kanálů a čtyřvlonné směšování se v tomto případě projevuje na optickém spektru velmi výrazně. U systému s roztečí kanálů 25 GHz už spektrum vykazuje lepší vlastnosti (má lepší tvar), ale stále je patrné výrazné zkreslení vlivem FWM, které se zde projevuje značným kolísáním výkonových úrovní jednotlivých kanálů. Na spektru systému s roztečí kanálů 50 GHz (tento systém je detailněji popsán v předchozích kapitolách) se čtyřvlonné směšování projevuje už mnohem méně a u systému s roztečí kanálů 100 GHz není zkreslení vlivem FWM patrné vůbec.



**Obr. 4.17:** Spektra DWDM na výstupu trasy u systému s 32 kanály, DQPSK modulací, disperzí vláken 0 ps/(nm·km) bez použití polarizace ve variantách:  
**(a)** rozteč kanálů 12,5 GHz, **(b)** rozteč kanálů 25 GHz,  
**(c)** rozteč kanálů 50 GHz, **(d)** rozteč kanálů 100 GHz

Z výsledků simulací popsaných v minulé kapitole bylo v souvislosti s WDM systémy využívajícími rozteč kanálů 50 GHz vyzorováno, že při použití vláken s nulovou disperzí vede ze zkoumaných variant polarizace kanálů k nejméně výraznějšímu vylepšení přenosu varianta číslo 5 (viz tabulka 4.3 v kapitole 4.4.1). Nyní tedy bude zkoumáno, zda je možné s využitím této varianty efektivně potlačit čtyřvlonné směšování i WDM systémů s jinými vzdálenostmi mezi kanály. Na následujícím obrázku je vidět, jak se změnil tvar spektra u systémů, kde se vliv čtyřvlonného směšování projevil nejvíce, tedy systémy s roztečí kanálů 12,5 GHz a 25 GHz. Hned na první pohled je zřejmé opravdu výrazné zlepšení tvaru spektra. U varianty s roztečí 12,5 GHz je sice stále zaznamatelné jisté zkreslení způsobené FWM, které se projevuje kolísáním výkonové úrovně mezi jednotlivými kanály. Nicméně nyní je ve spektru možné všech 32 kanálů alespoň jednoznačně identifikovat. U systému s roztečí kanálů 25 GHz došlo dokonce k tak výraznému zlepšení tvaru spektra, že je na něm vliv čtyřvlonného směšování jen stěží pozorovatelný.



**Obr. 4.18:** Spektra DWDM na výstupu trasy u systému s 32 kanály, modulací DQPSK, disperzí vláken 0 ps/(nm·km) s použitím polarizační varianty číslo 5:  
**(a)** rozteč kanálů 12,5 GHz, **(b)** rozteč kanálů 25 GHz

V tabulce 4.5 jsou uvedeny hodnoty BER pro všechny tři nově zkoumané varianty rozteče kanálů (varianta s roztečí 50 GHz je podrobně popsána v kapitole 4.4.1), přičemž sledovány byly jen hodnoty získané při použití vláken s nulovou disperzí. Pomocí těchto hodnot je možné potvrdit pozitivní vliv rotující polarizace na přenosové vlastnosti. Navzdory tomu, že u systému s roztečí kanálů 12,5 GHz bylo po použití polarizace možné pozorovat vylepšení tvaru spektra, se bitová chybovost nijak nezměnila a tento jev je tedy nutné okomentovat. Rozteč kanálů je v tomto případě podle všeho příliš malá, než aby bylo možné při aktuálním zapojení BER na výstupu trasy měřit a použité zařízení tím pádem jen odhadlo tuto poměrně vysokou hodnotu bitové chybovosti v obou sledovaných případech. Aby bylo možné získat skutečné hodnoty BER, bylo by potřeba ustoupit od doposud používaného zapojení a použít jiné prvky, případně výraznějším způsobem změnit parametry aktuálně zapojených prvků. To by ovšem značně změnilo podmínky měření a tím pádem by nebylo možné porovnávat získané hodnoty s výsledky ostatních provedených simulací. U varianty

s roztečí 25 GHz už výpočet BER na výstupu trasy funguje správně a lze si všimnout zlepšení kvality přenosu po použití rotující polarizace. Varianta s roztečí kanálů 100 GHz se jeví jako nejodolnější proti FWM, vzhledem k tomu, že i bez použití polarizace se hodnota BER pohybuje řádově kolem  $10^{-27}$ . Po použití varianty polarizace kanálů číslo 5 opět dochází ke zlepšení kvality přenosu, i když ne tak výraznému jako v případě systému s roztečí kanálů 50 GHz.

Vzhledem k získaným výsledkům můžeme dojít ke zhodnocení, že varianta polarizace kanálů, v předchozí kapitole prezentovaná jako optimální, vede ke snížení chybovosti i u systémů s jinou roztečí kanálů než 50 GHz. Zároveň je ale nutné zmínit, že s klesající roztečí kanálů vzrůstá vliv čtyřvlňného směšování na přenos a pro zapojení používané v provedených simulacích je potřeba nastavit rozteč kanálů na alespoň právě 50 GHz, aby bylo dosaženo přenosu s uspokojivě nízkou bitovou chybovostí.

rozteč kanálů [GHz]	BER [-] pro sledované varianty	
	bez polarizace	varianta 5
12,5	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$2,28 \cdot 10^{-2}$
25	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$
100	$5,91 \cdot 10^{-27}$	$9,02 \cdot 10^{-34}$

**Tab. 4.5:** Bitová chybovost signálu na konci trasy pro zkoumané varianty rozteče kanálů  
(WDM systém s 32 kanály a DQPSK modulací)

## 5. Závěr

V rámci této diplomové práce byl zkoumán vliv polarizace na jevy v optických vláknech a celkový dopad polarizace na optický přenos. Za tímto účelem byla provedena řada simulací v nástroji OptSim. Pro splnění vytčených cílů bylo nutné prostudovat závislost jevů a technik uplatňujících se v optovláknové komunikaci a důkladně se seznámit se simulačním prostředím OptSim.

V praktické části diplomové práce jsou popsány provedené simulace a následně diskutovány jejich výsledky. Sledován byl především vzájemný vztah polarizace, FWM a disperze u DWDM systémů. Nejprve byly simulovány dvoukanálové systémy, jejichž konkrétní parametry jsou popsány v kapitole 4.1. Porovnávány byly modulace OOK, DQPSK a PM-DQPSK. Míra potlačení FWM zde byla vyhodnocována na základě výkonových úrovní dominantního vrcholu produktu FWM. Pro případ vláken s nulovou disperzí bylo zajímavých výsledků dosaženo zejména u modulace DQPSK. Ta se podobně jako modulace PM-DQPSK jeví v případě nulové disperze a nulové polarizační rotace výrazně odolnější proti FWM než modulace OOK. S narůstajícím úhlem rotace je navíc možné dosáhnout podobného útlumu sledovaného produktu FWM, jako kdyby byla navyšována disperze vláken, což v případě dvoukanálového systému pro modulaci PM-DQPSK neplatí.

Podobným způsobem jako dvoukanálové systémy byly zkoumány i čtyřkanálové systémy, u kterých se ale nabízí více variant vzájemné rotace polarizace mezi jednotlivými kanály. Porovnávány byly opět modulace OOK, DQPSK a PM-DQPSK, přičemž simulace byly provedeny pro varianty rotace kolem jedné osy a kolem tří os. Potvrdila se větší odolnost modulace PM-DQPSK pro variantu, kdy není FWM nijak kompenzováno. U všech tří modulací se rotace kolem tří os o  $180^\circ$  jeví jako vhodný způsob potlačení FWM. Pro případ vláken s nulovou disperzí bylo za pomoci polarizace dosaženo největšího útlumu produktu FWM u modulace, čemuž odpovídá i snížení BER o 18 řádů z  $10^{-6}$  na  $10^{-24}$ . V dalších simulacích čtyřkanálových systémů byl parametrizován úhel, o který byl SOP jednotlivých kanálů otáčen. Z naměřených výkonových úrovní dominantního vrcholu jednoho z produktů FWM je možné konstatovat, že rotující polarizace vede k potlačení FWM je pro větší úhly.

Vliv polarizace byl zkoumán i u 32-kanálových DWDM systémů s roztečí kanálů 50 GHz využívajících modulaci DQPSK. Ve snaze optimalizovat sledovaný DWDM systém využívající vlákna s nulovou disperzí bylo zkoumáno celkem pět variant zapojení využívajících rotaci SOP kolem tří os (konkrétní úhly rotace pro jednotlivé kanály jsou uvedeny v tabulce 3 v kapitole 4.4.1). Pomocí všech pěti variant je možné dosáhnout výrazného zlepšení kvality přenosu, přičemž minimálního zmenšení BER bylo dosaženo pomocí varianty číslo 4, a to konkrétně o 6 řádů z  $10^{-8}$  na  $10^{-14}$ . Jako nejlepší se pak jeví varianta číslo 5, využívající výhradně rotaci o  $180^\circ$ , pomocí které bylo dosaženo snížení BER

o 21 řádů z  $10^{-8}$  na  $10^{-29}$ . Pomocí této varianty bylo dosaženo snížení BER také u systému s roztečí kanálů 25 GHz (o 4 řády z  $10^{-2}$  na  $10^{-6}$ ) a 100 GHz (o 7 řádů z  $10^{-27}$  na  $10^{-34}$ ).

Hlavním přínosem této diplomové práce je demonstrace vzájemné interakce optovláknových jevů, jako jsou FWM a disperze, a vliv polarizace na tyto jevy ve WDM systémech. Diskutovány jsou možné destruktivní účinky polarizace a potenciální cesty k jejich odstranění. V rámci simulací v OptSim jsou představeny možné způsoby využití polarizace, pomocí kterých lze dosáhnout výrazného zlepšení kvality přenosu u vícekanálových DWDM systémů. Cíle práce proto mohou být považovány za splněné.

V budoucnu je možné na tuto práci navázat provedením simulací, ve kterých by mohl být zkoumán vliv polarizace na další jevy projevující se v optickém přenosu. Případně by bylo zajímavé parametrizovat vlastnosti použitých laserů, jako je například výkonová úroveň na výstupu nebo spektrální šířka vysílaných paprsků.

## Zdroje

- [1] FERREIRA, Mário F. S., 2011. *Nonlinear effects in optical fibers*. Hoboken (New Jersey): Wiley. ISBN 978-0-470-46466-3.
- [2] ROGERS, Alan, 2008. *Polarization in optical fibers*. Boston: Artech House. Artech House applied photonics series. ISBN 978-1-58053-534-2.
- [3] STROBEL, Otto, 2016. *Optical and Microwave Technologies for Telecommunication Networks*. Hoboken (New Jersey): Wiley. ISBN 978-1-11997-190-0.
- [4] ABD, Haider. J., N.M. DIN, M. H. AL-MANSOORI, F. ABDULLAH a H. A. FADHIL, 2013. Mitigation of FWM crosstalk in WDM system using polarization interleaving technique. In: *2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP)* [online]. IEEE, 2013, s. 117-119 [cit. 2022-04-11]. ISBN 978-1-4673-6075-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICP.2013.6687086
- [5] SABAT, Naba Krushna, B. Srinivas RAO a Bijayananda PATNAIK, 2017. 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, s. 1946-1950 [cit. 2022-04-23]. ISBN 978-1-5090-6367-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICACCI.2017.8126130
- [6] WINZER, P.J. a R.-J. ESSIAMBRE, 2006. Advanced Optical Modulation Formats. *Proceedings of the IEEE* [online]. **94**(5), 952-985 [cit. 2022-04-11]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2006.873438
- [7] NELSON, L.E., T.N. NIELSEN a H. KOGELNIK, 2001. Observation of PMD-induced coherent crosstalk in polarization-multiplexed transmission. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. **13**(7), 738-740 [cit. 2022-04-23]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/68.930432
- [8] POPOVSKYY, Volodymyr a Al-Wandawi S.A. ISKANDAR, 2016. Polarization multiplexing modulation in fiber-optic communication lines. In: *2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)* [online]. IEEE, 2016, s. 214-216 [cit. 2022-04-11]. ISBN 978-1-5090-5715-3. Dostupné z: doi:10.1109/INFOCOMMST.2016.7905386
- [9] *Optsim: Sample Mode - Models Reference* [online]. RSoft Design Group [cit. 2022-04-12].
- [10] DHIVYA, M., J. Helina RAJINI a S. Tamil SELVI, 2016. Reduction of four-wave mixing effect in WDM systems using hybrid modulation techniques. In: *2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* [online]. IEEE, 2016, s. 2180-2185 [cit. 2022-04-12]. ISBN 978-1-5090-0396-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICCSP.2016.7754568

- [11] DUARTE, Francisco Javier, 2015. *Tunable Laser Optics*. 2nd edition. New York: CRC. ISBN 978-1-482-24529-5.
- [12] KWON, Do-Hoon a Douglas H. WERNER, 2010. Transformation Electromagnetics: An Overview of the Theory and Applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* [online]. **52**(1), 24-46 [cit. 2022-04-12]. ISSN 1045-9243. Dostupné z: doi:10.1109/MAP.2010.5466396
- [13] STADLER, Bethanie J. H. a Tetsuya MIZUMOTO, 2014. Integrated Magneto-Optical Materials and Isolators: A Review. *IEEE Photonics Journal* [online]. **6**(1), 1-15 [cit. 2022-04-12]. ISSN 1943-0655. Dostupné z: doi:10.1109/JPHOT.2013.2293618
- [14] ZAMAN, T.R., X. GUO a R.J. RAM, 2006. Proposal for a polarization-independent integrated optical circulator. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. **18**(12), 1359-1361 [cit. 2022-04-12]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/LPT.2006.877336
- [15] DUARTE, Francisco Javier, 1989. *Optical device for rotating the polarization of a light beam*. USA. 4822150. Uděleno 18.4.1989. Zapsáno 18.5.1989. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US4822150A/en>
- [16] LUN, Huazhi, Xiaomin LIU, Meng CAI, Yihao ZHANG, Ruoxuan GAO, Weisheng HU, Lilin YI a Qunbi ZHUGE, 2021. Machine-learning-based telemetry for monitoring long-haul optical transmission impairments: methodologies and challenges [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking* [online]. **13**(10) [cit. 2022-04-13]. ISSN 1943-0620. Dostupné z: doi:10.1364/JOCN.426826
- [17] FERRARI, Alessio, Karthikeyan BALASUBRAMANIAN, Mark FILER, et al., 2021. Assessment on the in-field lightpath QoT computation including connector loss uncertainties. *Journal of Optical Communications and Networking* [online]. **13**(2) [cit. 2022-04-13]. ISSN 1943-0620. Dostupné z: doi:10.1364/JOCN.402969
- [18] GROBE, Klaus a Michael EISELT, 2013. *Wavelength Division Multiplexing: A Practical Engineering Guide*. Hoboken (New Jersey): Wiley. ISBN 978-0-470-62302-2.
- [19] HEISMANN, F., 2006. Comparison study of the average transfer matrix of first- and second-order PMD. *Journal of Lightwave Technology* [online]. **24**(4), 1929-1936 [cit. 2022-04-14]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2006.871026
- [20] DUMENIL, Arnaud, Elie AWWAD a Cyril MEASSON, 2020. PDL in Optical Links: A Model Analysis and a Demonstration of a PDL-Resilient Modulation. *Journal of Lightwave Technology* [online]. **38**(18), 5017-5025 [cit. 2022-04-14]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2020.2998841
- [21] FRINS, E.M. a W. DULTZ. Rotation of the polarization plane in optical fibers. *Journal of Lightwave Technology* [online]. **15**(1), 144-147 [cit. 2022-04-14]. ISSN 07338724. Dostupné z: doi:10.1109/50.552122



- [22] IBRAGIMOV, Roman Z. a Vladimir G. FOKIN, 2018. Design of Long-Haul Coherent DWDM Optical Systems. In: *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)* [online]. IEEE, 2018, s. 1-3 [cit. 2022-04-14]. ISBN 978-1-5386-7054-5. Dostupné z: doi:10.1109/APEIE.2018.8545337
- [23] MOLISCH, Andreas F., 2011. *Wireless Communications*. 2nd edition. Chichester (West Sussex): Wiley. ISBN 978-0-470-74187-0.
- [24] GEORGE, Karim F., Taher M. BAZAN, Samy GHONIEMY a El-Sayed A. EL-BADAWY, 2009. Twelve-40 Gb/s WDM communication network with different modulation formats. In: *2009 6th International Symposium on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET)* [online]. IEEE, 2009, s. 184-188 [cit. 2022-04-14]. ISBN 978-1-4244-5992-6. Dostupné z: doi:10.1109/HONET.2009.5423075
- [25] I'm OOK. You're OOK?. *Maxim Integrated* [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/4/4439.html>
- [26] YAO, Shuchang, Songnian FU, Hantao WANG, Ming TANG, P. SHUM a Deming LIU, 2014. Performance Comparison for NRZ, RZ, and CSRZ Modulation Formats in RS-DBS Nyquist WDM System. *Journal of Optical Communications and Networking* [online]. 6(4) [cit. 2022-04-14]. ISSN 1943-0620. Dostupné z: doi:10.1364/JOCN.6.000355
- [27] WITZENS, Jeremy, 2018. High-Speed Silicon Photonics Modulators. *Proceedings of the IEEE* [online]. 106(12), 2158-2182 [cit. 2022-04-14]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2018.2877636
- [28] *Optsim: Application Notes and Examples* [online]. RSoft Design Group [cit. 2021-04-10].
- [29] DAI, Daoxin, 2018. Advanced Passive Silicon Photonic Devices With Asymmetric Waveguide Structures. *Proceedings of the IEEE* [online]. 106(12), 2117-2143 [cit. 2022-04-16]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2018.2822787
- [30] BERENBROCK, G.A. a B. SCHLEMMER, 1989. Active controlled fiber optical 90 degrees hybrid for coherent communications. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. 1(4), 86-87 [cit. 2022-04-16]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/68.87911
- [31] Balanced Photodetection. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/balanced\\_photodetection.html](https://www.rp-photonics.com/balanced_photodetection.html)
- [32] BENSLAMA, Malek, Achour BENSLAMA a Skander ARIS, 2017. *Quantum Communications in New Telecommunications Systems*. Hoboken (New Jersey): Wiley. ISBN 978-1-84821-990-8.

- [33] CHADHA, Devi, 2019. *Optical WDM Networks: From Static to Elastic Networks*. Hoboken (New Jersey): Wiley. ISBN 978-1-119-39326-9.
- [34] WDM-system. *Fiber Optic Network Products* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.fiberopticshare.com/multiplexing-and-demultiplexing-differences.html/wdm-system>
- [35] Overview of WDM and Its Advantages. *FOMSN* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.fiberlogs.fomsn.com/bemesspace/fiberoptics/overview-of-wdm-and-its-advantages/>
- [36] *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*, 2004. Geneva. ITU-T G.694.2. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2/en>
- [37] Types of Optical Fiber Dispersion and Compensation Strategies. *FS Community* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://community.fs.com/blog/types-of-optical-fiber-dispersion-and-compensation-strategies.html>
- [38] MONTHA, Pimchanok, Rachata MANEEKUT a Pasu KAEWPLUNG, 2014. The performance limitation of 10-Gbps-per-channel-based coarse wavelength division multiplexed passive optical network. In: *16th International Conference on Advanced Communication Technology* [online]. Global IT Research Institute (GIRI), 2014, s. 1089-1092 [cit. 2022-04-18]. ISBN 978-89-968650-3-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICACT.2014.6779127
- [39] *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, 2017. Geneva. ITU-T G.652. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en>
- [40] *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, 2021. Geneva. ITU-T G.694.1. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>
- [41] LUCKI, Michal. *Nové trendy v elektronických komunikacích Optické systémy a sítě* [online]. Praha [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/241/Cover.html>
- [42] YU, Jianjun a Xiang ZHOU, 2010. Ultra-High-Capacity DWDM transmission system for 100G and beyond. *IEEE Communications Magazine* [online]. **48**(3), S56-S64 [cit. 2022-04-19]. ISSN 0163-6804. Dostupné z: doi:10.1109/MCOM.2010.5434379
- [43] AGRAWAL, Govind, 2002. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3rd edition. Somerset (New Jersey): Wiley. ISBN 978-0-471-21571-4.
- [44] *Generic characteristics of optical amplifier devices and subsystems*, 2005. Geneva. ITU-T G.662. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.662/page.print>
- [45] ISHIMURA, Shota a Kosuke NISHIMURA, 2018. Decision-Directed Adaptive PDL-Compensation Algorithm for Stokes Vector Receivers. In: *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)* [online]. IEEE, 2018, s. 1-3 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-1-5386-4862-9. Dostupné z: doi:10.1109/ECOC.2018.8535119

- [46] HU, Bo-ning, WANG JING, WANG WEI a RUI-MEI ZHAO, 2010. Analysis on dispersion compensation with DCF based on Optisystem. In: *2010 2nd International Conference on Industrial and Information Systems* [online]. IEEE, 2010, s. 40-43 [cit. 2022-04-20]. ISBN 978-1-4244-7860-6. Dostupné z: doi:10.1109/INDUSIS.2010.5565685
- [47] ANI, Animesh Bala a Mohammad FAISAL, 2016. Ultra-flattened broadband dispersion compensating photonic crystal fiber with ultra-low confinement loss. In: *2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)* [online]. IEEE, 2016, s. 243-246 [cit. 2022-04-20]. ISBN 978-1-5090-2963-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICECE.2016.7853901
- [48] VYUKUSENGE, A. a J. RABENANDRASANA, 2020. Polarization Mode Dispersion Effects on Signal Quality and Compensation Methods. In: *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications* [online]. IEEE, 2020, s. 1-6 [cit. 2022-04-21]. ISBN 978-1-7281-4772-7. Dostupné z: doi:10.1109/IEEECONF48371.2020.9078548
- [49] XU, Hengying, Xiaoguang ZHANG, Xianfeng TANG, Chenglin BAI, Lixia XI, Wenbo ZHANG a Hongjun ZHENG, 2017. Joint Scheme of Dynamic Polarization Demultiplexing and PMD Compensation Up To Second Order for Flexible Receivers. *IEEE Photonics Journal* [online]. **9**(6), 1-15 [cit. 2022-04-21]. ISSN 1943-0655. Dostupné z: doi:10.1109/JPHOT.2017.2767032
- [50] RAGIKRISHNAN, L, G. JAYAKRISHNARAJ a N. VIJAYAKUMAR, 2016. Adaptive polarisation mode dispersion compensation using optical filter in high speed fiber-optic transmission systems. In: *2016 IEEE Annual India Conference (INDICON)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-5 [cit. 2022-04-22]. ISBN 978-1-5090-3646-2. Dostupné z: doi:10.1109/INDICON.2016.7839007
- [51] NAVERNUZZAMAN, Sk., Praniol Sen GUPTA, Apu DAS a Mohammad FAISAL, 2018. GeO<sub>2</sub> Doped Polarization Maintaining Fiber for Residual Dispersion Compensation. In: *2018 10th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)* [online]. IEEE, 2018, s. 469-472 [cit. 2022-04-22]. ISBN 978-1-5386-7482-6. Dostupné z: doi:10.1109/ICECE.2018.8636758
- [52] KHAN, Md Shahrukh Adnan, Md Masum HOWLADER, Muhammad Ahad Rahman MIAH, Sakhawat Hossen RAKIB, Abdullah Al AMIN a Sharsad KARAKUNI, 2017. Performance analysis of receiver power sensitivity of advanced modulation formats in WDM based standard mode fibre for next generation data rate. In: *2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)* [online]. IEEE, 2017, s. 395-399 [cit. 2022-04-15]. ISBN 978-1-5386-0869-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICAEE.2017.8255388
- [53] PRIYEASH, B. a N. SUBHASHINI, 2020. Performance of Hybrid PON Architecture using On-Off Keying and Differential Quadrature Phase Shift Keying. In: *2020 International Conference for Emerging Technology (INCET)* [online]. IEEE, 2020, s. 1-6 [cit. 2022-04-15]. ISBN 978-1-7281-6221-8. Dostupné z: doi:10.1109/INCET49848.2020.9153976

- [54] TAHER, Kazi Abu, Satya P. MAJUMDER a B. M. Azizur RAHMAN, 2014. Performance of different modulation formats in 40 Gb/s optical systems in the presence of polarization mode dispersion and nonlinear effects. In: *2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology* [online]. IEEE, 2014, s. 1-4 [cit. 2022-04-15]. ISBN 978-1-4799-4819-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICEEICT.2014.6919042
- [55] ZHANG, Jinnan, Xueguang YUAN, Mi LIN, Jinjing TAO, Yangan ZHANG, Ming ZHANG a Xiaoguang ZHANG, 2010. Stable 112-Gb/s POLMUX-DQPSK transmission with automatic polarization tracker. In: *2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks* [online]. IEEE, 2010, s. 1-4 [cit. 2022-04-24]. ISBN 978-1-4244-7799-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICTON.2010.5549083
- [56] BOFFI, P., M. FERRARIO, L. MARAZZI, P. MARTELLI, P. PAROLARI, A. RIGHETTI, R. SIANO a M. MARTINELLI, 2009. Stable 100-Gb/s POLMUX-DQPSK Transmission With Automatic Polarization Stabilization. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. **21**(11), 745-747 [cit. 2022-04-23]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/LPT.2009.2016758
- [57] SLEIFFER, V. A. J. M., M. S. ALFIAD, D. VAN DEN BORNE, S. L. JANSEN, M. KUSCHNEROV, S. ADHIKARI a H. DE WAARDT, 2010. A comparison of 43-Gb/s POLMUX-RZ-DPSK and POLMUX-RZ-DQPSK modulation for long-haul transmission systems. In: *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication* [online]. IEEE, 2010, s. 1-3 [cit. 2022-04-23]. ISBN 978-1-4244-8536-9. Dostupné z: doi:10.1109/ECOC.2010.5621432
- [58] CARENA, Andrea, Vittorio CURRI, Pierluigi POGGIOLINI, Gabriella BOSCO a Fabrizio FORGHIERI, 2010. Maximum Reach Versus Transmission Capacity for Terabit Superchannels Based on 27.75-GBaud PM-QPSK, PM-8QAM, or PM-16QAM. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. **22**(11), 829-831 [cit. 2022-04-23]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/LPT.2010.2045753
- [59] BOBROVS, Vjaceslavs, Sandis SPOLITIS a Girts IVANOVS, 2012. Comparison of chromatic dispersion compensation techniques for WDM-PON solution. In: *2012 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications* [online]. IEEE, 2012, s. 64-67 [cit. 2022-04-24]. ISBN 978-1-4673-1671-2. Dostupné z: doi:10.1109/BCFIC.2012.6217981
- [60] SRIVASTAVA, Mayank a Vinod KAPOOR, 2014. Analysis and compensation of self phase modulation in wavelength division multiplexing system. In: *2014 Students Conference on Engineering and Systems* [online]. IEEE, 2014, s. 1-4 [cit. 2022-04-28]. ISBN 978-1-4799-4939-7. Dostupné z: doi:10.1109/SCES.2014.6880074
- [61] SULTANA, Nasrin a M. S. ISLAM, 2013. The effects of cross-phase modulation and third order dispersion on pulses and pulse broadening factor in the WDM transmission system. In: *2013 2nd International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)* [online]. IEEE, 2013, s. 282-285 [cit. 2022-04-28]. ISBN 978-1-4799-2465-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICAEE.2013.6750348

- [62] FOO, Benjamin, Bill CORCORAN a Arthur LOWERY, 2015. Optoelectronic method for distributed compensation of XPM in long haul WDM systems. In: *Optical Fiber Communication Conference* [online]. Washington, D.C: OSA, 2015, Th2A.24- [cit. 2022-04-28]. ISBN 978-1-55752-937-4. Dostupné z: doi:10.1364/OFC.2015.Th2A.24
- [63] SHARMA, Himakshi a Er. Gian THAKUR, 2015. Stimulated Raman Scattering in Wavelength Division Multiplexing System: Analysis and Compensation. In: *2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology* [online]. IEEE, 2015, s. 450-453 [cit. 2022-04-29]. ISBN 978-1-4799-6023-1. Dostupné z: doi:10.1109/CICT.2015.77
- [64] RUZBARSKY, Jan, Jan TURAN a Lubos OVSENIK, 2016. Stimulated Brillouin scattering in DWDM all optical communication systems. In: *2016 26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)* [online]. IEEE, 2016, s. 395-398 [cit. 2022-04-29]. ISBN 978-1-5090-1674-7. Dostupné z: doi:10.1109/RADIOELEK.2016.7477354
- [65] SHARMA, Diksha a Mandeep KAUR, 2017. Study of FWM effects in WDM system: A review. In: *2017 4th International Conference on Opto-Electronics and Applied Optics (Optronix)* [online]. IEEE, 2017, s. 1-4 [cit. 2022-04-30]. ISBN 978-1-5386-1119-7. Dostupné z: doi:10.1109/OPTRONIX.2017.8349662
- [66] SUGUMARAN, S. a P. ARULMOZHIVARMAN, 2013. Effect of chromatic dispersion on four-wave mixing in WDM systems and its suppression. In: *2013 International Conference on Emerging Trends in VLSI, Embedded System, Nano Electronics and Telecommunication System (ICEVENT)* [online]. IEEE, 2013, s. 1-5 [cit. 2022-04-30]. ISBN 978-1-4673-5301-4. Dostupné z: doi:10.1109/ICEVENT.2013.6496567
- [67] OLONKINS, Sergejs, Igors STANKUNOVŠ, Dmitrijs PILATS a Vjaceslavs BOBROVS, 2017. Suppression of CC-FWM inter-channel crosstalk using unequal channel spacing in an 8-channel WDM transmission system with parametric amplification. In: *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)* [online]. IEEE, 2017, s. 1747-1752 [cit. 2022-04-30]. ISBN 978-1-5090-6269-0. Dostupné z: doi:10.1109/PIERS.2017.8262032
- [68] ABD, Haider. J., N.M. DIN, M. H. AL-MANSOORI, F. ABDULLAH a H. A. FADHIL, 2013. Mitigation of FWM crosstalk in WDM system using polarization interleaving technique. In: *2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP)* [online]. IEEE, 2013, s. 117-119 [cit. 2022-04-30]. ISBN 978-1-4673-6075-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICP.2013.6687086
- [69] Optsim: User Guide [online]. USA, 2008 [cit. 2022-05-02]. RSoft Design Group, Inc.
- [70] FREUDE, Wolfgang, Rene SCHMOGROW, Bernd NEBENDAHL, et al., 2012. Quality metrics for optical signals: Eye diagram, Q-factor, OSNR, EVM and BER. In: *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* [online]. IEEE, 2012, s. 1-4 [cit. 2022-05-04]. ISBN 978-1-4673-2229-4. Dostupné z: doi:10.1109/ICTON.2012.6254380

[71] *Test methods applicable to optical fibre submarine cable systems*, 2014. Geneva. ITU-T G.976.  
Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.976/en>

[72] SONG, Houbing, 2012. *Model-Centric Approach to Discrete-Time Signal Processing for Dense Wavelength-Division Multiplexing Systems* [online]. Daytona Beach (Florida) [cit. 2022-05-09].  
Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/229085615\\_Model-Centric\\_Approach\\_to\\_Discrete-Time\\_Signal\\_Processing\\_for\\_Dense\\_Wavelength-Division\\_Multiplexing\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/229085615_Model-Centric_Approach_to_Discrete-Time_Signal_Processing_for_Dense_Wavelength-Division_Multiplexing_Systems). Ph.D thesis. Embry-Riddle Aeronautical University.