

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Tomáš Chaloupka



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## SIMULACE VYSOKORYCHLOSTNÍCH OPTICKÝCH DATOVÝCH PŘENOSŮ

SIMULATION OF HIGH-SPEED OPTICAL DATA TRANSMISSIONS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Chaloupka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

BRNO 2019

# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Tomáš Chaloupka

**ID:** 144024

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Simulace vysokorychlostních optických datových přenosů

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce nastudujte a popište simulační nástroje OptSim a PHOTOS. Definujte jejich základní vlastnosti a jejich odlišnosti z pohledu využití pro simulace datových provozů v přístupových a metropolitních sítích. Výsledkem diplomové práce budou tři laboratorní úlohy s teoretickým rozбором problematiky, která umožní studentům danou problematiku pochopit z hlediska teoretických poznatků. Na základě teoretických poznatků budou studenti schopni vytvořit simulační model a vyhodnotit výsledky. Každá úloha bude realizována jak v prostředí OptSim, tak v prostředí PHOTOS. Student se zaměří na vytvoření úlohy pro přístupovou síť, xWDM síť a síť s pokročilým modulačním formátem (např. vysokorychlostní 100G koherentní přenos dat). Dosažené výsledky diskutujte. Laboratorní úlohy budou obsahovat samostatný úkol, který nebude v řešení popsán, čímž budou ověřeny znalosti studentů.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav a kol. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-29-5.

[2] BINH, Le Nguyen. Optical modulation: advanced techniques and applications in transmission systems and networks. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1498745239.

**Termín zadání:** 1.2.2019

**Termín odevzdání:** 16.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

**Konzultant:**

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

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se věnuje porovnání simulačních nástrojů OptSim™ a PHOTOSS, které jsou využívány pro simulace datových provozů v přístupových a metropolitních sítích. Výsledkem práce jsou tři laboratorní úlohy a jejich teoretické základny, které studentům umožní pochopit principy práce v jednotlivých simulačních prostředích.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Cvičení, OptSim™, PHOTOSS, PON, WDM, PM-QPSK

## **ABSTRACT**

The aim of this master thesis is comparison of simulation tools OptSim™ and PHOTOSS which are used to create simulations of data traffics in access and metropolitan networks. The outcome of this thesis is three laboratory exercises and their theoretical bases which should explain the way of working in different simulation environments to students.

## **KEYWORDS**

Exercises, OptSim™, PHOTOSS, PON, WDM, PM-QPSK

CHALOUPKA, Tomáš. *Simulace vysokorychlostních optických datových přenosů*. Brno, 2019, 92 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Simulace vysokorychlostních optických datových přenosů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomášovi Horváthovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora



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

## PODĚKOVÁNÍ

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

Brno .....

.....

podpis autora



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# Obsah

Úvod	13
<b>1 Úvod do problematiky optických přenosů</b>	<b>14</b>
1.1 Optický přenos	14
1.1.1 Optický systém	14
1.1.2 Druhy vysílačů	15
1.1.3 Druhy přijímačů (diod)	16
1.1.4 Druhy vláken	17
1.1.5 Vlivy ve vláknech	18
1.1.6 Kódování NRZ	19
1.1.7 Chybovost BER - bit error rate	20
1.1.8 Diagram oka	20
1.1.9 Modulační techniky	22
1.1.10 Technologie přenosu - WDM,TDM	27
1.2 AON, PON	29
1.2.1 AON - Aktivní optická síť	29
1.2.2 PON - Pasivní optická síť	30
1.2.3 Vývoj PON	30
1.2.4 GPON, GEPON	31
1.2.5 XG-PON	33
1.2.6 NG-PON2	33
1.3 Simulační nástroje pro optické sítě	37
1.3.1 OptSim™	37
1.3.2 PHOTOSS	40
<b>2 Vytvoření testovací topologie</b>	<b>44</b>
2.1 OptSim™	44
2.1.1 Délka 1 km	45
2.1.2 Délka 10 km	46
2.1.3 Maximální délky stanovených parametrů	47
2.2 PHOTOSS	48
2.2.1 Délka 1 km	50
2.2.2 Délka 10 km	50
2.2.3 Maximální délky stanovených parametrů	51

<b>3</b>	<b>Vyhodnocení výsledků testovací topologie</b>	<b>53</b>
3.1	OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	53
3.2	PHOTOSS . . . . .	53
3.3	Shrnutí . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Návrh laboratorních úloh</b>	<b>55</b>
4.1	Simulace přístupové sítě . . . . .	55
4.1.1	Zadání a realizace úlohy v programu OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	56
4.1.2	Výsledky OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	57
4.1.3	Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS . . . . .	58
4.1.4	Výsledky PHOTOSS . . . . .	59
4.1.5	Studentské rozšíření . . . . .	60
4.1.6	Závěr úlohy . . . . .	60
4.1.7	Otázky k úloze . . . . .	60
4.2	Simulace transportní sítě . . . . .	61
4.2.1	Zadání a realizace úlohy v programu OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	64
4.2.2	Výsledky OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	65
4.2.3	Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS . . . . .	67
4.2.4	Výsledky PHOTOSS . . . . .	68
4.2.5	Studentské rozšíření . . . . .	69
4.2.6	Závěr úlohy . . . . .	72
4.2.7	Otázky k úloze . . . . .	72
4.3	Simulace koherentního přenosu (PM-QPSK) . . . . .	73
4.3.1	Zadání a realizace úlohy v programu OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	75
4.3.2	Výsledky OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	77
4.3.3	Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS . . . . .	80
4.3.4	Výsledky PHOTOSS . . . . .	81
4.3.5	Závěr úlohy . . . . .	83
4.3.6	Otázky k úloze . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>84</b>
	<b>Literatura</b>	<b>85</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>88</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>91</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>92</b>

# Seznam obrázků

1.1	Schéma přenosu (Převzato a upraveno z [1]) . . . . .	14
1.2	Struktura DFB laseru (Převzato a upraveno z [2]) . . . . .	15
1.3	Výstup z laserů vlnové délky (Převzato a upraveno z [2]) . . . . .	16
1.4	Jádra optických vláken (Převzato a upraveno z [1]) . . . . .	17
1.5	Zkreslení signálu PMD (Převzato a upraveno z [5]) . . . . .	19
1.6	Druhy NRZ (Převzato a upraveno z [6]) . . . . .	19
1.7	Diagram oka (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	21
1.8	Diagram oka (Zdroj: Převzato a upraveno z [13]) . . . . .	22
1.9	QPSK demodulátor (Zdroj: Převzato a upraveno z [7]) . . . . .	23
1.10	PM-QPSK modulátor/vysílač (Zdroj: Převzato a upraveno z [11]) . . . . .	24
1.11	PM-QPSK přijímač (Zdroj: Převzato a upraveno z [11]) . . . . .	25
1.12	QAM modulátor (Zdroj: Převzato a upraveno z [12]) . . . . .	26
1.13	Průběhy signálů v modulátoru 1.12 (Zdroj: Převzato a upraveno z [12]) . . . . .	26
1.14	Vlnový multiplex (Převzato a upraveno z [14]) . . . . .	27
1.15	Pásma s vyznačením PON technologií (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	28
1.16	PON topologie (Vlastní zpracování dle [4, str. 52]) . . . . .	30
1.17	GTC rámeček GPON (Upraveno dle: [19, str. 29]) . . . . .	33
1.18	Základní topologie NG-PON2 (Upraveno dle: [20, str. 17]) . . . . .	34
1.19	Nové schéma (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	38
1.20	Tabulka voleb (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	39
1.21	Parametry simulace (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	39
1.22	Paleta v programu OptSim <sup>TM</sup> (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	40
1.23	Nové schéma s parametry simulace (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	42
1.24	Paleta v programu PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	43
2.1	Testovací topologie (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	44
2.2	Grafy pro topologií - začátek vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	45
2.3	Grafy pro topologií s 1 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	45
2.4	Grafy pro topologií s 10 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	46
2.5	Grafy pro topologií se 71 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	47
2.6	Testovací topologie v programu PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	48
2.7	Grafy pro topologii - začátek vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	49
2.8	Grafy pro topologii s 1 km vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	50
2.9	Grafy pro topologii s 10 km vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	51

2.10 Grafy pro topologií se 22 km vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	51
4.1 Topologie v úloze 1 . . . . .	56
4.2 Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	57
4.3 Výstupní signál oko a optické spektrum. (Zdroj: Vlastní zpracování) .	57
4.4 Topologie v programu PHOTOSS . . . . .	58
4.5 Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	59
4.6 Výstupní signál oko a spektrum. (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	59
4.7 Vlnový multiplex (Převzato a upraveno z [14]) . . . . .	61
4.8 Pásma s vyznačením PON technologií (Zdroj: Vlastní zpracování) . .	62
4.9 Topologie v úloze 2 . . . . .	64
4.10 Signálové porovnání na začátku a konci trasy pro frekvenci 193,2 THz (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	65
4.11 Vstupní a výstupní optické spektrum kanálu 193.1 THz (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	65
4.12 Vstupní a výstupní optické spektrum kanálu 193.2 THz (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	66
4.13 Vstupní a výstupní oko (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	66
4.14 PHOTOSS topologie v úloze 2 . . . . .	67
4.15 Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	68
4.16 Výstupní spektrum přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	68
4.17 Spektrum na konci vlákna a diagram oka na konci přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	69
4.18 Topologie v úloze 2 – studentské rozšíření OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	70
4.19 Výstupní optické spektrum WDM OptSim <sup>TM</sup> (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	70
4.20 Topologie v úloze 2 - studentské rozšíření PHOTOSS . . . . .	71
4.21 Výstupní optické spektrum (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	72
4.22 PM-QPSK modulátor/vysílač (Zdroj: Převzato a upraveno z [11]) . .	73
4.23 PM-QPSK přijímač (Zdroj: Převzato a upraveno z [11]) . . . . .	74
4.24 PM-QPSK modulátor OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	75
4.25 PM-QPSK demodulátor/přijímač OptSim <sup>TM</sup> . . . . .	76
4.26 Výstup z modulátorů zobrazení na osciloskopu (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	77
4.27 Výstup z modulátorů zobrazení diagram oka na výstupu z přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	77

4.28	Spektrum a výkon na vstupu do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování) .	78
4.29	Konstelační diagramy na výstupu z vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	78
4.30	Spektrum a diagram oka na straně přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)	79
4.31	PHOTOSS topologie v úloze 3 . . . . .	80
4.32	Výstup z modulátorů zobrazení na osciloskopu (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	81
4.33	Výstup z modulátorů zobrazení diagram oka před vstupem do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	81
4.34	Konstelační diagramy na vstupu do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	82
4.35	Spektrum na konci vlákna a diagram oka na konci přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	82

# Seznam tabulek

1.1	Tabulka chybovosti v čase (Zdroj: Vlastní zpracování) . . . . .	20
1.2	Tabulka kapacit modulačních formátů (Zdroj: [10]). . . . .	23
1.3	Tabulka PON specifikací (Převzato a upraveno z [18]) . . . . .	31
1.4	Tabulka útlumových tříd NG-PON2 . . . . .	35
1.5	Parametry vysílače a přijímače definované v sestupném směru . . . .	36
4.1	Tabulka útlumových tříd NG-PON2 . . . . .	63
4.2	Parametry vysílače a přijímače definované v sestupném směru . . . .	63

# Úvod

Optický přenos je dnes nejoblíbenějším typem přenosu v produkčním prostředí hlavně kvůli malému útlumu, nízké zaručitelnosti, vysoké škálovatelnosti, a tím i možnosti zvyšovat přenosové rychlosti.

Hlavním cílem této diplomové práce je vytvoření laboratorních úloh v programech pro simulace optických systémů OptSim<sup>TM</sup> a PHOTOSS. Tyto úlohy mají umožnit studentům pochopit problematiku přenosu dat v lokálních a metropolitních sítích. Pro splnění tohoto cíle je nutno vytvořit vlastní návrh přístupové sítě, vytvořit simulace v jednotlivých programech a následně porovnat rozdíly ve vytvořených simulacích.

První kapitola je úvodem do problematiky optického přenosu a základních parametrů, s kterými je možno se při stavbě optické trasy v simulačních programech setkat. Je zde vysvětlen princip optického systému, rozdíly vysílačů a přijímačů, druhy vláken a vlivy, které se mohou ve vláknech vyskytnout.

Druhá kapitola obsahuje návrh testovací topologie s přednastavenými parametry pro každý simulační program.

Ve třetí kapitole se nachází výsledky proběhlých simulací programů OptSim<sup>TM</sup> a PHOTOSS a jejich vzájemné porovnání.

Čtvrtá kapitola je věnována návrhu laboratorních úloh, ve kterých mají studenti vyzkoušet použití simulačních programů na třech simulačních úlohách. V první úloze se studenti naučí orientovat v aplikačním prostředí za pomoci předem navržené jednoduché topologie, kterou studenti v programu vytvoří. Druhá úloha je rozšířením té první, protože studenti budou mít za úkol převést již vytvořenou topologii do WDM topologie a ve třetí úloze se studenti seznámí s fungováním PM-QPSK modulace.

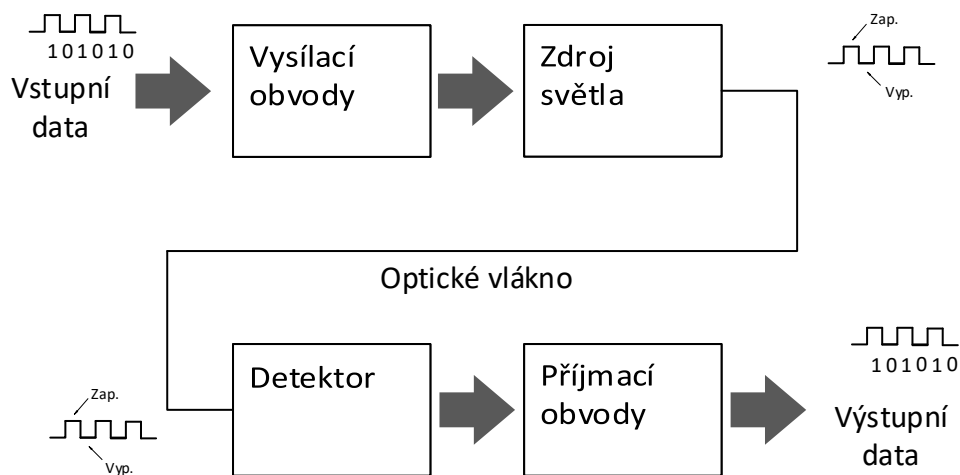
# 1 Úvod do problematiky optických přenosů

## 1.1 Optický přenos

V současné době je optický přenos stále častěji využíván pro přenos dat. Stává se nástupcem metalických vedení kvůli jeho účinnosti a vysoké přenosové kapacitě. Je trendem, že optické kabely nahrazují tradiční měděné kroucené dvojlinky nebo koaxiální kabely. Vzhledem k poptávce po větší šířce pásma a rychlosti není pochyb o tom, že přenos skrze optická vlákna přinese více příležitostí a bude průběžně zkoumán a rozšířen tak, aby vyhovoval i budoucím požadavkům.

### 1.1.1 Optický systém

Optický komunikační systém většinou obsahuje tři hlavní komponenty: optický vysílač, vlákno pro přenos optického signálu a optický přijímač. Optický vysílač převádí elektrický signál na optický. Ten je vyslán po vlákne do přijímače, který překonvertuje optický signál na elektrický. Nejběžnější vysílače jsou LED nebo LD (laserové diody). Optická vlákna jsou použita jako médium pro telekomunikace kvůli jejich schopnosti vést signál na dlouhé vzdálenosti. Optický přijímač je tvořen optickým detektorem (fotodioda, fototranzistor), který za použití fotoelektrického jevu převádí světelný signál na elektrický.



Obr. 1.1: Schéma přenosu (Převzato a upraveno z [1])

## 1.1.2 Druhy vysílačů

Optické vysílače jsou základem optického přenosu. Dělíme je na skupiny dle vysílaného optického signálu:

- nekoherentní – LED diody malé frekvence (cca do 100 Hz),
- koherentní – lasery, velký výkon, stabilita svazku.

Diody LED jsou vhodné na kratší přenosy. Jejich výhodou je nenáročnost, dostupnost a lehká modulovatelnost. Jejich hlavní nevýhodou je malá frekvence a malý výkon. Jsou vhodné na kratší přenosy.

### Lasery

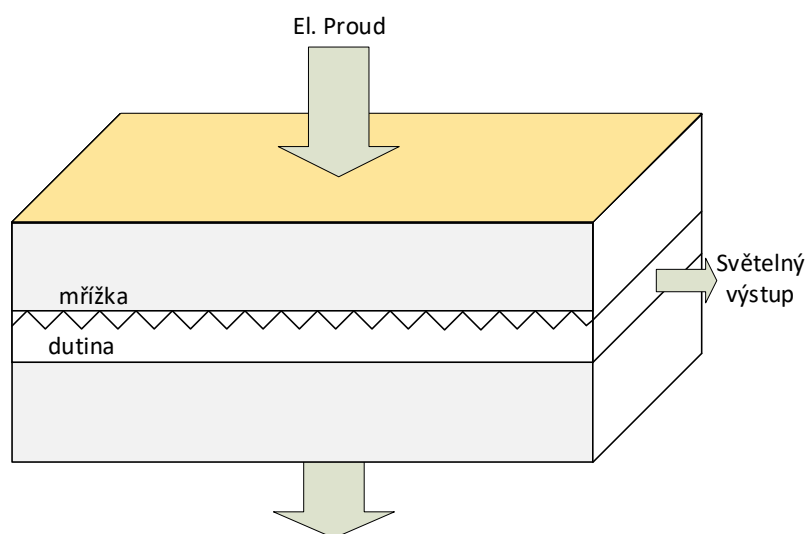
Lasery jsou vhodné na dlouhé vzdálenosti, protože mají stabilní frekvenci vyzařovaného světla. Za největší nevýhodu se považuje nutnost proudové a teplotní stability. V případě jakýchkoliv změn je nutno změnit parametry.

Lasery dělíme dle typu struktury:

- DFB – (distributed feedback laser) laser s rozprostřenou zpětnou vazbou,
- FP – Fabryův-Perotův laser.

### DFB laser

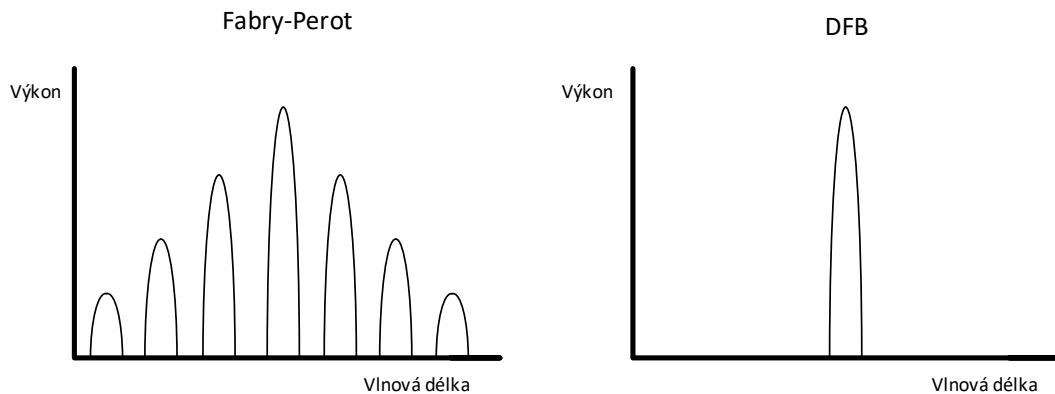
Jedná se o laser s rozprostřenou zpětnou vazbou, který vysílá výhradně jednu vlnovou délku díky vnitřnímu uspořádání laseru. Jeho struktura je kompozicí materiálů. V dutině se nachází materiálové zdrsnění – Braggova mřížka, která tvoří povrch s určitým indexem lomu. Díky tomuto uspořádání se vedlejší vlnové délky odráží zpět do dutiny. Hlavní vysílací vlnová délka je distribuována dutinou a je vyzařována z laseru. Způsob vyzařování je znázorněn na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Struktura DFB laseru (Převzato a upraveno z [2])

## FP - Fabryův-Perotův laser

Ze standardních laserů Fabry-Perotova typu nevychází jen jedna vlnová délka, ale i několik dalších, které jsou přibližné vlnové délce, která je požadována. Tyto podružné vlnové délky mají však nižší výkon. FP lasery jsou nevhodné pro WDM z důvodu možné interference těchto podružných vlnových délek.



Obr. 1.3: Výstup z laserů vlnové délky (Převzato a upraveno z [2])

## CW laser

Je laser emitující nepřetržitý laserový paprsek s regulovaným tepelným výstupem a intenzitou. Jejich hlavní výhodou je vysoký výkon a vysoká stabilita. Dále v simulacích byl použit laser s lorentzovskou vyzařovací charakteristikou.

### 1.1.3 Druhy přijímačů (diod)

#### PN

Je dioda s klasickým PN přechodem. V materiálu přechodu se tvoří pár elektron-díra a generuje se při dopadu fotonu na polovodič. Při absenci světla se chová jako dioda. Vlivem fotoelektrického jevu narůstá průchod elektrického proudu v závěrném směru.

#### PIN

Je dioda s přechodem P, I, N kde I je nedopovaná oblast mezi P a N. Tyto diody mají výhodu oproti klasickým diodám v tom, že nejsou limitovány kapacitou přechodu. Mohou tak dosáhnout vysoké citlivosti a rychlosti přechodu mezi propustným a závěrným stavem.

## APD - Lavinové fotodiody

Principem funkce je, že dopadem fotonu na materiál se generuje kaskádovitý efekt pohybujících se párů nosičů, který generuje větší citlivost než PIN diody. Bohužel při porovnání s PIN diodou generují kvůli lavinovému efektu větší šum [3].

### 1.1.4 Druhy vláken

#### SMF - jednovidové vlákno

Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, dle doporučení ITU-T G.652 by mělo mít následující parametry:

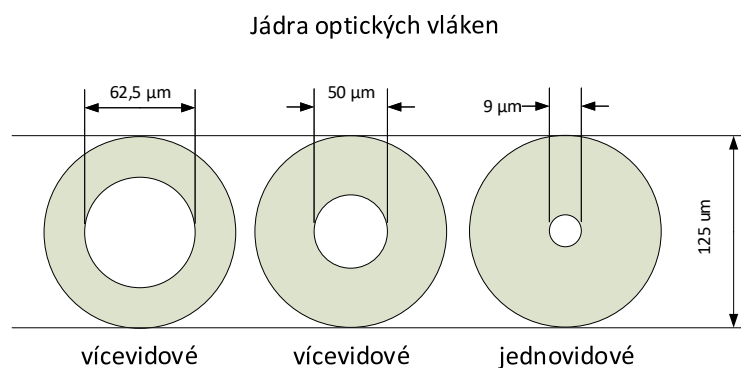
- jádro :  $9 \mu\text{m}$ , plášť  $125 \mu\text{m}$ ,
- maximální útlum při  $1310 \text{ nm}$   $0,4 \text{ dB/km}$ , při  $1550 \text{ nm}$   $0,35 \text{ dB/km}$ , při  $1625 \text{ nm}$   $0,4 \text{ dB/km}$ ,
- maximální polarizační vidovou disperzi  $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

Jednovidové vlákno je vhodnější na delší vzdálenosti kvůli velkému úhlu odrazu a malé vidové disperzi.

#### MMF - vícevidové vlákno

Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, dle doporučení ITU-T G.651.1 by mělo mít následující parametry:

- jádro :  $50 \pm 3 \mu\text{m}$ , plášť  $125 \pm 2 \mu\text{m}$ ,
- maximální útlum při  $850 \text{ nm}$   $3,5 \text{ dB/km}$ , při  $1300 \text{ nm}$   $1 \text{ dB/km}$ .



Obr. 1.4: Jádra optických vláken (Převzato a upraveno z [1])

Nevýhodou je velká vidová disperze. Kvůli tomu je lepší tato vlákna použít na menší vzdálenosti. Alternativou jsou vlákna gradientní, které zmenšují index lomu se zvětšující se vzdáleností od středu vlákna. Výhodou je eliminace vidové disperze.

### 1.1.5 Vlivy ve vláknech

Jednou z negativních vlastností vláken jsou útlumy. Ty se dělí na:

- ztráty absorpcí prostředí,
- vyzařováním z vlákna,
- rozptylem na nehomogenitách.

Při výrobě vláken je důležitá co nejvyšší homogenita vlákna a o absence příměsí iontů kovů jako třeba Fe, Cu, Cr. Tyto příměsi způsobují rozptylové ztráty, které jsou nazývány Rayleighovy. Rayleighovy rozptyly jsou nepřímo úměrné čtvrté mocnině vlnové délky sířícího se záření a rostou velmi rychle směrem k UV oblasti [4, str. 16–17].

#### Chromatická disperze

Chromatická disperze je druhem zkreslení procházejícího impulsu optickým vláknem a vzniká při přenosu více vlnových délek. Jeho projevem je spoždění signálu dané vlnové délky. Impulz se průchodem deformuje a následně pak zasahuje do jiných vlnových délek.

Ideální je použití vlákna pro vlnovou délku, kde se hodnota chromatické disperze blíží nebo je rovna nule. Ovšem chromatickou disperzi je možné kompenzovat u starších vláken například pasivní optickou kompenzací, ke které se používají starší kompenzační vlákna.

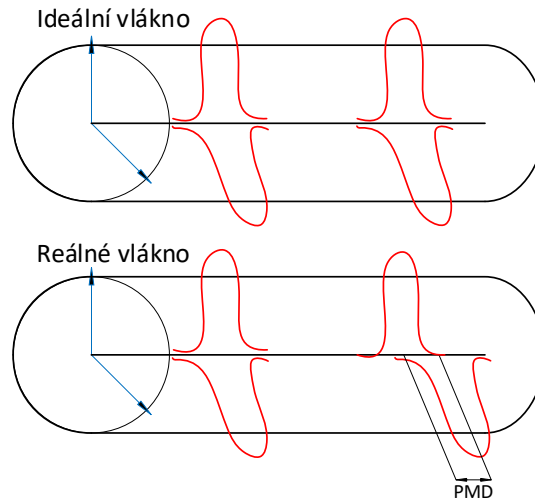
#### Polarizační disperze

*„Polarizační vidová disperze (PMD) spočívá v tom, že optické vlákno není ideálně kruhové a homogenní. Světlo se ve vlákně šíří ve dvou navzájem kolmých rovinách, tzv. polarizačních videch. Vlivem dvojlomu se ovšem záření šíří v obou těchto videch různou rychlostí.“ [5]*

Jak se paprsky ve vlákně rozcházejí vůči ideálnímu vlákně je zobrazeno na obrázku 1.5. Celková hodnota polarizační disperze se vyjadřuje v jednotce ps. Vzniká mechanickým namáháním optického vlákna a deformací optického jádra. Koeficient polarizační disperze je vyjádřen jednotkou  $ps \times \sqrt{km}$ . Celkové spoždění ve vzdálenosti není tedy lineární.

Ve vysokorychlostních systémech a na dálkových přenosech ovšem tento jev významně degraduje výkon systému. Omezení hodnot polarizační vidové disperze

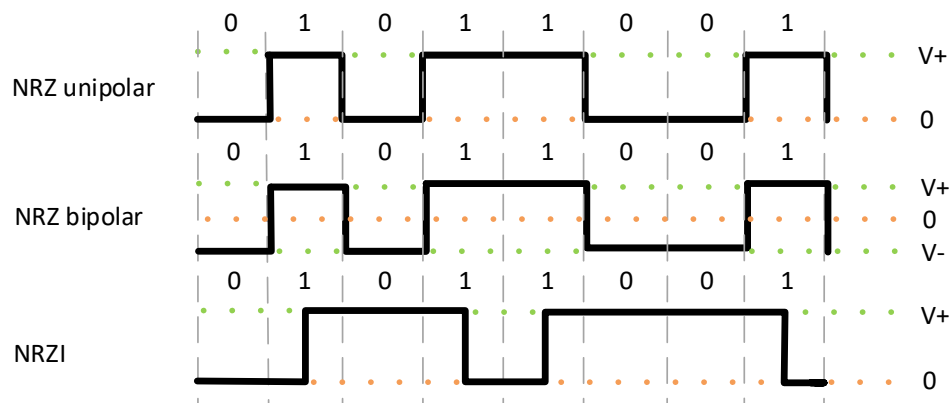
je možné pouze výběrem špatných vláken z kabelu nebo výměnou části trasy, ve které se nesplňují požadované hodnoty. Na obrázku 1.5 je možné vidět zpoždění signálu, které polarizační disperze vyvolá.



Obr. 1.5: Zkreslení signálu PMD (Převzato a upraveno z [5])

### 1.1.6 Kódování NRZ

NRZ je linkový kód, tyto kódy se užívají k reprezentaci digitálního signálu při přenosu přes médium. NRZ je kódem Non-Return-to-Zero a reprezentuje logickou '0' a '1' stejnými signály. Unipolární NRZ má například +5 Voltů jako logickou '1' a 0 Voltů jako logickou '0'. V obrázku 1.6 je vyjádření nejzákladnějších NRZ signálů.



Obr. 1.6: Druhy NRZ (Převzato a upraveno z [6])

### 1.1.7 Chybovost BER - bit error rate

BER definuje chybovost při přenosu a je vyjádřena jako poměr mezi počtem chyb z celkového počtu bitů v přenosu. Je tedy vyjádřena jako [7]:

$$BER = \frac{N_e}{N_c} [-] \quad (1.1)$$

kde  $N_e$  je rovno počtu chybných bitů a  $N_c$  celkovému počtu bitů v přenosu.

BER je bezrozměrná veličina. Bitová chybovost může být alternativně vyjádřena v čase. Celkový počet bitů v přenosu lze vyjádřit vynásobením přenosové rychlosti časem. Při předpokladu chybovosti BER  $10^{-12}$  po dosazení do vzorce 1.2 vyjde, že to je jeden bit ze  $10^{-12}$  bitů. Pro lepší názornost byla připravena tabulka 1.1 s rychlostmi 0,1,1,10,40 a 100 Gbit/s.

Po dosazení do vzorce:

$$BER = \frac{N_e}{V_p \cdot t} [-] \quad (1.2)$$

kde  $V_p$  je přenosová rychlost, zjistíme  $t$ , neboli čas ve kterém se vyskytne jeden chybný bit. Proto je třeba dbát na velmi nízkou chybovost při vyšších přenosových rychlostech.  $N_e = 1$ ,  $BER = 10^{-6}$ ,  $V_p = 0,1 \cdot 10^{-9}$ .

Tab. 1.1: Tabulka chybovosti v čase (Zdroj: Vlastní zpracování)

Přenosová rychlost [Gbit/s]	Bitová chybovost [-]		
	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$
<b>0,1</b>	1 s	1000 s	277,78 dní
<b>1</b>	1 ms	1s	1000 s
<b>10</b>	100 $\mu$ s	100 ms	100 s
<b>40</b>	25 $\mu$ s	25 ms	25 s
<b>100</b>	10 $\mu$ s	10 ms	10 s

Ke zlepšení přenosových vlastností a snížení BER lze „použít kódování s dopředným potlačením chyb (FEC), jeho principem je přidání redundantních bajtů do sledu vysílaných dat, což umožní detekci a opravu určitého počtu chyb v přijímači. Redundantní bajty tvoří pouze zlomek vysílaných dat.“ [7, str. 85]

### 1.1.8 Diagram oka

Diagram oka je grafické zobrazení pro analýzu kvality signálu při přenosu. Základní parametry, které se u diagramu určují je otevření oka a šířka oka. Z diagramu je možné vyčíst chybovost BER, mezisymbolovou interferenci, jitter a další rušivé vlivy na signál.

## Q faktor

V diagramu oka Q faktor určuje kvalitu a značí optimální rozhodovací úroveň. Dále z něj lze vypočítat bitovou chybovost přenosu přes médium.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) [-] \quad (1.3)$$

Vzorec 1.3 byl převzat z [8]. Kde Q je Q faktor a erf je Gaussova chybová funkce, erfc je doplňková chybová funkce .

Z Q faktoru je dále možné zjistit i hodnotu SNR optického signálu. Q faktor je rozdílem mezi průměrnými hodnotami úrovní signálů pro hodnoty logické '1' a '0' (ve vzorci vyjádřeno jako  $\mu_0$  a  $\mu_1$ ) a poděleno součtem hodnot šumu. Vlastní Q faktor lze vyjádřit vztahem [9]:

$$Q = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma_0 + \sigma_1} [-] \quad (1.4)$$

Kde:

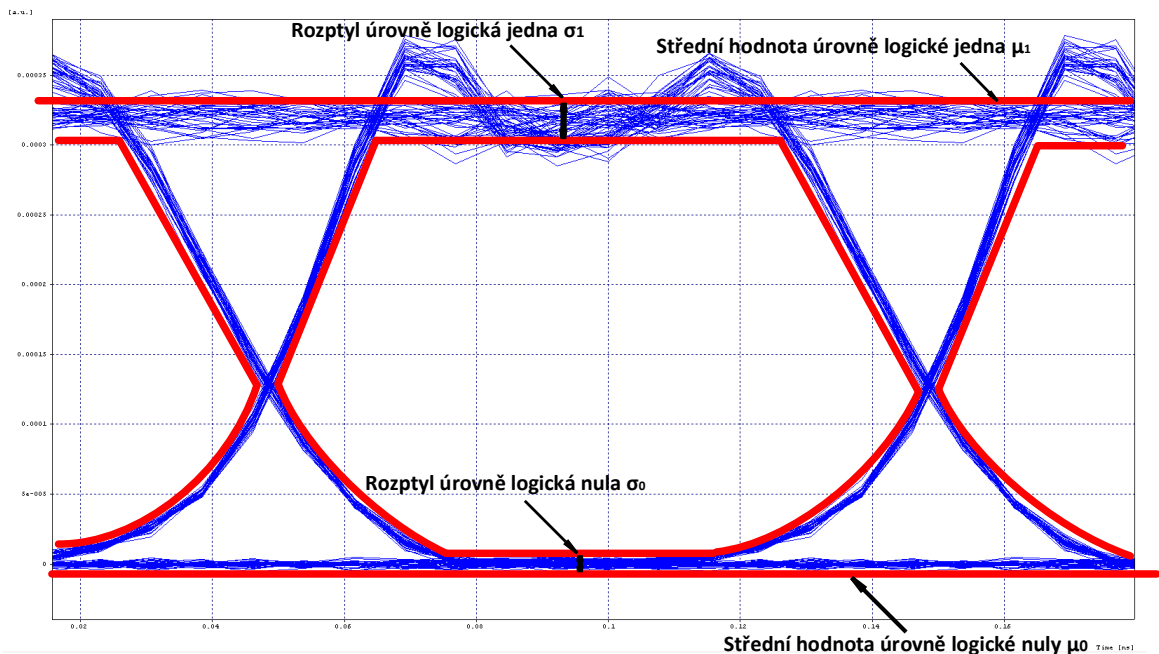
$\mu_0$  – střední hodnota úrovně logické nuly,

$\mu_1$  – střední hodnota úrovně logické jedna,

$\sigma_0$  – rozptyl hodnot úrovně logická nula,

$\sigma_1$  – rozptyl hodnot úrovně logická jedna.

Detailně zobrazuje obrázek 1.7:



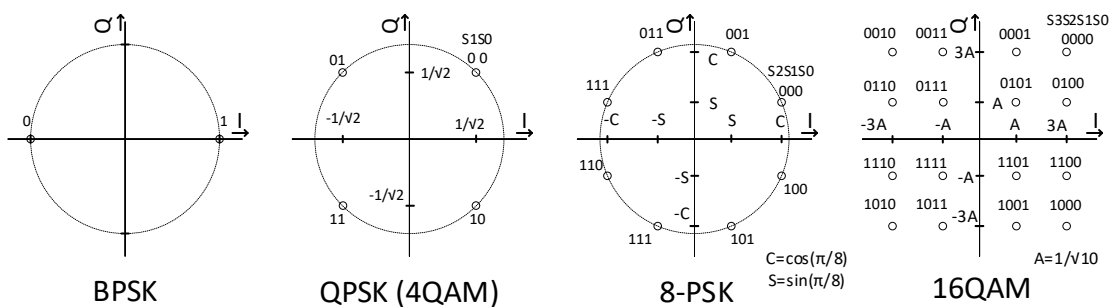
Obr. 1.7: Diagram oka (Zdroj: Vlastní zpracování)

## 1.1.9 Modulační techniky

### PSK - Moderní systémy klíčování

Snaha o efektivnější využití komunikačních kanálů vede k vytváření nových, stále více složitějších, modulačních systémů a kódování. Aby bylo možné posoudit, který ze systémů je pro daný účel nejvhodnější, jsou zavedeny parametry, které charakterizují jejich vlastnosti. Zvláště v posledních letech je možné zřetelně sledovat neustále se zvyšující požadavky zákazníků telekomunikačních společností na poskytované přenosové rychlosti. Při dané šířce kmitočtového pásma propustnosti  $B$  nelze příliš zvětšovat přenosovou rychlost nad hranici, která je číselně rovna  $B$ , pouhým zkracování doby trvání signálových prvků. Řešení tohoto problému spočívá v použití vícestavového klíčování, kdy jednomu prvku signálu odpovídá sekvence několika bitů. Bohužel rozpoznání přijatých prvků nám komplikuje aditivní šum, což limituje počet stavů signálů [7, str. 55].

Konstelační diagramy v obrázku 1.8:



Obr. 1.8: Diagram oka (Zdroj: Převzato a upraveno z [13])

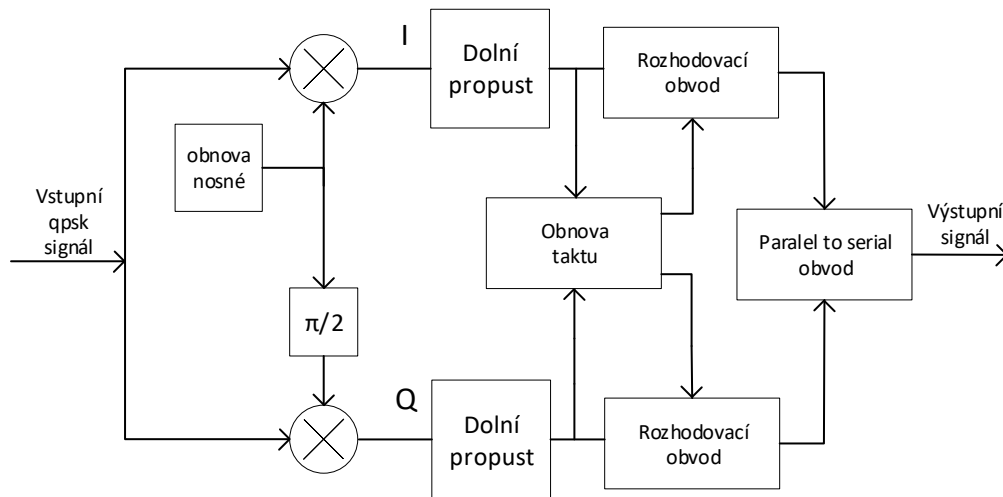
**BPSK** (Binary Phase Shift Keying) fázové klíčování je dvojestavová modulace, kde kmitočet nosné skokově mění fázi, která nabývá hodnot  $0^\circ$  nebo  $180^\circ$ . Modulační rychlost je rovna jednomu symbolu na bit a jeho přenosová rychlost je rovna modulační rychlosti. Výhodou BPSK modulace je vyšší odolnost proti rušení.

**QPSK** (Quadrature Phase Shift Keying) používá čtyři signálové prvky vyjádřené nosnou vlnou s odlišnou počáteční fází. Každému signálovému prvku odpovídá jedna bitová dvojice tj. dibit. Konstelační diagram má různou konfiguraci, sousední fáze signálových prvků se však vždy liší o  $\pi/2 \text{ rad}$  [7, str. 55].

V rámci přenosu symbolu se přenáší 2 bity.

Schéma modulátoru je shodné jako QAM modulátoru znázorněném na obrázku 1.12. Pouze pro QPSK se kódér chová jako rozbočovač signálu.

Demodulátor je založen na dvojici součinných demodulátorů, které přijímaný signál násobí jednak se synfází nosnou  $2\cos(\omega_c t)$  a jednak s kvadrurní nosnou  $2\sin(\omega_c t)$ . Dolními propustmi jsou pak z výsledných signálů v obou větvích odstraněny vyšší harmonické složky a následně jsou v rozhodovacích obvodech paralelně vyhodnoceny jednotlivé bity. Ty se potom pomocí P/S převodníku seřadí za sebou (sériově) [7, str. 59]. Schéma demodulátoru QPSK je na obrázku 1.9:



Obr. 1.9: QPSK demodulátor (Zdroj: Převzato a upraveno z [7])

Na základě znalosti doby trvání symbolu a požadavku na šířku pásma může být odvozena kapacita v bitech za sekundu na Hz pro různá modulační schémata. Tyto údaje sumarizuje tabulka 1.2.

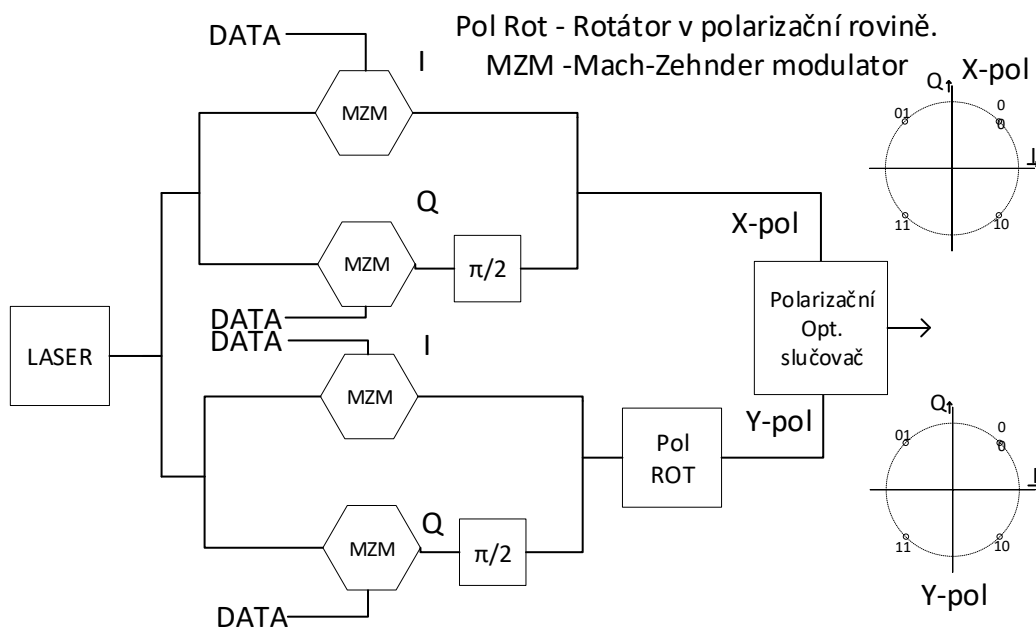
Tab. 1.2: Tabulka kapacit modulačních formátů (Zdroj: [10]).

Modulační schéma	Doba symbolu	Bit rate bit/s	Šířka pásma	Kapacita bit/s/Hz
BPSK	T	1/T	1/T	1
QPSK	T	2/T	0,5T	2
4-QAM	T	2/T	1/T	2
16-QAM	T	4/T	1/T	4
64-QAM	T	6/T	1/T	6

## PM-QPSK

Z anglického názvu Polarization multiplexed - Quadrature Phase-Shift Keying. Někdy označována jako DP-QPSK (dual polarization). Jak název vyjadřuje jde o modulaci QPSK obohacenou o další polarizační rozměr ve vlákně. PM-QPSK je rozšířený koherentní způsob modulace, která pro svoji funkci na přijmači vyžaduje znalost fáze vysílaného signálu.

Modulátor PM-QPSK je složen ze dvou QPSK modulátorů. Výstupy z těchto modulátorů prochází polarizačním slučovačem dvou signálů (Ve schématu 1.10 rozděleno na optický slučovač a ve větvi Y-polarizace jako rotátor polarizace).



Obr. 1.10: PM-QPSK modulátor/vysílač (Zdroj: Převzato a upraveno z [11])

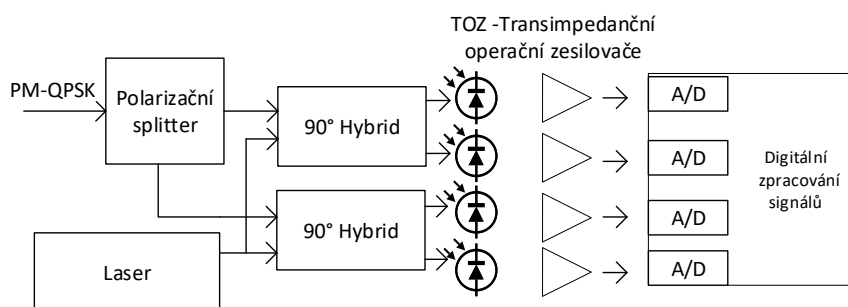
Obrázek 1.11 znázorňuje funkční blokové schéma moderního optického koherentního přijímače. Příchozí optický signál prochází polarizačním rozbočovačem (polarizačním splitter), který rozdělí signál na dva ortogonální polarizační signály. Tento rozdělovač vytvoří dva signály, z nichž je jeden polarizovaný v ose X a druhý v ose Y. Každý z nich je předán do 90-ti stupňového optického hybridního obvodu. Tento obvod umožňuje, aby složky I a Q fáze signálu byly extrahovány v důsledku známého signálu generovaného lokálním oscilátorem. Tento proces extrakce umožňuje lokální oscilátorový laser, který je podstatou koherentní detekce. Fázové signály se nyní převedou z optické domény na elektronickou doménu pomocí série vyvážených

fotodetektorů.

Každý z těchto signálů se skládá ze tří prvků:

- úroveň šumu,
- element digitálního převodníku představující výkon lokálního oscilátoru,
- koherentní signál.

Pokud by byl použit jediný fotodetektor, bylo by nutné použít lokální oscilátorový laser o 20 až 25 decibelů (dB) větší výkon než přichází signál, aby výsledný signál mohl dominovat oproti generovanému šumu. Pomocí vyváženého fotodetektoru je možné použít mnohem méně výkonný lokální oscilátor. Za účelem obnovy přenášených bitů se provádí synchronizace nosné fáze v bloku zpracování signálu [11].



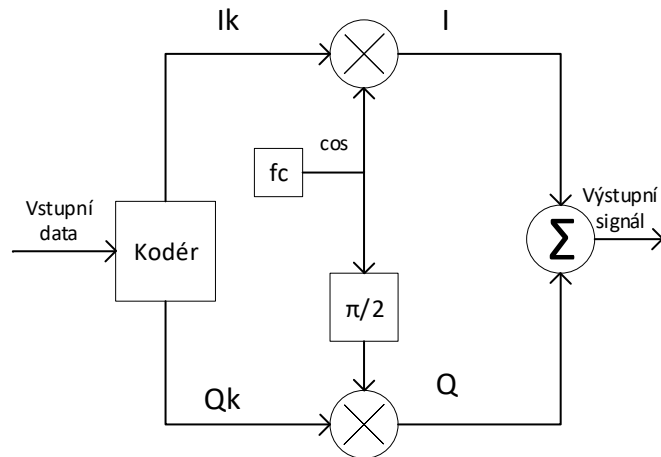
Obr. 1.11: PM-QPSK přijímač (Zdroj: Převezato a upraveno z [11])

Kromě obrovského zvýšení citlivosti detektoru může být koherentní detektor laděn tak, aby přijímal pouze určitou vlnovou délku, což umožňuje vysokou úroveň selekce signálu z kanálů WDM.

### QAM - z angl. Quadrature Amplitude Modulation

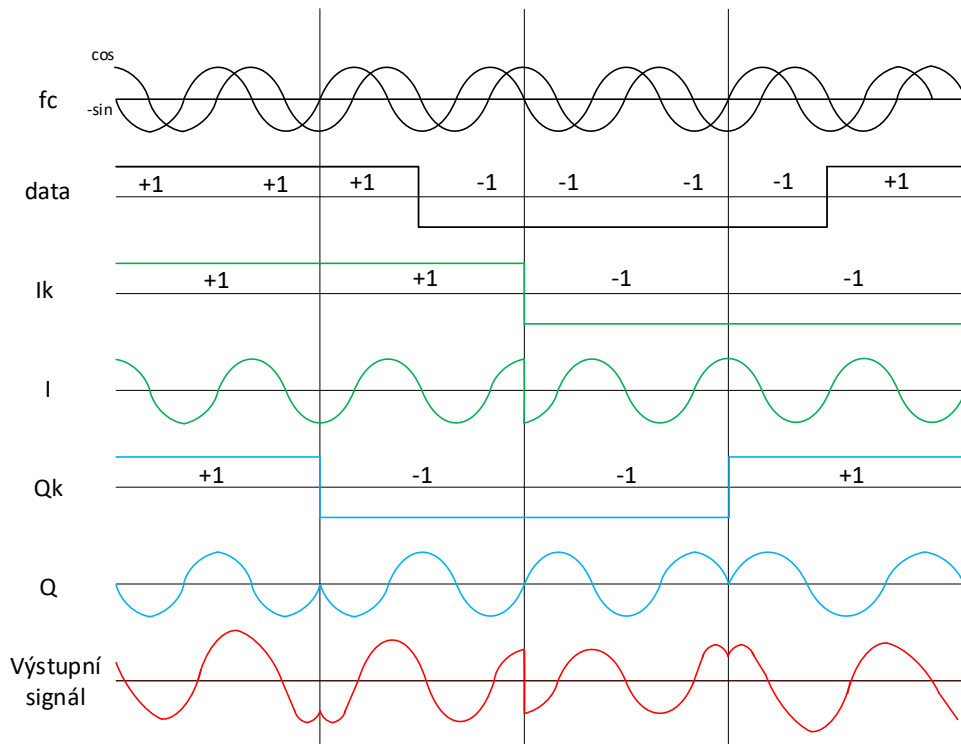
Využívá jak amplitudové, tak i fázové komponenty, aby poskytly formu modulace, která je schopna zajistit vysokou úroveň účinnosti využití spektra. QAM, kvadrurní amplitudová modulace byla použita pro některé analogové vysílání, včetně AM stereo přenosů, ale do širšího použití se dostala v datových aplikacích. Je schopna poskytnout vysoce efektivní formu modulace dat a jako takový je používán ve všem, od mobilních telefonů po Wi-Fi a téměř všechny ostatní formy vysokorychlostního datového komunikačního systému. QAM je signál, ve kterém jsou dva nosiče posunuty ve fázi o 90 stupňů (tj. sinus a kosinus) jsou modulovány a kombinovány. V důsledku jejich fázového rozdílu 90° jsou v kvadraci, a to vede k názvu kvadrurní modulace. Často se jeden signál nazývá signál In-phase „I“ a druhý signál je kvadrurní „Q“.

Výsledný celkový signál sestávající z kombinace nosičů I a Q obsahuje jak amplitudovou, tak fázovou variaci. Vzhledem k tomu, že jsou přítomné oba amplitudové a fázové změny, může být také považována za směs amplitudové a fázové modulace. QAM umístí dva nezávislé nosné signály potlačené dvojitým postranním pásmem ve stejném spektru jako jeden běžný nosný signál s dvojitým postranním pásmem. Schéma modulátoru QAM je zobrazeno na obrázku 1.12:



Obr. 1.12: QAM modulátor (Zdroj: Převezato a upraveno z [12])

Průběhy signálu 1.13:

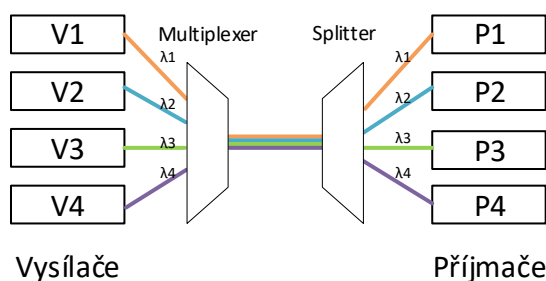


Obr. 1.13: Průběhy signálů v modulátoru 1.12 (Zdroj: Převezato a upraveno z [12])

## 1.1.10 Technologie přenosu - WDM,TDM

### WDM

Z anglického Wavelength-division multiplexing je vlnový multiplex, který představuje technologii spojování signálů pomocí vlnových délek. Ty mohou souběžně probíhat optickým vláknem, aniž by se ovlivňovaly. Jedná se tedy o frekvenční multiplex. Na začátku trasy se nachází multiplexor, který má za úkol navázat tyto vlnové délky do společného média – vlákna. Na konci se nachází demultiplexor, který vlnové délky rozděluje ke klientům. WDM pracuje jak na jednovidovém tak na vícevidovém vlákně. Počet vlnových délek je škálovatelný.



Obr. 1.14: Vlnový multiplex (Převzato a upraveno z [14])

### WWDM

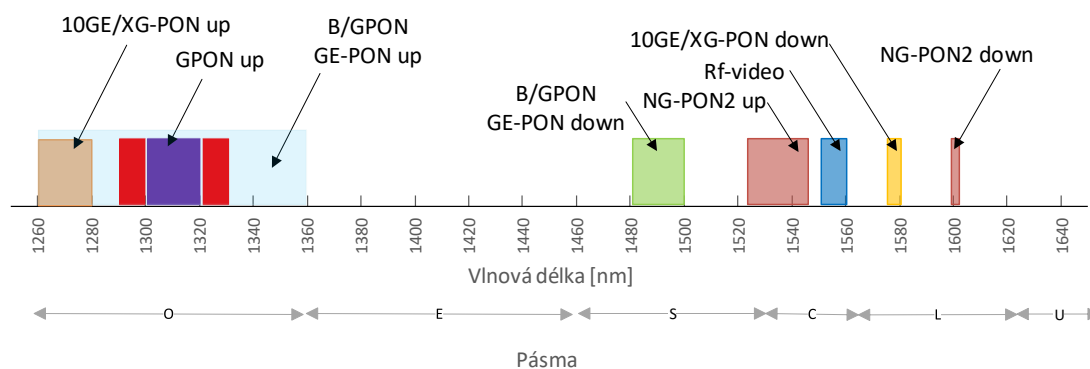
„WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing), tzv. „široký“ vlnový multiplex většinou používá čtyři vlnové délky v oblasti 850 nm (vícevidová optická vlákna) nebo v oblasti 1300 a 1310 nm (vícevidová nebo jednovidová optická vlákna). Jednotlivé vlnové délky WWDM multiplexu mají typicky odstup 25 nm.“ [15, str. 133]

### CWDM

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) tzv. „hrubý“ vlnový multiplex vznikla jako levnější varianta DWDM. Technologie CWDM je forma vlnového multiplexu, která využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie DWDM. V doporučení ITU-T G.694.2 [16, str. 3] je stanoveno 18 vlnových délek s kanálovými rozestupy 20 nm a s tolerancí  $\pm 6-7$  nm. Oproti DWDM jsou náklady na technologii menší například při pořizování vysílačů. Ovšem z toho vyplývá i nižší počet použitelných kanálů.

## DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) tzv. „hustý“ vlnový multiplex používá minimální odstupy mezi jednotlivými kanály, takže umí do jednoho vlákna implementovat desítky vlnových délek. V těchto případech se využívá jednovidových laserů a úzkopásmových interferenčních filtrů. Při tom je nezbytné zajistit dostatečnou kmitočtovou stabilitu a extrémně úzkou spektrální charakteristiku vyzařovaných vlnových délek. V doporučení ITU–T G.694.1 [17, str. 2] pro technickou aplikaci tohoto systému je definováno několik variant rozestupů mezi kanály, a to 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz a 100 GHz. Referenční kmitočet od kterého se vytváří další kanály je dle výše zmíněného doporučení 193,1 THz. DWDM systémy mohou být provozovány v oblasti vlnových délek S, C a L optického pásma.



Obr. 1.15: Pásma s vyznačením PON technologií (Zdroj: Vlastní zpracování)

ITU pro WDM definuje rozsahy frekvencí, tyto frekvenční pásma jsou:

- pásmo O (Original): vlnové délky 1260–1360 nm,
- pásmo E (Extended): vlnové délky 1360–1460 nm,
- pásmo S (Short): vlnové délky 1460–1530 nm,
- pásmo C (Conventional): vlnové délky 1530–1565 nm,
- pásmo L (Long): vlnové délky 1565–1625 nm,
- pásmo U (Ultra-Long): vlnové délky 1625–1675 nm.

## TDM - Časový multiplex

Time-division multiplex je metoda pro přenos a přijímání nezávislých signálů do jednoho vlákna. Hlavním úkolem TDM je korigovat data tak, aby se ve vlákne objevily v daném časovém úseku a navzájem tak nekolidovaly. Narozdíl od WDM, který pracuje s frekvencemi, TDM pracuje s časem. TDM je užít v PON pro sestupný směr (downstream).

## TDMA

Z anglického Time Division Multiple Access je metodou přístupu k médiu. Na rozdíl od WDM, kde je použita paralelizace spojů, je zde součinnost spojení definována jako sériová posloupnost vysílacích sekvencí. Každý účastník má přidělen určitý čas - sekvenci k přístupu k médiu tzv. *timeslot*. Tento časový úsek slouží výhradně k vysílání dat od tohoto účastníka. Timesloty jsou součástí TDMA rámce a neustále se opakují. Každý klient má jeden timeslot v rámci. TDMA vyžaduje časovou synchronizaci, aby klienti mohli k médiu přistupovat. TDMA je užít v PON pro vzestupný směr (upstream).

## 1.2 AON, PON

OLT, neboli optické linkové zakončení, je výchozí prvek přístupové sítě, tzv. centrální jednotka. Tento prvek je přechodným prvkem mezi přístupovou sítí a páteřní sítí. Nejčastěji L2/L3 switch v PON systému. Hlavní funkcí OLT je kontrola toku informací skrze optickou datovou síť. Informace z OLT putují směry k uživateli downstream a od uživatele upstream. OLT provádí i konverzi protokolů, protože v páteřních sítích se používají různé druhy protokolů (nejčastěji Ethernet, SDH nebo ATM), a proto je potřeba zajistit jejich konverzi. Dalším důležitým úkolem OLT je spravování, dohled a řízení koncových jednotek ONU/ONT [4, str 51-53].

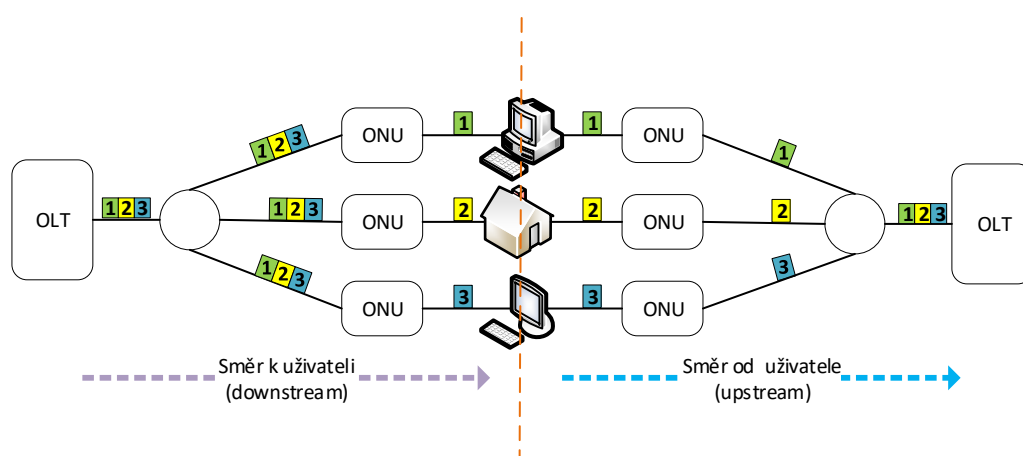
Optická síťová jednotka (ONU) je koncový prvek, který převádí elektrické signály na optické. Lze si takové zařízení představit jako router s optickým WAN portem. ONU je tedy zařízením pro připojení například domácnosti k poskytovateli. Koncový terminál uživatele (ONT), funkcí vyjadřuje to samé jako ONU. Rozdílem je značení - ITU-T používá označení ONT, IEEE naopak ONU. Oboje je tedy zařízením u uživatele. Jak ONU tak ONT jsou prvky, které na straně uživatele (klienta) převádí optický signál na elektrický a pomocí strukturované kabeláže nebo bezdrátového připojení vytváří možnost připojování klientů do sítě. ODN (Optical Distribution Network) je nedílnou součástí systému PON a jedná se o přenosové médium mezi ONU a OLT. Součástí jsou konektory, optická vlákna a sváry.

### 1.2.1 AON - Aktivní optická síť

U tohoto typu sítě se v trase používají prvky vyžadující elektrickou energii pro svoji činnost jako například: routery, switche a další. Funkční rozdíl mezi AON a PON je v tom, že u AON dochází ke třídění paketů na aktivních prvcích a u PON dostávají data všechny ONT. Proto je AON spíše využívána pro P2P spoje a na delší vzdálenosti. Maximální dosah je cca 120 km.

## 1.2.2 PON - Pasivní optická síť

Je typ optické sítě, která používá prvky, ve kterých není nutno použít další zdroj elektrické energie. PON sítě jsou P2M (Point-to-multipoint) a pracují výhradně na technologii TDMA. To znamená, že z výchozího bodu je připojeno větší množství uživatelů. Vstupní médium je sdílenou součástí trasy pro poskytovanou službu. V této trase se používají pouze pasivní prvky – nejčastěji rozbočovače na splnění požadavku připojení více klientů, aniž by bylo třeba využít zesilovačů či jinou úpravu optického signálu. Z tohoto důvodu není dosah tak velký jak u AON. U PON je to mezi 10–20 km.



Obr. 1.16: PON topologie (Vlastní zpracování dle [4, str. 52])

## 1.2.3 Vývoj PON

Pasivní optické sítě (PON) jsou stále častěji považovány za klíčový prvek současných a budoucích širokopásmových přístupových sítí. Masivní užití PON je způsobeno rostoucí poptávkou po šířce pásma, primárně poháněnou vysokorychlostním internetovým provozem. Tento vývoj vyvolává potřebu vyšší šířky pásma v sestupném směru (downstreamu). Vyšší požadavek na symetrický provoz vzniká zvyšováním potřeb uživatelů, kteří síť využívají pro hraní online her, sdílení souborů nebo provozem cloudových služeb. Z dlouhodobého hlediska je proto potřeba převádět přístupové sítě na symetrické.

Pro pasivní optické sítě nové generace (NG-PON) očekávají poskytovatelé služeb lepší možnosti přenosu dat a podporu služeb nad stávajícími PON. Zatímco sítě

NG-PON2 jsou považovány za nejslibnější přístup, poskytovatelé služeb se musí vypořádat s vyvíjejícími se standardy.

Stejně jako u všech sítí musí zařízení používané s PON dodržovat standardy pro provoz. Ty jsou nastaveny skupinami ITU a IEEE a v případě ITU se budou zabývat standardy GPON (Gigabit PON), XG(S)-PON (10-Gbps PON) a NG-PON2. Z velké části je dnes používán GPON. Aktuální doporučení GPON a IEEE EPON však neumožňují další škálování počtu účastníků nebo kapacity pro dosažení požadků na šířku pásma koncového uživatele. Dalšími kroky bude zvýšení kapacity služeb a přechod na technologie se symetrickou nabídkou rychlostí. Tabulka 1.3 uvádí standardy a jak bude příští generace PON zvyšovat kapacitu.

Tab. 1.3: Tabulka PON specifikací (Převzato a upraveno z [18])

	GPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2	GE-PON	10G-EPON	100G-EPON
Standardy	ITU-T G.984.1	ITU-T G.987	ITU-T G.9807.1	ITU-T G.989	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	IEEE 802.3ca (2019)
Downstream/Upstream rychlosti [Gbps]	2,4 / 1,2	10 / 2,5	10 / 10	40 / 10	1,25 / 1,25	10 / 10	100 / 100
Split poměr	1:64 (128)	1:128 (256)			1:64 (128)	1:128	nespecifikováno
Společné fungování s	-	G-PON			-	GE-PON	

## 1.2.4 GPON, GEPON

**GPON** vychází z technologie BPON, což je širokopásmová pasivní optická síť, která první implementovala WDM a implementuje protokoly z linkové vrstvy (ATM, Ethernet). GPON se zlepšil v porovnání s APON a BPON a je zpětně kompatibilní. Je definován v doporučení ITU G.984.1 až G.984.7. Je to tedy optický systém se šířkou pásma 2,4 Gbit/s v sestupném směru od OLT a 1,2 Gbit/s ve vzestupném směru.

Počet rozdělení ze splitteru se mohou lišit od 2 do 64. Optický přenos vláken z ústředí na každého uživatele může být dosah až 20 km.

Nominální přenosové rychlosti GPON downstream:

- 1244,16 Mbit/s,
- 2488,32 Mbit/s.

Upstream:

- 155,52 Mbit/s,
- 622,08 Mbit/s,
- 1244,16 Mbit/s,

Přestože jsou všechny kombinace možné (kromě sestupného směru 1,2 Gbit/s a vzestupný směr 2,4 Gbit/s), nejčastěji poskytovatelé nabízejí pouze 1,2 Gbit/s

upstream a 2.4 Gbit/s ve směru downstream. Provozní rozsah vlnových délek je 1480–1500 nm pro sestupný směr a 1260–1360 nm pro vzestupný směr. Kromě toho rozsah vlnových délek 1550–1560 nm lze použít pro následnou distribuci RF videa.

Kódování s dopředným potlačením chyb (FEC) je matematická technika zpracování signálu, která kóduje data tak, aby mohly být detekovány chyby a opraveny. S FEC jsou redundantní informace přenášeny spolu s původními informacemi. Množství redundantních informací je malé aby FEC nezvyšovalo režijní náklady. FEC má za následek zvýšení rozsahu útlumu GPON přibližně o 3–4 dB.

Základní funkcí GPON je, že data jsou vysílána všem ONU, a každá ONU má přidělený čas, kdy má možnost data přenést k OLT. Ve vzestupném směru GPON se připojení podobá P2P, takže veškerá komunikace je zabezpečena před odposloucháním. Sestupné vysílání je všesměrové z OLT ke všem ONU v TDM doméně. Každé ONU akceptuje pouze rámce určené pro něj a přenos může být zajištěn šifrováním. Je to tak proto, že uživatel může reprogramovat svůj vlastní ONU a zachytit všechna data v sestupném směru příslušné všem ONU připojeným k této OLT. Kvůli tomu každá důvěrná informace může být poslána jako plain text. Takže doporučení GPON G.984.3 popisuje použití zabezpečení informací aby uživatelé měli možnost přístup pouze k údajům určeným pro ně. Zabezpečující algoritmus je AES a akceptuje délku klíče 128, 192, 256 bitů.

GPON používá GEM (GPON Encapsulation Method neboli GPON zapouzdřovací metoda) jako metodu, která zapouzdřuje data přes GPON. I když může být jakýkoliv typ dat zapouzdřený, skutečné typy zapouzdření závisí na přenášené službě. GEM poskytuje připojení orientované sdělení. Tato metoda je mírně upravenou verzí doporučení ITU-T G.7041, které se týká postupu generického rámcování (specifikace pro odesílání IP paketů přes síť SDH). Downstream rámec je sestaven z fyzického řídicího bloku PCBd a payloadu. Payload obsahuje ATM buňku ( $n \times 53B$ ) a GEM sekci. Celý rámec má délku trvání 125  $\mu s$ .

GTC rámec pro sestupný směr má délku trvání 125  $\mu s$  a délka je 38 880 bajtů, což odpovídá rychlosti v sestupném směru 2.48832 Gbit/s. Délka pro vzestupný směr je 19 440 bajtů, při stejné době trvání jako u sestupného směru je to 1,24416 Gbit/s.

**GEAPON** je definováno v IEEE 802.3ah a rozdílem vůči GPON je přenos ethernetových rámců oproti GEM.



Obr. 1.17: GTC rámeček GPON (Upraveno dle: [19, str. 29])

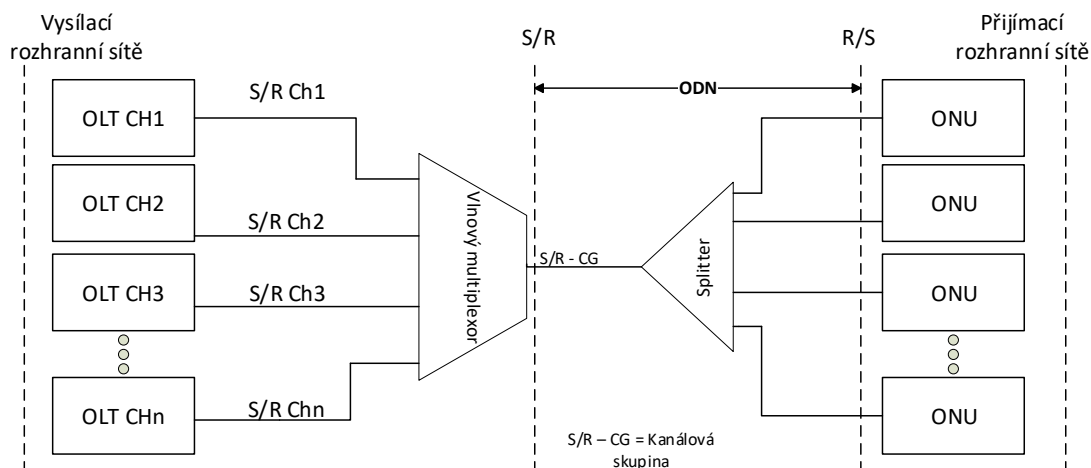
### 1.2.5 XG-PON

Alternativním názvem je Next Generation-Passive optical network. Jak již název napovídá je to pasivní optická síť nové generace. Používá P2M propoje pro komunikaci a je výchozí pro použití pro FTTx. XG-PON nabízí širokou škálu možností při zachování nízké ceny systému. Jako hlavní technologie je zde použita TDMA.

**XGS-PON** je XG-PON s navýšenou upstream rychlostí na symetrický poměr vysílacích rychlostí vzestupného a sestupného směru.

### 1.2.6 NG-PON2

Jako další stupeň evoluce technologií definuje ITU-T G.989 druhou generaci NG-PON, 40 Gbit/s PON, která kombinuje užití TDM a WDM. Další požadavek vyplývající z opětovného použití rozmístněné infrastruktury optických vláken se týká útlumu optické cesty. NG-PON2 musí být schopno provozovat stejnou pasivní distribuční síť (ODN) definovanou dříve pro G-PON a XG-PON. Rozšiřuje XG-PON, je to tedy síť s P2M topologií a nyní je výchozí pro nasazování FTTx. To znamená, že optické útlumové třídy definované pro XG-PON musí být dosažitelné. Rozdílová ztráta je definována jako absolutní rozdíl mezi optickými ztrátami libovolných dvou cest uvnitř stejné ODN. To usnadňuje postupnou migraci stávajících odběratelů, kteří přecházejí na novou technologii a přidání nových účastníků NG-PON2 bez narušení služby pro zákazníky na původních systémech PON [20]. Na obrázku 1.18 je schéma funkce NG-PON2.



Obr. 1.18: Základní topologie NG-PON2 (Upraveno dle: [20, str. 17])

Následuje výčet parametrů, které by mělo NG-PON2 splňovat dle doporučení [21]: Požadavky na systémy NG-PON2 zahrnují podporu:

- TWDM architektura kanálu s více vlnovými délkami,
- 4–8 dvojic kanálů TWDM (každý kanálový pár obsahuje jeden downstream a jeden upstream kanál vlnových délek), konfigurovatelný pro přírůstkový růst počínaje jedním nasazeným (tj. ne všechny páry kanálů musí být aktivní)[21, str. 4].

Nominální rychlosti pro jednotlivé kanály:

- 10 Gbit/s downstream a 10 Gbit/s upstream,
- 10 Gbit/s downstream a 2.5 Gbit/s upstream,
- 2.5 Gbit/s downstream a 2.5 Gbit/s upstream [21, str. 4].

Jako další požadavky se zahrnují:

- dosah pasivních vláken nejméně 40 km a maximální diferenční vzdálenost vláken až 40 km s konfigurovatelnou maximální diferenční délkou vlákna 20 km a volitelně 40 km,
- schopnost dosáhnout 60 km, nejlépe s pasivním vnějším zařízením,
- podpora poměru rozdělení nejméně 1:256.

Systémy NG-PON2 vyžadují flexibilitu pro vyrovnání kompromisů v poměru rychlosti, vzdálenosti a rozdělení pro různé aplikace. Soubor kombinací parametrů, které systém podporuje, musí zahrnout:

- 40 Gbit/s downstream kapacitu a 20 km dosah s alespoň 1:64 rozdělením,
- 10 Gbit/s upstream kapacitu a 20 km dosah s alespoň 1:64 rozdělením,
- přístup do sítě se špičkovými rychlostmi 10/2.5 Gbit/s downstream/upstream,
- jsou také možné delší vzdálenosti s nižšími poměry dělení [21, str. 4].

Systémy NG-PON2 mohou také podporovat:

- 40 Gbit/s upstream kapacitu s 10 Gbit/s na upstream kanál and 20 km dosah s alespoň 1:64 rozdělením,
- 2.5 Gbit/s na downstream kanál a 2.5 Gbit/s na upstream kanál s 40 km dosah s 1:32 rozdělením,
- 10 Gbit/s na downstream kanál a 10 Gbit/s na upstream kanál s 40 km dosah s 1:32 rozdělením,
- přístup do sítě se špičkovými rychlostmi 10/10 Gbit/s downstream/upstream,
- laditelná WDM typu point-to-point se schopností koexistovat s ostatními systémy PON [21, str. 4].

Systémy NG-PON2 musí být schopny nabízet výrazně více kapacity než současné systémy GPON a XG-PON a musí být schopny alespoň podporovat 40 Gbit/s souhrnné kapacity na vlákne ve směru sestupném a nejméně 10 Gbit/s souhrnné kapacity ve směru vzestupném. Až 160 Gbit/s ve směru downstream a 80 Gbit/s upstream je cílová kapacita kam by se měla specifikace NG-PON2 dostat [21].

### Útlumy v trase NG-PON2

Součástí doporučení pro NG-PON2 je tabulka 1.4, ve které jsou třídy s doporučením pro takzvanou útlumovou bilanci. Třída N je definicí pro Nominal (jmenovitá) a třída útlumu E je definicí pro Extended (rozšířená).

Tab. 1.4: Tabulka útlumových tříd NG-PON2

	N1	N2	E1	E2
Min. útlum optické trasy	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Max. útlum optické trasy	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB
Max. diferenční útlum optické trasy	15 dB			

ODN zahrnující zesilovací prvky, slučovače optických signálů nebo rozdělovače s malým útlumem mohou mít útlum menší než je deklarovaná minimální hodnota. V takovém případě musí ODN zajistit opatření (například optickým atenuátorem), aby garantovala minimální optický útlum v dané útlumové třídě, a zajistila tak prevenci degradace BER nebo potenciálnímu poškození přijímače.

## Parametry optického přijímače a vysílače pro NG-PON2

V definici ITU-T G989.2 je také popis parametrů pro to, jak by měl vypadat přijímač a vysílač optického signálu. V tabulce 1.5 jsou zmíněné parametry pro sestupný směr při 9,95328 Gbit/s.

Tab. 1.5: Parametry vysílače a přijímače definované v sestupném směru

Vysílač					
	Jednotka	Hodnota			
Nominální rychlost linky	Gbit/s	9,95328			
Vlnová délka – pásmo	nm	1596–1603			
Rozestup mezi kanály	GHz	100			
Linkový kód	–	NRZ			
ODN třída		N1	N2	E1	E2
Průměrný minimální výkon	dBm	3	5	7	9
Průměrný maximální výkon	dBm	7	9	11	11
Přijímač					
Max. odrazivost	dB	–20			
Referenční BER	–	$10^{-4}$			
Útlumová třída		N1	N2	E1	E2
Min. cit. pro ref. BER	dBm	–28	–28	–28	–28
Max. cit. pro ref. BER	dBm	–7	–7	–7	–9

## 1.3 Simulační nástroje pro optické sítě

### 1.3.1 OptSim™

OptSim™ je softwarový nástroj pro návrh a simulace optických komunikačních systémů na úrovni fyzické vrstvy. Díky grafickému rozhraní je velice jednoduché jej používat. OptSim™ poskytuje vysokou přesnost a použitelnost a je ideální pro optické systémy koherentních optických systémů. Poskytuje možnost modulace DPSK a QPSK a dalších. Je vhodný pro DWDM/CWDM s optickými zesilovači jako třeba Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA), Ramanův zesilovač a dalšími.

OptSim™ na svých webových stránkách uvádí, že je možné simulovat [22]:

- FTTx/PON, včetně BPON, G(E)PON, WDM-PON, koherentní PON, RSOA obousměrně PON,
- analogový a digitální CATV, radio-over-fiber, mikrovlnné fotonické spoje,
- koherentní optické CDMA,
- elektronická kompenzace disperze (EDC),
- interferometrický vláknový optický gyroskop (iFoG),
- optické bezkabelové spoje (FSO).

Rozhraní s nástroji pro navrhování na úrovni zařízení, jako jsou BeamPROP a LaserMOD, poskytují smíšený návrhový tok pro optoelektronické obvody a systémy. Program také nabízí Matlab rozhraní, díky němuž je jednoduché rozvíjet modelování přes funkce Matlabu a Simulink prostředí. Poskytuje API pro programovací jazyky C/C++ pro rozvoj uživatelských modelů. Simulink již ve výchozí instalaci obsahuje knihovnu předdefinovaných komponent výrobce, která usnadňuje modelování komerčně dostupných zařízení.

V programu je simulace vytvářena pomocí blokového schématu. Každý blok má svoji funkci a signály mezi bloky se vyměňují jako v reálném zapojení. Bloky jsou uloženy v knihovnách, které je možno rozšířit a doprogramovat chování bloků.

Výhodou programu je škálovatelnost zapojení a relativně rychlou změnu parametrů pro simulaci.

#### Prvky Optsimu

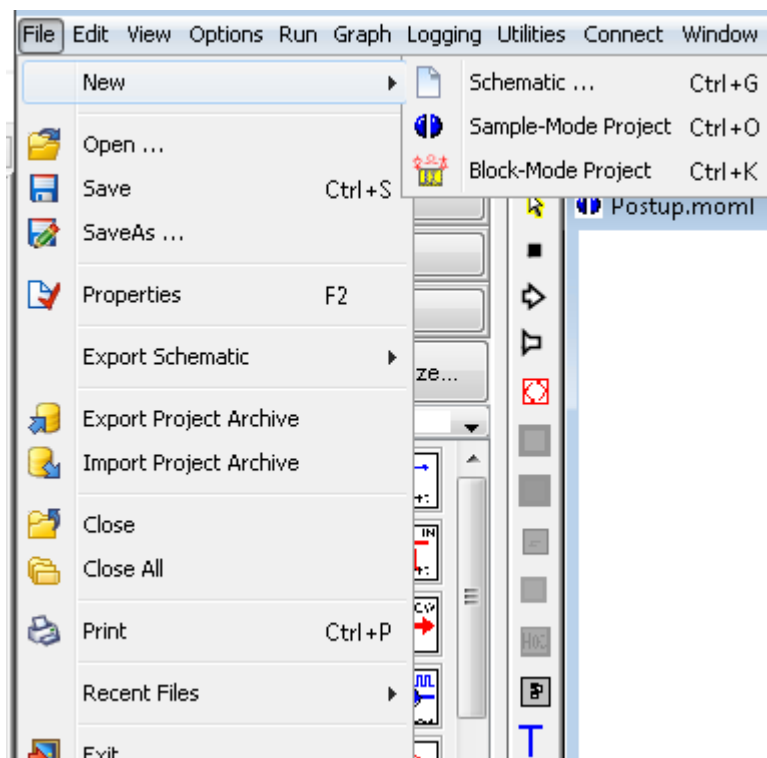
- Generátor bitové posloupnosti - pnseq - je blokem, který generuje náhodnou bitovou posloupnost. Tímto blokem jsou generována data, která jsou přenášena k přijímači.
- Převod do kódu NRZ - recnrz - zde je uskutečněn převod bitové posloupnosti do kódu NRZ. Výstup je elektrickým signálem.
- CW laser.
- VCSEL [23, str. 1].

- Modulátor - Modulátor reaguje na elektrický signál a moduluje jej na optický. Je to blok, který potřebuje pro svoji činnosti jak elektrický signál tak optický z laseru.
- Scope - virtuální měřící přístroj pro elektrické veličiny.
- Powermeter - opowme - blok, který je měřícím přístrojem pro optický výkon.
- Probe - podobně jako scope, ovšem pro optické veličiny.
- Rx blok - sensitivity\_rx - PIN/ APD dioda, přijímač.
- Bessel filter - je filtr pro kompenzaci chromatické disperze na vlákně.

## Vytváření simulace v Optsimu

Plátno pro vkládání bloků pro simulaci je vytvořeno následovně: File -> new -> Sample-mode schematic.

Otevře se tabulka s volbou umístění a názvem souboru s příponou .moml (soubor

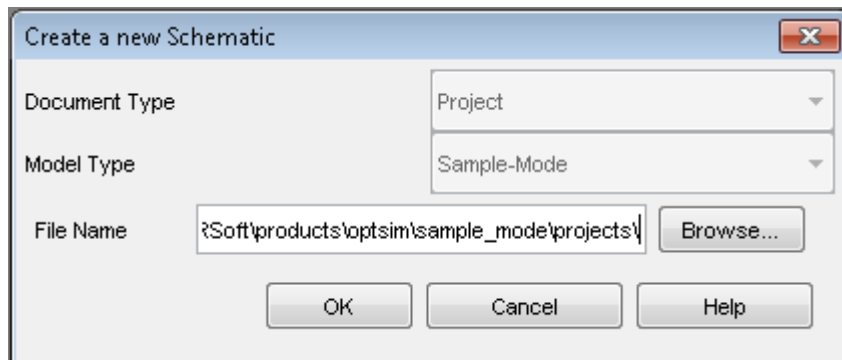


Obr. 1.19: Nové schéma (Zdroj: Vlastní zpracování)

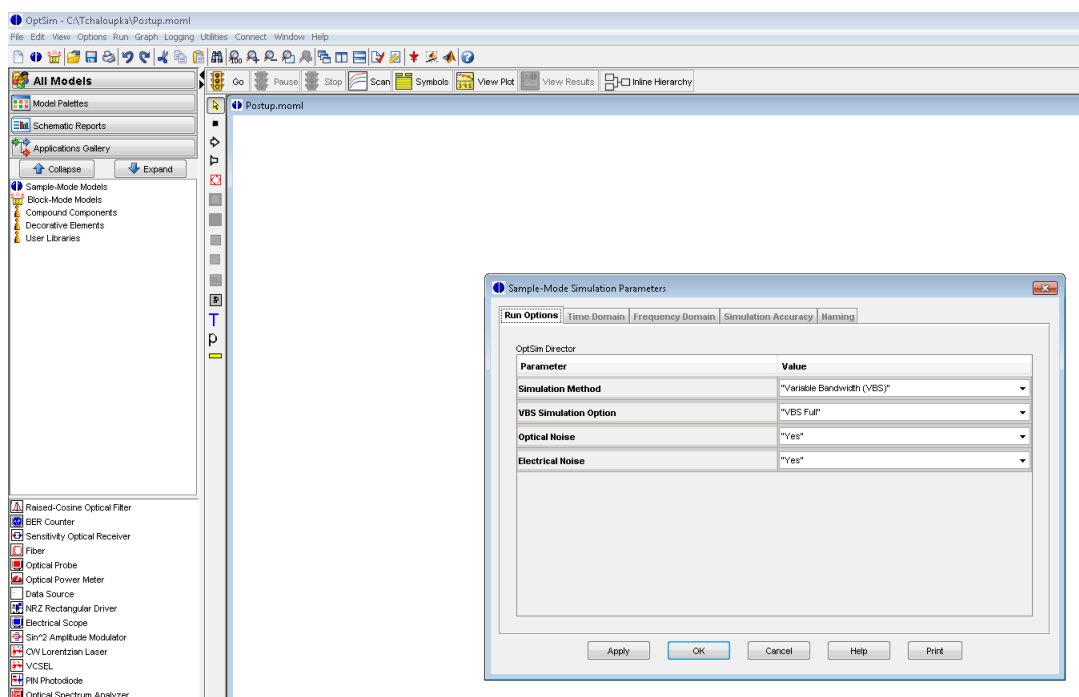
schématu). Po zvolení umístění je nutno volbu potvrdit.

V dalším kroku se otevře schématické plátno překryté volbou parametry simulace, ty lze nastavit později, pokud budeme používat v projektu proměnné (např. refbrt - reference bitrate), které se berou právě z těchto voleb v simulaci.

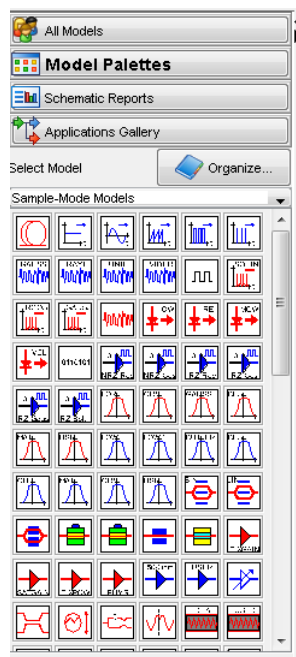
Na obrázku 1.22 je paleta obsahující předdefinované funkční bloky.



Obr. 1.20: Tabulka voleb (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 1.21: Parametry simulace (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 1.22: Paleta v programu OptSim™ (Zdroj: Vlastní zpracování)

### 1.3.2 PHOTOSS

PHOTOSS je simulační software pro návrh a analýzu spojů z optických vláken a přenosových systémů na fyzické vrstvě. Poskytuje intuitivní grafické uživatelské rozhraní, které usnadňuje nastavení fotonické sítě. Knihovna flexibilních součástí obsahuje velké množství simulačních modelů a předdefinovaných sad parametrů, které lze snadno rozšířit o uživatelsky definované součásti s přizpůsobenými parametry. Poskytuje řadu modelů komponentů s různou úrovní složitosti. Vestavěné programovací rozhraní umožňuje integraci uživatelsky definovaných modelů komponent a simulačních algoritmů s plnou kontrolou jejich příslušných parametrů [24].

Hlavním účelem aplikace PHOTOSS je provádět numerické simulace optických nebo fotonických přenosových systémů. Obecně platí, že simulace těchto systémů zahrnuje souhru mezi základními koncepty za účelem vytvoření přesné emulace skutečného fyzického systému. PHOTOSS je samostatným software a nepotřebuje další simulační framework.

Uživatelské rozhraní umožňuje grafický návrh a analýzu optických systémů umístěním a připojením komponenty na plátnu s mřížkou. Podobně jako u OptSimu je zde předdefinovaná knihovna s komponentami, u kterých lze měnit parametry. Různé komponenty představují modely s různou složitostí.

Fyzické modely umožňují širší náhled do jevů ovlivňujících systém, zatímco behaviorální modely představují jednoduchou adaptaci vlastností komponenty. Za účelem snadnějšího přehledu a správy složitých sestav mohou být komponenty seskupeny

do opakovaně použitelných podsítí, čímž se vytvoří funkční jednotky, jako jsou převodníky vlnových délek, multiplexery s optickými přídavnými funkcemi nebo křížová propojení. Obecně je simulace PHOTOSu uložena v simulačním souboru, který má určený formát – *.pho formát*. Simulační soubor lze načíst, modifikovat, uložit a může být přenesen na libovolný počet počítačů, na kterých je možno tuto simulaci spustit. V závislosti na složitosti a obsahu simulace je nutno kopírovat i další soubory spolu se simulačním souborem.

Každá individuální simulace obsahuje soubor simulačních parametrů, které se vztahují pouze na jeho vlastní rozsah simulace. Samozřejmě, různé simulace mohou mít různé sady parametrů.

## Prvky PHOTOSu

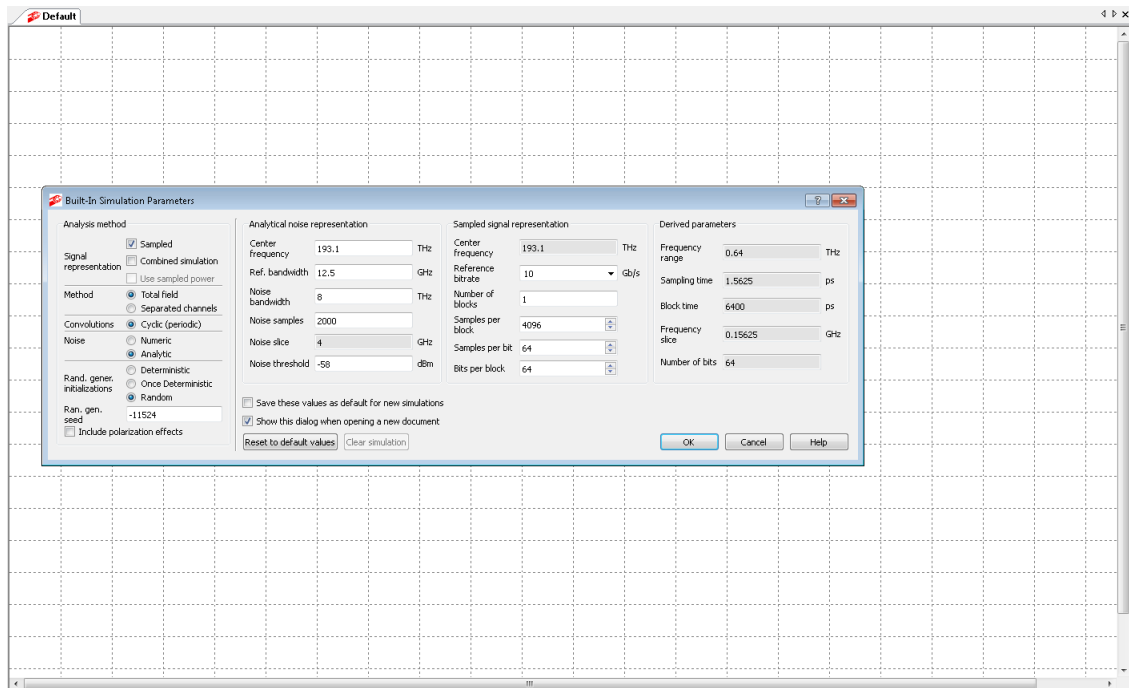
- PulseGenerator – je blokem, který generuje náhodnou bitovou posloupnost a výstupem jsou pulzy v kódu NRZ.
- CWLaser – laser s kontinuálním paprskem.
- Analytical filter – Besselův filtr (dolní propust).
- Modulátor – modulátor reaguje na elektrický signál a moduluje jej na optický. Je to blok, který potřebuje pro svoji činnost jak elektrický signál tak optický z laseru.
- Oscilloscope – virtuální měřicí přístroj pro elektrické veličiny.
- EyeAnalyzer – blok, který je měřicím přístrojem s výstupem diagramu oka.
- NumericalBert – blok pro zjištění BER.
- SpectrumAnalyzer – blok v němž je výstup zaznamenáván jako data pro grafickou analýzu.
- PinDiode – PIN/APD dioda, přijímač.
- SMF – jednojádrové vlákno.

## Vytváření simulace v PHOTOSu

Podobně jako v OptSimu je zde určitá podobnost při vytváření schémat. V základním pohledu je zde kreslicí plátno s mřížkou, do které se ukládají funkční bloky. Jejich spojení se uskutečňuje přes kliknutí na počáteční blok a na koncový, který je třeba spojit. Stejně jako v OptSimu je zde rozlišováno elektrické a optické spojení. Proto po vložení bloku na plátno je nutno nejdříve nastavit (pokud to blok dovozuje) jeho elektrické nebo optické chování. Například PulseGenerator lze již nastavit tak, aby vysílal NRZ pulzy v optickém signálu (v testovací topologii bylo vyzkoušeno oboje zapojení - jak rozdělení na laser, filter, generátor, modulátor, tak jen PulseGenerator). Tyto zapojení se liší množstvím možností k nastavení. Proto byla zvolena rozložená možnost, aby byl co nejvíce eliminován rozdíl vůči simulaci v OptSimu.

Nové schéma vytvoříme přes File -> new -> New Simulation. Tímto vytvoříme plátno pro vkládání bloků pro simulaci.

V dalším kroku 1.23 se otevře schématické plátno překryté volbou parametry simulace nastavíme Noise na numeric a zbytek zvolíme dle požadovaných parametrů. V testovací topologii tyto parametry byly nechány ve výchozím nastavení, jen změněna bitrate na 10 Gbit/s.

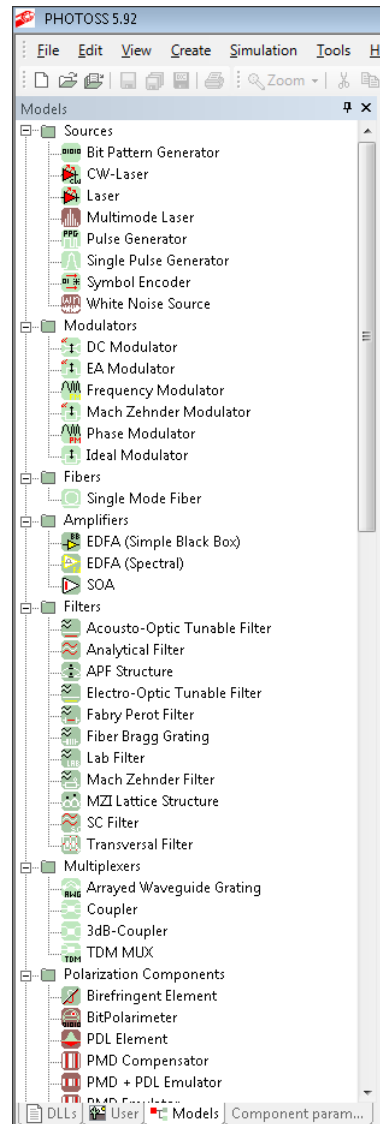


Obr. 1.23: Nové schéma s parametry simulace (Zdroj: Vlastní zpracování)

Na obrázku 1.24 je paleta obsahující předdefinované funkční bloky. V paletě jsou různá rozdělení pro bloky simulace, zde je vypsáno rozdělení s bloky použitými v simulaci:

- Sources – CW laser, Pulse Generátor,
- Modulators – Mach Zehnder Modulátor,
- Fibers – Single Mode Fiber,
- Amplifiers,
- Filters – Analytical Filter,
- Multiplexers,
- Polarization Components,
- Receivers – Eye Analyzer, Numerical BERT, Oscilloscope, PIN Photodiode, Spectrum Analyzer,
- Additional Components,
- Digital Signal Processing,
- Programming,

- Management,
- Equalizers,
- Multimode and Multicore,
- Testing Equipment.



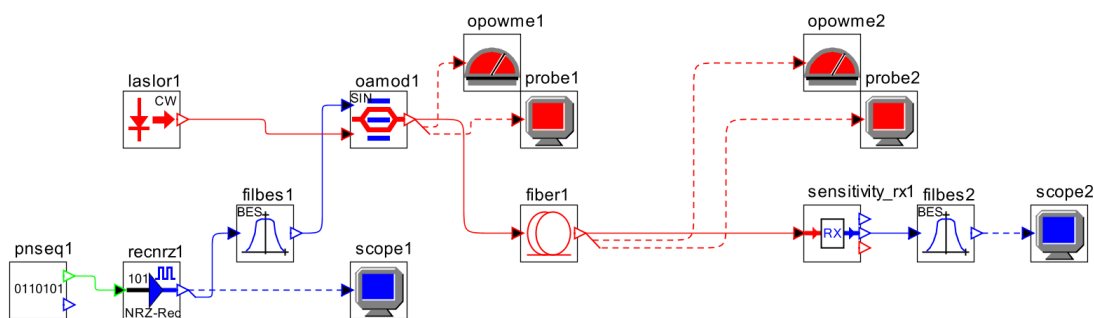
Obr. 1.24: Paleta v programu PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)

## 2 Vytvoření testovací topologie

### 2.1 OptSim™

V OptSimu byl vytvořen testovací model jednoduchého vysílače a přijímače, který má na vstupu náhodnou bitovou posloupnost. Ta je převedena do kódu NRZ a odeslána do amplitudového modulátoru, který moduluje signál z laseru – zdroje optického signálu a přivedené bitové posloupnosti v kódování NRZ. Signál je vyslán do optického vlákna na jehož konci čeká optický přijímač. Na vstupu i na výstupu je blok *scope*, který je pomyslným osciloskopem, a zaznamenává průběhy signálů. Na začátek a na konec optického vlákna je vložen měřič optického výkonu pro zjištění výkonu na začátku a na konci optické trasy.

Testovací topologie byla vytvořena dle následujícího schématu:

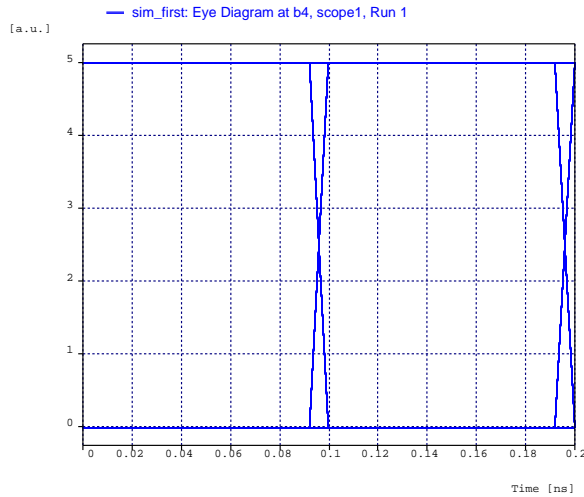


Obr. 2.1: Testovací topologie (Zdroj: Vlastní zpracování)

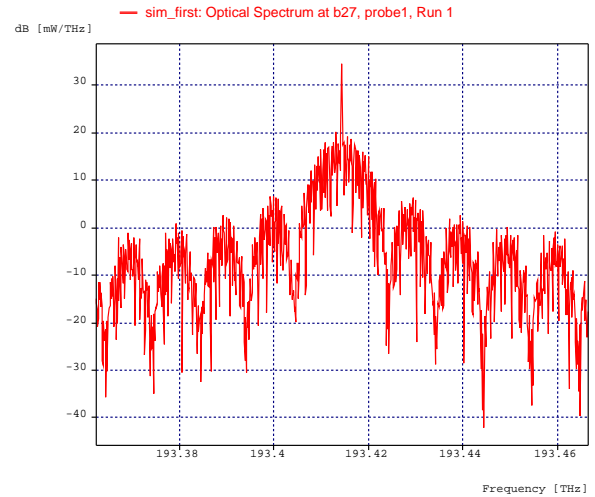
Parametry pro různé délky byly nastaveny:

- vysílací výkon laseru 3mW, vlnová délka 1550 nm,
- přenosová rychlost 10 Gbit/s,
- vlákno 0,25 dB/km, chromatickou disperzi 16,0 ps/nm/km,
- útlum modulátoru 3 dB.

V testovací topologii byla zvolena délka 1 km a 10 km. Na obrázku 2.2 je spektrum na začátku vlákna a diagram oka pro vstupní signál.



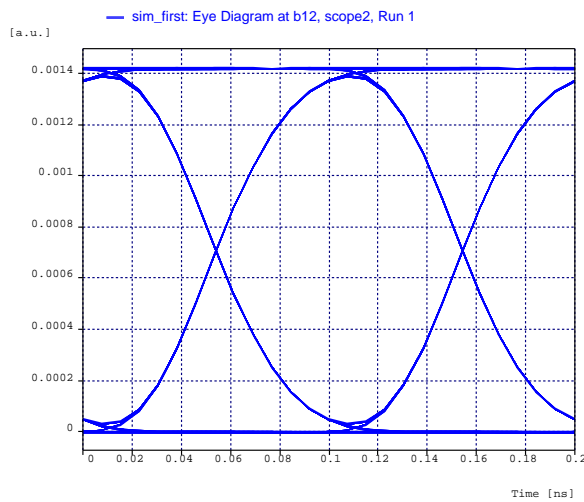
(a) Oko výstup z PG



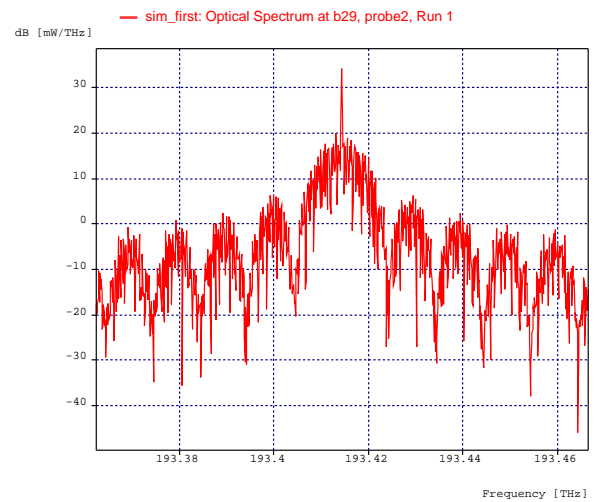
(b) Spektrum na začátku trasy

Obr. 2.2: Grafy pro topologií - začátek vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

### 2.1.1 Délka 1 km



(a) Diagram oka 1 km



(b) Spektrum na konci trasy 1 km

Obr. 2.3: Grafy pro topologií s 1 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

- $Power[dBm] = -1,167$
- $Power[mW] = 0,764E + 00$

Q hodnota 100 [lin],  $Q = 40,00$  [dB]

Na konci vlákna z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 2:

- $Power[dBm] = -1,420$

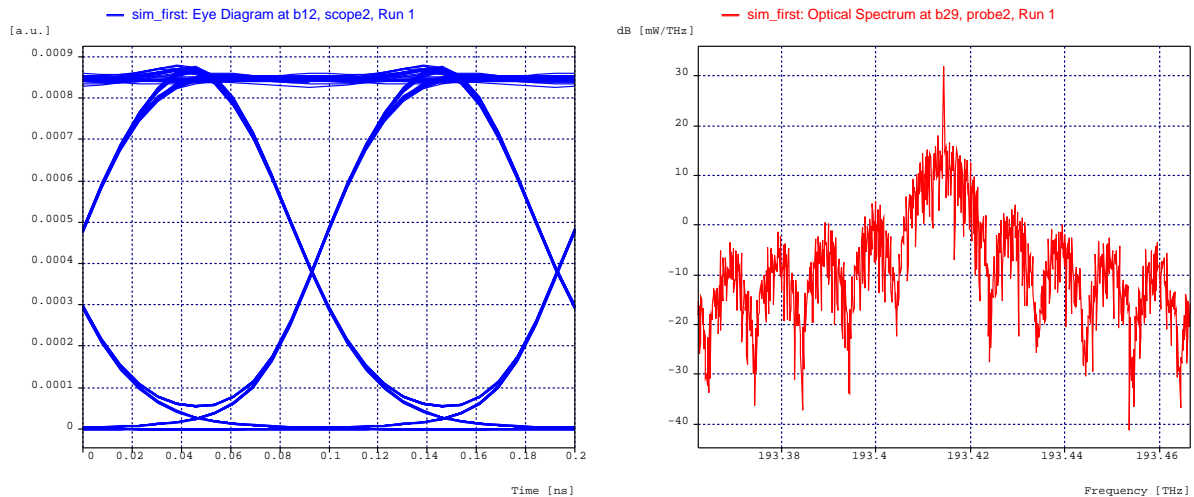
- $Power[mW] = 0,721E + 00$

Q hodnota 37,3509 [lin],  $Q = 31,446015$  [dB].

Výsledné odečtené BER  $10^{-40}$  na obou stranách.

Výpočet BER hodnoty:  $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{37,3509}{\sqrt{2}}) = 1,267 \times 10^{-305}$ .

## 2.1.2 Délka 10 km



(a) Diagram oka 10km

(b) Spektrum na konci trasy 10 km

Obr. 2.4: Grafy pro topologií s 10 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

- $Power[dBm] = -1,150$
- $Power[mW] = 0,767E + 00$

Na konci vlákna z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 2:

- $Power[dBm] = -3,673$
- $Power[mW] = 0,429E + 00$

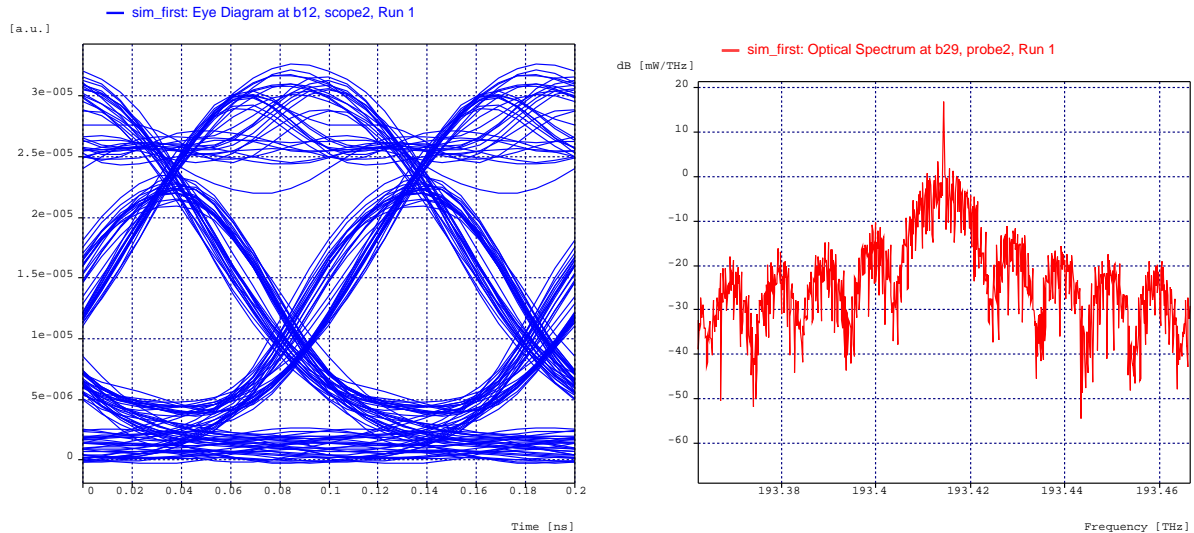
Q hodnota 33,8535 [lin],  $Q = 30,592081$  [dB].

Výsledné odečtené BER  $10^{-40}$  na obou stranách.

Výpočet BER hodnoty:  $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{33,8535}{\sqrt{2}}) = 1,81459 \times 10^{-251}$ .

### 2.1.3 Maximální délky stanovených parametrů

Pro maximální délku přenosu byla určena hodnota BER pod kterou nesmí přenos poklesnout. Pro tuto topologii bylo určeno BER  $10^{-14}$ . Dle základních parametrů bylo experimentálně nastavována délka a z výsledků byly porovnávány parametry přenosu dle BER. Této hodnotě se měření přiblížilo na 71. kilometru vlákna.



(a) Diagram oka 71 km

(b) Spektrum na konci trasy 71 km

Obr. 2.5: Grafy pro topologií se 71 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

- $Power[dBm] = -1,320$
- $Power[mW] = 0,738E + 00$

Na konci vlákna z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 2:

- $Power[dBm] = -18,993$
- $Power[mW] = 0,126E - 01$

Q hodnota 8,19223 [lin],  $Q = 18,268040$  [dB].

Naměřené BER na konci trasy:  $2,05688 \times 10^{-14}$ .

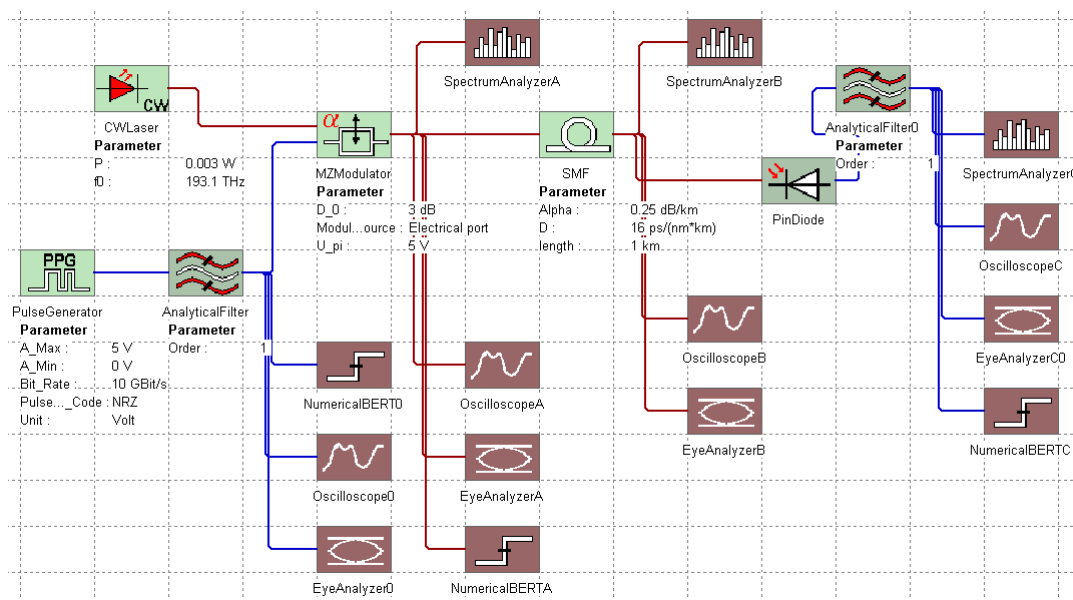
Výpočet BER hodnoty:  $BER = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{8,19223}{\sqrt{2}}\right) = 1,28215 \times 10^{-16}$ .

## 2.2 PHOTOSS

V programu PHOTOSS byl vytvořen podobně jako OptSimu model vysílače a přijímače. Na vstupu je generátor pulsů, který generuje bitovou posloupnost, kterou zároveň převede do kódu NRZ. Pro odstranění zářivých je výstup veden do analytického filtru, ze kterého je získáván signál, který je pro simulaci výchozí. NumericalBERT je přístrojem, který vyžaduje předřazení filtru pro svoji činnost (programové omezení). Modulátor přijímá signál z CWLaseru a výstupu z filtru, který moduluje dle elektrického signálu. Výstup směřuje do optického vlákna, přes které je přenesen na vstup PIN diody.

Jako tomu bylo u OptSimu, i zde na začátku a na konci optické trasy bylo třeba měřit výstupní výkon a spektrální charakteristiku optického impulsu.

Testovací topologie byla vytvořena dle následujícího schématu:



Obr. 2.6: Testovací topologie v programu PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)

Parametry pro různé délky byly nastaveny:

- vysílací výkon laseru 3 mW, výstupní frekvence 193,1 THz,
- přenosová rychlost 10 Gbit/s,
- vlákno 0,25 dB/km, Chromatickou disperzi 16,0 ps/nm/km,
- útlum modulátoru 3 dB.

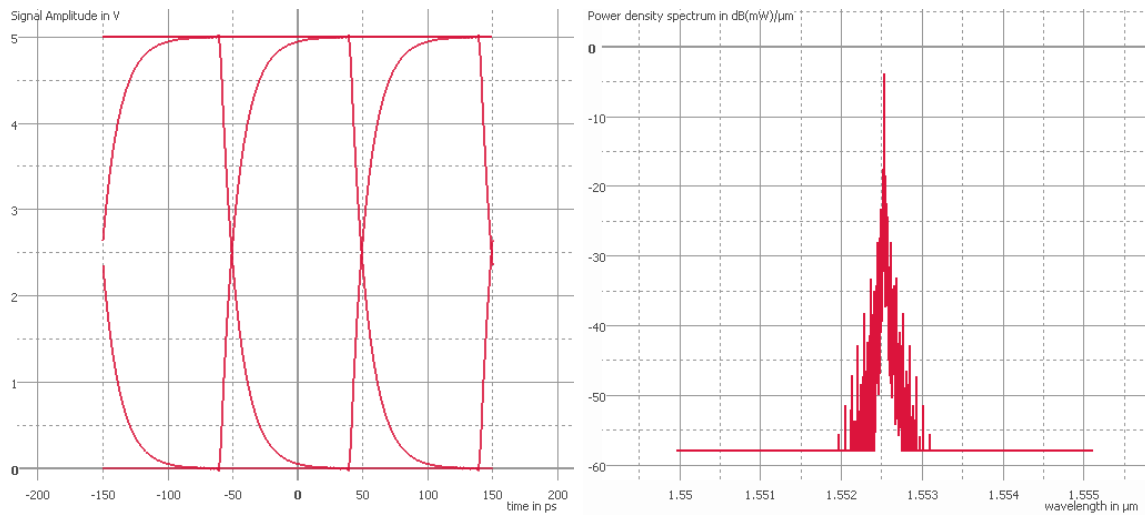
Na rozdíl od OptSimu bylo třeba nastavit další parametry zařízení:

- CWLaser:  $P = 0,003 \text{ W}$ ,  $f_0 = 193,1 \text{ THz}$ .
- PulseGenerátor:  $A\_Max = 5\text{V}$ ,  $A\_Min = 0\text{V}$ ,  $Bit\_Rate = 10\text{Gbit}$ ,  
 $Pulse\_Code = \text{NRZ}$ ,  $Unit = \text{Volt}$ .

- MZModulátor: útlum 3 dB, ModulationSource = Electrical port,  $U_{pi} = 5V$ .
- AnalyticalFilter Order = 1.
- SMF: Alpha 0,25 dB/km, 16 ps/(nm × km).
- Length = 1 km. (Dále se bude upravovat)

Z důvodu nutnosti použití více měřících přístrojů bylo nutno označit je dle následujícího suffixu:

- PRVEK0 – prvek měřící parametry před modulátorem,
- PRVEKA – prvek měřící parametry na začátku optické trasy – výstup z modulátoru,
- PRVEKB – prvek měřící parametry na konci optické trasy – konec optického vlákna,
- PRVEKC – prvek měřící parametry na výstupu z PIN diody.

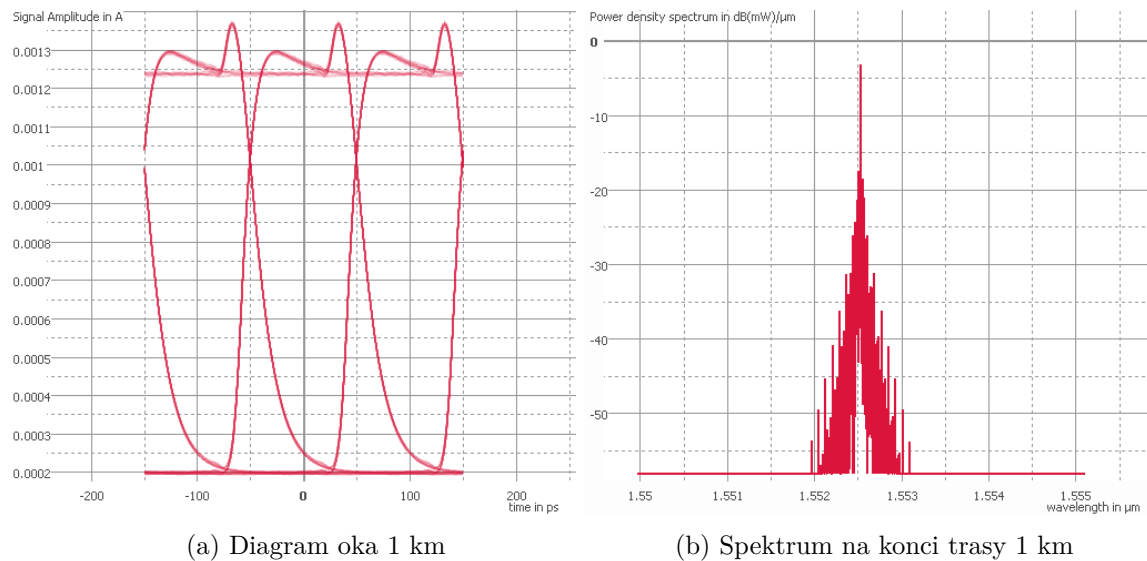


(a) Oko výstup z PG

(b) Spektrum na začátku trasy

Obr. 2.7: Grafy pro topologii - začátek vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)

## 2.2.1 Délka 1 km



Obr. 2.8: Grafy pro topologii s 1 km vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z osciloskopu s označením A:

- $Power[mW] = 1,503560$

NumericalBERTA: Q hodnota QNAN.

BER hodnotu nelze vypočítat.

Na konci vlákna z osciloskopu s označením B:

- $Power[mW] = 1,541015$

NumericalBERTC: Q hodnota 23,064776.

Výpočet BER hodnoty:  $BER = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{23,064776}{\sqrt{2}}\right) = 5,227739 \times 10^{-118}$ .

## 2.2.2 Délka 10 km

Výsledky z osciloskopu s označením A:

- $Power[mW] = 1,503560$

NumericalBERTA: Q hodnota QNAN.

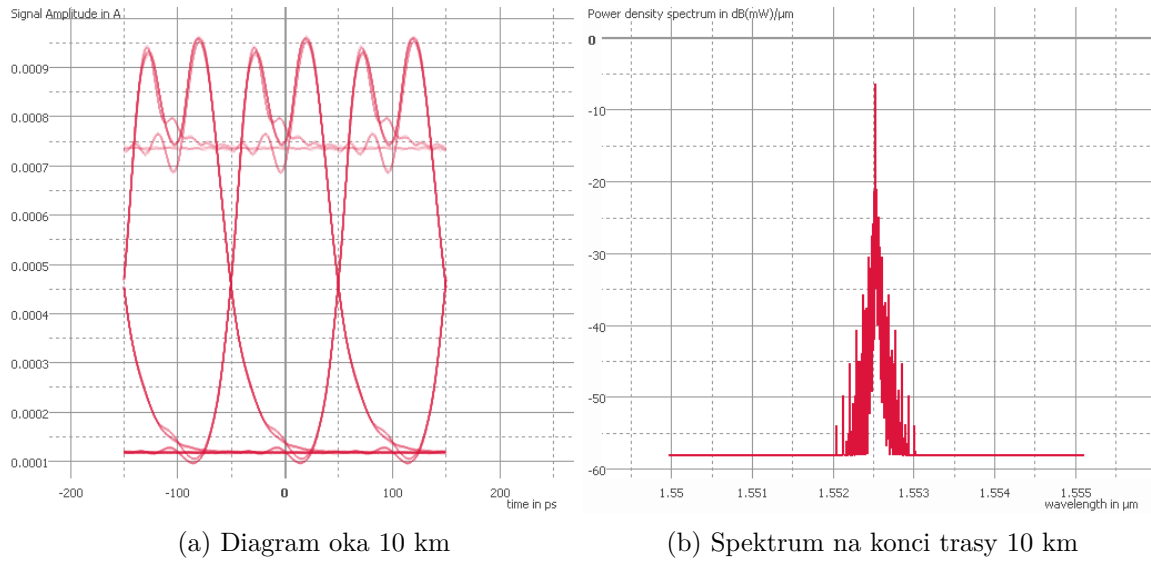
BER hodnotu nelze vypočítat.

Na konci vlákna z osciloskopu s označením B:

- $Power[mW] = 1,154365$

NumericalBERTC: Q hodnota 16,719224.

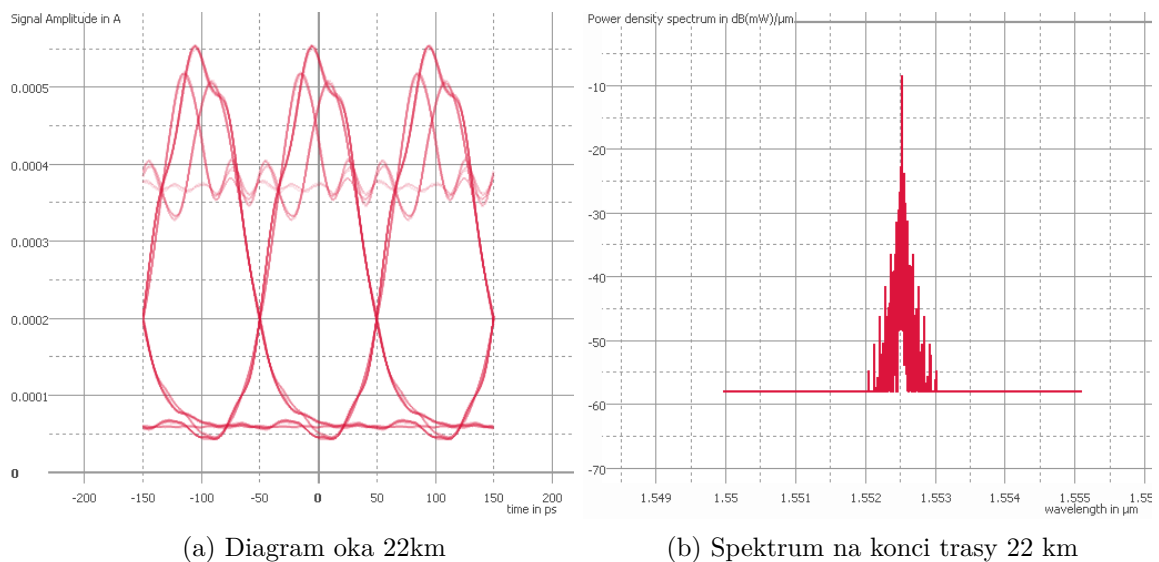
Výpočet BER hodnoty:  $BER = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{16,719224}{\sqrt{2}}\right) = 4,747374 \times 10^{-63}$ .



Obr. 2.9: Grafy pro topologii s 10 km vlákna PHOTOS (Zdroj: Vlastní zpracování)

### 2.2.3 Maximální délky stanovených parametrů

Pro porovnání s programem OptSim<sup>TM</sup> jsem převzal co nejpodobnější parametry, taktéž pro tuto topologii bylo určeno BER  $10^{-14}$ . Dle základních parametrů bylo experimentálně nastavována délka a z výsledků byly porovnávány parametry přenosu dle BER. Této hodnotě jsem se přiblížil na 22. kilometru vlákna.



Obr. 2.10: Grafy pro topologií se 22 km vlákna PHOTOS (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z osciloskopu s označením A:

- $Power[mW] = 1,503560$

NumericalBERTA: Q hodnota QNAN.

BER hodnotu nelze vypočítat.

Na konci vlákna z osciloskopu s označením B:

- $Power[mW] = 6,336346 \times 10^{-1}$

NumericalBERTC: Q hodnota 7,6574598.

Výpočet BER hodnoty:  $BER = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{7,6574598}{\sqrt{2}}\right) = 9,48233 \times 10^{-15}$ .

## 3 Vyhodnocení výsledků testovací topologie

### 3.1 OptSim™

Testovací topologie, jak již název napovídá, slouží k otestování a sblížení se s programy. V otestované topologii je zvolen velmi výkonný laser a dále ideální trasa bez dalších útlumů (spoje, sváry, atd.). To způsobilo, že topologie pro 1 km a 10 km má relativně stejné vlastnosti přenosu. Dále proběhl experimentální test dosahu této jednoduché topologie s výsledkem délky 71 km. Za největší výhody programu považuji možnost upravit graf a exportovat obrázky do vektorové grafiky. Při kontrole výsledků jsem narazil na chybu programu OptSim™. Jednalo se o zobrazení BER z diagramu oka přes osciloskop, které při 1 km i při 10 km bylo stejné a po dosazení do vzorce 1.3 by mělo při 1 km vyjít zhruba  $1,267 \times 10^{-305}$  a při 10 km  $1,81459 \times 10^{-251}$ . Tato chyba by mohla znamenat, že OptSim™ nepřipouští menší chybovost, nebo není při této hodnotě již relevantní. Odchytky od naměřených hodnot s vypočtenými jsou více než znatelné.

### 3.2 PHOTOS

Jako výhodu PHOTOSu je možné brát bloky s komplexnější nastavováním nebo lze idealizovat pomocí vložení přímo ideálních komponent za cenu absence možnosti nastavit některé parametry. Za problém považuji neintuitivní a nepřesné ovládání. Spojování bloků se nemusí podařit na první kliknutí. Nebo například OptSim™ má předdefinované běžně využívané globální proměnné, ale do PHOTOSu je nutno proměnné nejdříve nadefinovat a až pak je lze využívat. Například při nastavování přenosové rychlosti jsou měřicí prvky rozštěpené dle měřených veličin. Jeden z výše zmíněných problémů je, že z EyeAnalyzera nelze odečíst Q-faktor, ten je možno odečíst pouze z přístroje NumericalBERT. SpektrumAnalyzer má dle chování vykazovat měření výkonu na začátku a na konci trasy. Výstupem byly hodnoty QNAN, tyto parametry bylo nutno odečíst z osciloskopu jako maximální hodnotu výkonu.

S hodnotami QNAN, INF a IND je možno setkat se v programu často, a to dle manuálu ze tří důvodů [25]:

- Simulace ještě neproběhla, nebo byla vyčištěna. Výsledek nebyl ještě spočítán, nebo byl vyčištěn.
- Tlačítko „Clear Promptly“ bylo aktivováno na komponentě. To způsobilo vymazání.
- Komponenta nemohla spočítat validní integer, nebo double hodnotu. Toto může být způsobeno například při velkém zkreslení signálu, kdy otevření oka

na přijímači nemohlo být spočteno, nebo numerická optimalizace nemohla konvergovat do stabilního výsledku.

U programu PHOTOSS bylo nutno dopočítávat BER z Q faktoru dle vzorce 1.3. Pro délku 1 km vypočtená chybovost byla  $5,227739 \times 10^{-118}$ , pro 10 km  $4,747374 \times 10^{-63}$ . Tyto hodnoty jsou oproti OptSimu výrazně nižší. Rozdíl může být způsobem rozdíly v matematických modelech simulací nebo chybně nastavenými parametry simulace.

### 3.3 Shrnutí

Program PHOTOSS na podobné topologii dokázal přenést signál na výrazně menší vzdálenost. Toto může být způsobeno použitím jiného algoritmu pro vykonání simulace nebo matematických modelů implementovaných bloků. U PHOTOSSu je například i rozdílný počáteční výkon na začátku trasy. Přičemž útlumy z modulátorů byly nastaveny stejně pro oba programy. U délky 1 km je optický výkon na konci trasy o 0,04 mW vyšší než na začátku trasy. Nelze popsat proč k takovému výsledku došlo.

## 4 Návrh laboratorních úloh

### 4.1 Simulace přístupové sítě

Pasivní optická síť je typ optické sítě, která používá prvky, ve kterých není nutno použít další zdroj elektrické energie. PON sítě jsou P2M (Point-to-multipoint) a pracují výhradně na technologii TDMA. To znamená, že z výchozího bodu je připojeno větší množství uživatelů. Vstupní médium je sdílenou součástí trasy pro poskytovanou službu. V této trase se používají pouze pasivní prvky – nejčastěji rozbočovače na splnění požadavku připojení více klientů, aniž by bylo třeba využít zesilovačů či jinou úpravu optického signálu. Z tohoto důvodu není dosah tak velký jak u AON. U PON je to mezi 10–20 km.

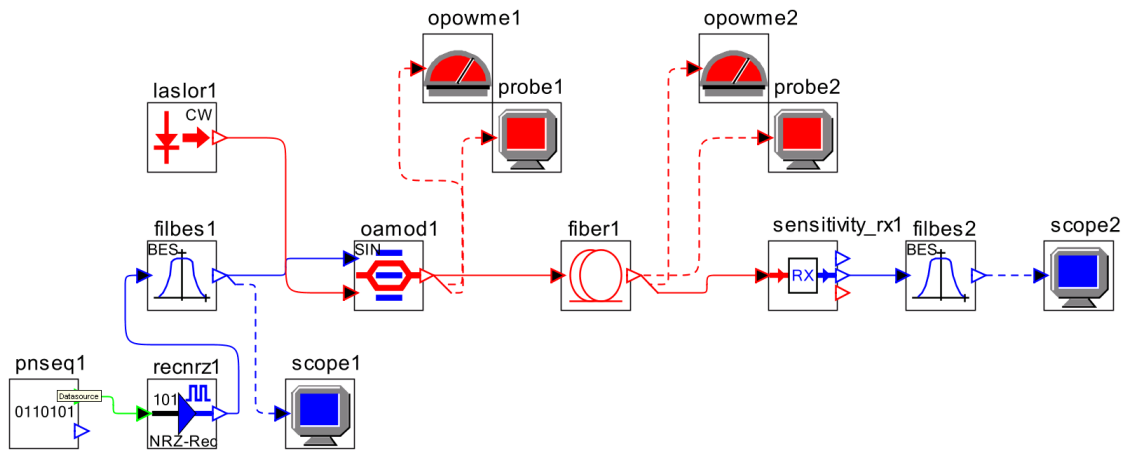
OLT (Optical Line Termination) je výchozí prvek přístupové sítě, tzv. centrální jednotka. Tento prvek je přechodným prvkem mezi přístupovou sítí a páteří sítí. Nejčastěji L2/L3 switch v PON systému. Hlavní funkcí OLT je řízení toku informací skrze ODN. Informace z OLT putují směry k uživateli downstream a od uživatele upstream.

ONU (Optical Network Unit) je koncový prvek, který převádí elektrické signály na optické. Lze si takové zařízení představit jako router s optickým WAN portem. ONU je tedy zařízením pro připojení například domácnosti k poskytovateli.

ONT (Optical Network Termination), neboli koncový terminál uživatele, funkcí vyjadřuje to samé jako ONU. Rozdílem je značení - ITU-T používá označení ONT, IEEE naopak ONU. Oboje je tedy zařízením u uživatele. Jak ONU tak ONT jsou prvky, které na straně uživatele (klienta) převádí optický signál na elektrický a pomocí strukturované kabeláže nebo bezdrátového připojení vytváří možnost připojování klientů do sítě. ODN (Optical Distribution Network) je nedílnou součástí systému PON a jedná se o přenosové médium mezi ONU a OLT. Součástí jsou konektory, optický kabel a sváry.

### 4.1.1 Zadání a realizace úlohy v programu OptSim™

Vytvořte zapojení odpovídající 10G pasivní optické síti a zaměřte se na základní parametry optického přenosu: útlum trasy, měrný útlum vlákna, bitová chybovost, vliv dělicího poměru na bitovou chybovost apod.



Obr. 4.1: Topologie v úloze 1

File -> New -> Sample-mode project.

Potvrďte umístění projektu. V parametrech simulace nastavte referenční rychlost (reference bitrate) 10 Gbit a potvrďte. OptSim tuto hodnotu nyní využívá jako re-fbrt, která se automaticky propíše do všech prvků, které bitrate nastavení vyžadují. Rozklikněte Model Palettes a vkládejte prvky dle schématu. Vloženo bude následující: data source, NRZ rectangular driver,  $\sin^2$  amplitude modulator, 2x Besselův filtr, 2x probe, fiber, 2x optical power meter, cw Lorentzian laser, sensitivity optical receiver.

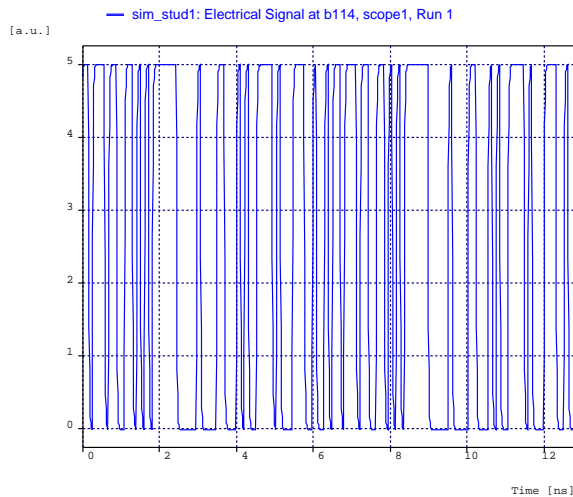
**Otazník přes blok znamená, že nejsou zadané parametry daného bloku.** Je nutno nastavit prvky. Pokud není prvek zmíněn, ponechte výchozí nastavení (stačí odklepnout ok).

Délku vlákna nastavte na 10 km. Ostatní nastavení prvků nechte vše výchozí.

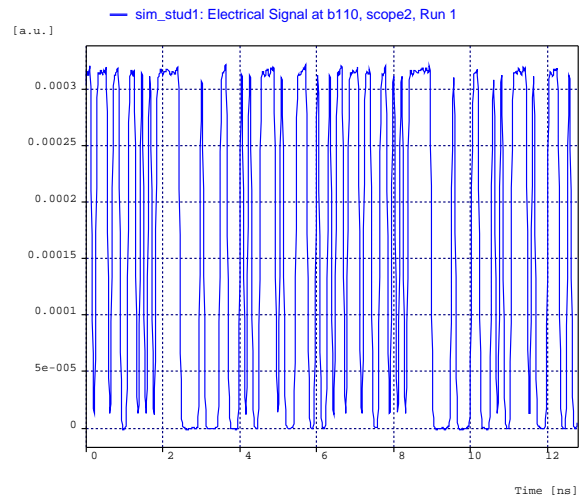
Spuštění simulace se provádí přes tlačítko „GO“ v horní liště. „Start single run“ spustí simulaci. Nyní projděte výstupy z měřících přístrojů.

## 4.1.2 Výsledky OptSim™

Na obrázcích 4.2 je vidět jak vypadá NRZ signál na straně vysílače a přijímače. Signál má celkově vyšší kvalitu což je znázorněno na obrázku diagramu oka 4.3:

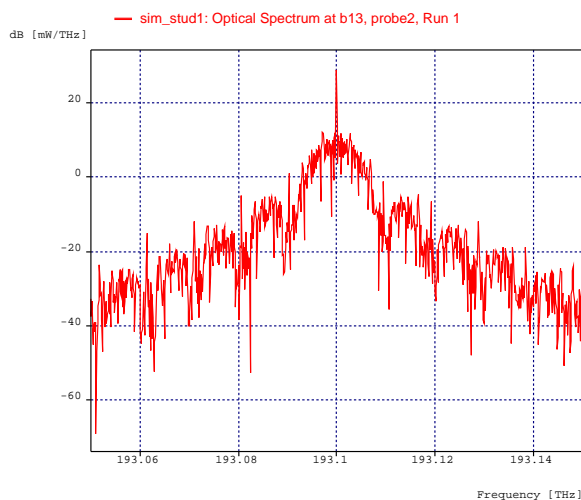


(a) Vstupní signál - scope1

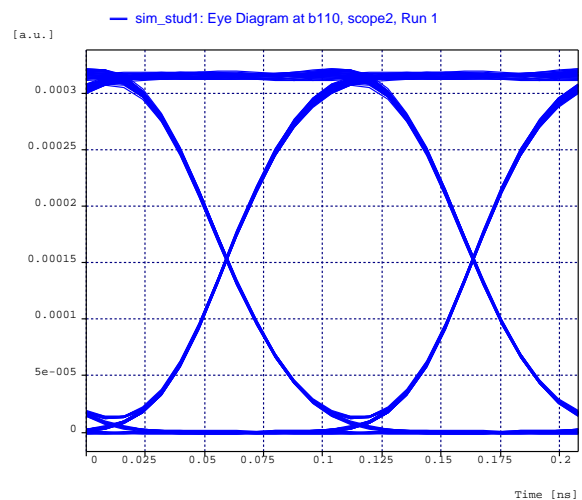


(b) Výstupní signál - scope2

Obr. 4.2: Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Výstupní spektrum - probe2



(b) Výstupní diagram oka - scope2

Obr. 4.3: Výstupní signál oko a optické spektrum. (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

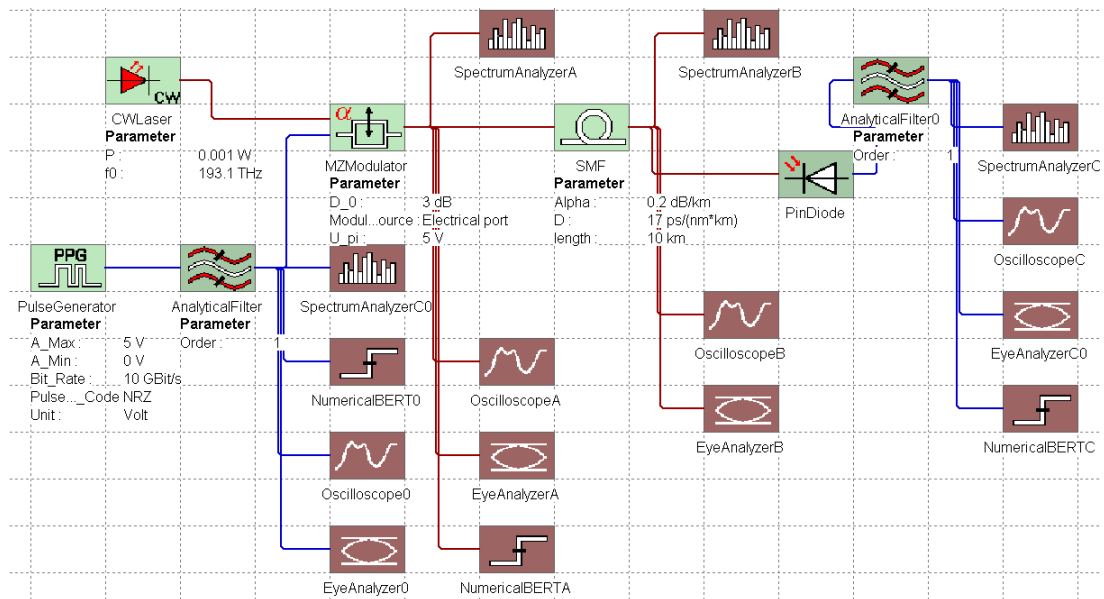
- Power [dBm] = -5,928
- Power [mW] = 0,255E+00

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

- Power [dBm] = -7,975
- Power [mW] = 0,159E+00

### 4.1.3 Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS

Otevřete program PHOTOSS. File -> New -> New simulation. Parametry : Center frequency 193,1, Ref band 100 GHZ. Bitrate 10Gbit/s .

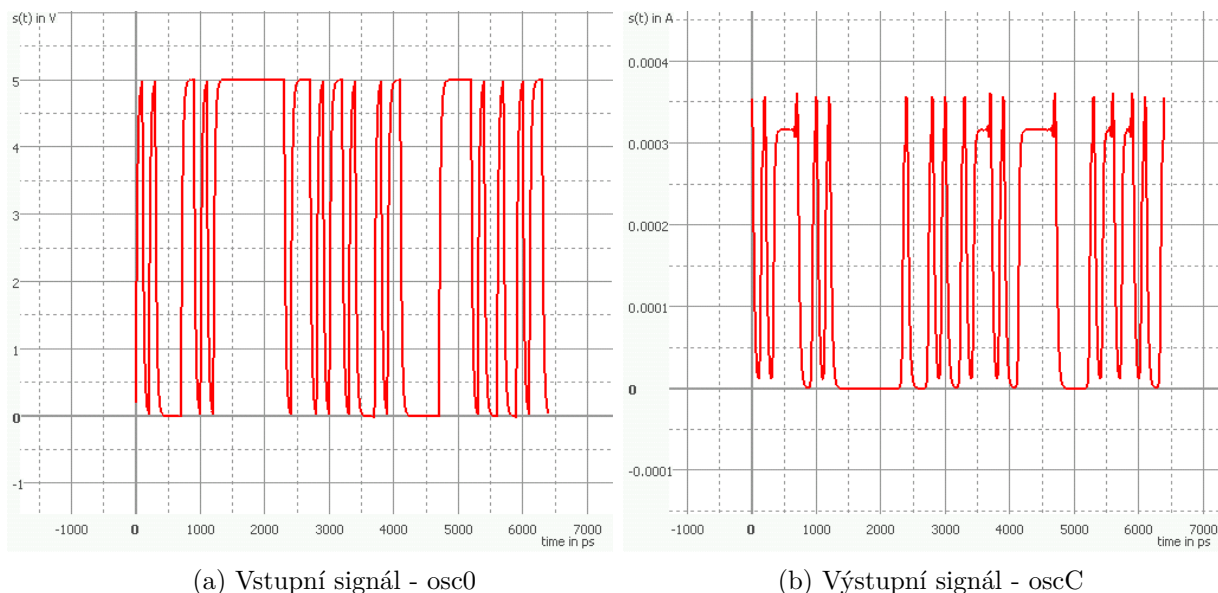


Obr. 4.4: Topologie v programu PHOTOSS

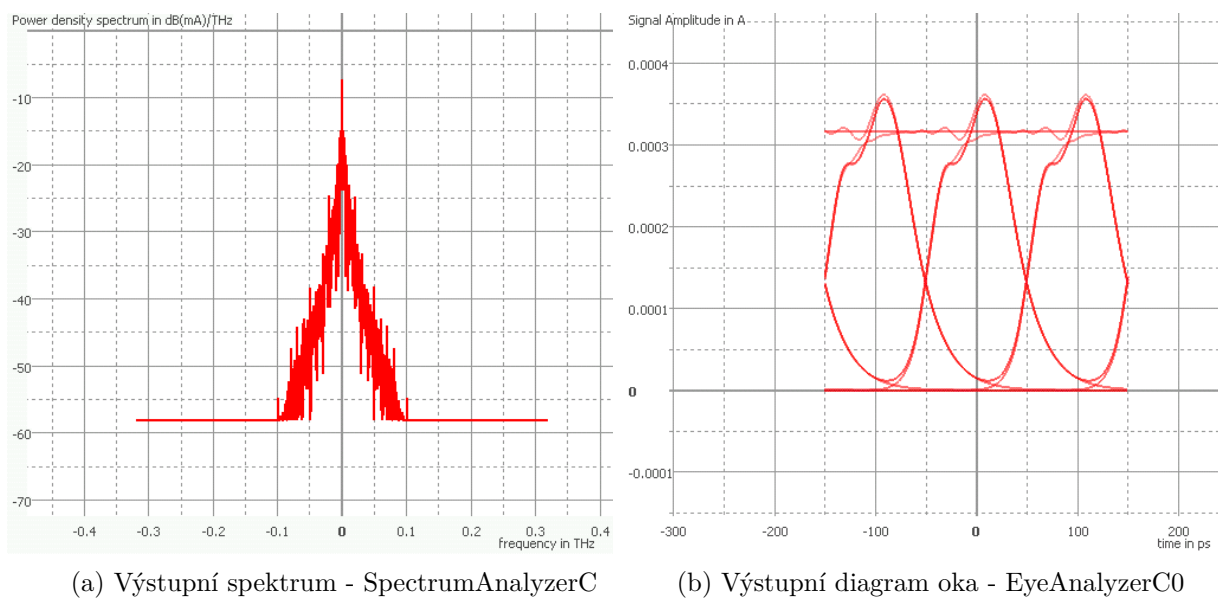
- CWLaser:  $P = 0,001 \text{ W}$ ,  $f_0 = 193,1 \text{ THz}$ .
- Pulse Gen : Unit Volt,  $A_{\text{Max}} = 5\text{V}$ ,  $A_{\text{Min}} = 0\text{V}$ ,  $\text{Bit\_Rate} = 10\text{Gbit}$ ,
- MZModulator :  $U_0 = 0\text{V}$  ,  $U_{\text{PI}} = 5\text{V}$ , Modulation Source Electrical port.
- SMF = 10 km.
- Analytical filter: Mode electrical. Odstraňte spojení z vlákna a po nastavení spojte na výstup bloku PinDiode.

#### 4.1.4 Výsledky PHOTOSS

Výsledkem jsou grafy zobrazující signál NRZ na přijímací a vysílací straně, kde na přijímací straně je signál v Ampérech, proto je signál invertovaný.



Obr. 4.5: Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 4.6: Výstupní signál oko a spektrum. (Zdroj: Vlastní zpracování)

Optické výkony na vstupu do optického vlákna(OscA):

- max. Value: 0,501 mW

Optické výkony na výstupu z optického vlákna(OscB):

- max. Value: 0,422 mW

### 4.1.5 Studentské rozšíření

OptSim<sup>TM</sup>: Vysvětlete jakou má funkci Besselův filtr.

PHOTOSS: Zajistěte vylepšení signálu. V dané úloze na výstupu jsou zákmity v signálu (OscilloscopeC -> Oscilloscope Amplitude). Jakým způsobem lze tento problém vyřešit?

### 4.1.6 Závěr úlohy

Úloha byla vytvořena, aby student poznal prostředí simulačního programu OptSim<sup>TM</sup> a PHOTOSS. Typické proklikání jednotlivých komponent by mělo zajistit, aby student dostal do povědomí možnosti nastavení, které budou vyžadovány v další úloze.

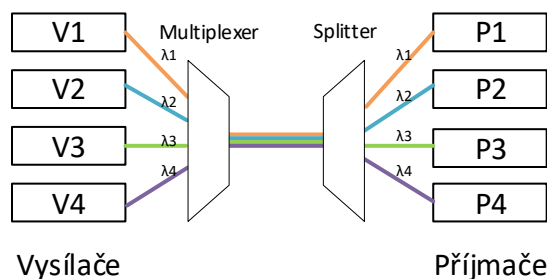
### 4.1.7 Otázky k úloze

1. Co znamenají zkratky OLT, ONU, ONT?
2. Které prvky ze schématu vytváří OLT a které ONU?
3. Jaký je celkový útlum trasy?
4. Definujte rozdíl mezi měrným útlumem vlákna a útlumem trasy.

## 4.2 Simulace transportní sítě

### WDM

Wavelength-division multiplexing je vlnový multiplex, který představuje technologii spojování signálů pomocí vlnových délek. Ty mohou souběžně probíhat optickým vláknem, aniž by se ovlivňovaly. Jedná se tedy o frekvenční multiplex. Na začátku trasy se nachází multiplexor, který má za úkol navázat tyto vlnové délky do společného média - vlákna. Na konci se nachází demultiplexor - splitter, který vlnové délky rozděluje ke klientům. WDM pracuje jak na jednovidovém tak na vícevidovém vlákně. Počet vlnových délek je škálovatelný.



Obr. 4.7: Vlnový multiplex (Převzato a upraveno z [14])

### WWDM

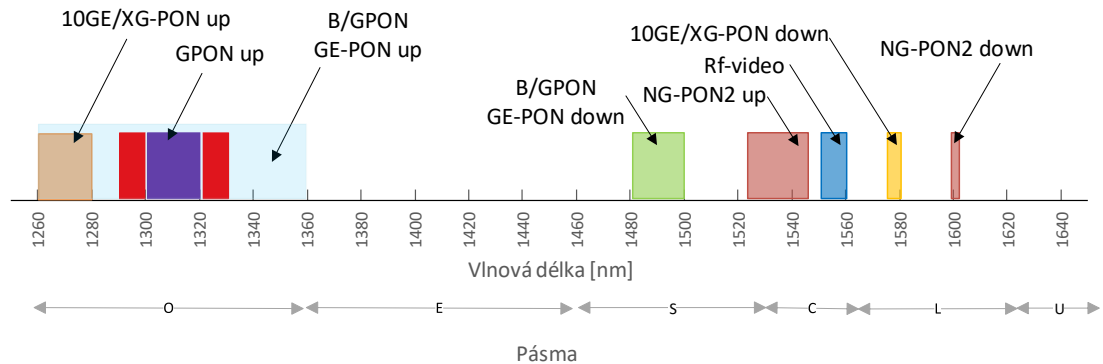
„WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing), tzv. „široký“ vlnový multiplex většinou používá čtyři vlnové délky v oblasti 850 nm (vícevidová optická vlákna) nebo v oblasti 1300 a 1310 nm (vícevidová nebo jednovidová optická vlákna). Jednotlivé vlnové délky WWDM multiplexu mají typicky odstup 25 nm.“ [15, str. 133]

### CWDM

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) tzv. „hrubý“ vlnový multiplex vznikla jako levnější varianta DWDM. Technologie CWDM je forma vlnového multiplexu, která využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie DWDM. V doporučení ITU-T G.694.2 [16, str. 3] je stanoveno osmnáct vlnových délek s kanálovými rozestupy 20 nm a s tolerancí  $\pm 6$ –7 nm. Oproti DWDM jsou náklady na technologii menší například při pořízení vysílačů. Ovšem z toho vyplývá i nižší počet použitelných kanálů.

## DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) tzv. „hustý“ vlnový multiplex používá minimální odstupy mezi jednotlivými kanály, takže umí do jednoho vlákna implementovat desítky vlnových délek. V těchto případech se využívá jednovidových laserů a úzkopásmových interferenčních filtrů. Při tom je nezbytné zajistit dostatečnou kmitočtovou stabilitu a extrémně úzkou spektrální charakteristiku vyzářovaných vlnových délek. V doporučení ITU—T G.694.1 [17, str. 2] pro technickou aplikaci tohoto systému je definováno několik variant rozestupů mezi kanály, a to 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz a 100 GHz. Referenční kmitočet od kterého se vytváří další kanály je dle výše zmíněného doporučení 193,1 THz. DWDM systémy mohou být provozovány v oblasti vlnových délek S,C a L optického pásma.



Obr. 4.8: Pásma s vyznačením PON technologií (Zdroj: Vlastní zpracování)

ITU pro WDM definuje rozsahy frekvencí, tyto frekvenční pásma jsou:

- pásmo O (Original): vlnové délky 1260-1360 nm,
- pásmo E (Extended): vlnové délky 1360-1460 nm,
- pásmo S (Short): vlnové délky 1460-1530 nm,
- pásmo C (Conventional): vlnové délky 1530-1565 nm,
- pásmo L (Long): vlnové délky 1565-1625 nm,
- pásmo U (Ultra-Long): vlnové délky 1625-1675 nm.

## Útlumy v trase NG-PON2

Součástí doporučení pro NG-PON2 je tabulka 4.1, ve které jsou třídy s doporučením pro takzvanou útlumovou bilanci. Třída N je definicí pro Nominal (jmenovitá) a třída útlumu E je definicí pro Extended (rozšířená).

Tab. 4.1: Tabulka útlumových tříd NG-PON2

	N1	N2	E1	E2
Min. útlum optické trasy	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Max. útlum optické trasy	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB
Max. diferenční útlum optické trasy	15 dB			

ODN zahrnující zesilovací prvky, slučovače optických signálů nebo rozdělovače s malým útlumem mohou mít útlum menší než je deklarovaná minimální hodnota. V takovém případě musí ODN zajistit opatření (například optickým atenuátorem), aby garantovala minimální optický útlum v dané útlumové třídě, a zajistila tak prevenci degradace BER nebo potenciálnímu poškození přijímače.

### Parametry optického přijímače a vysílače pro NG-PON2

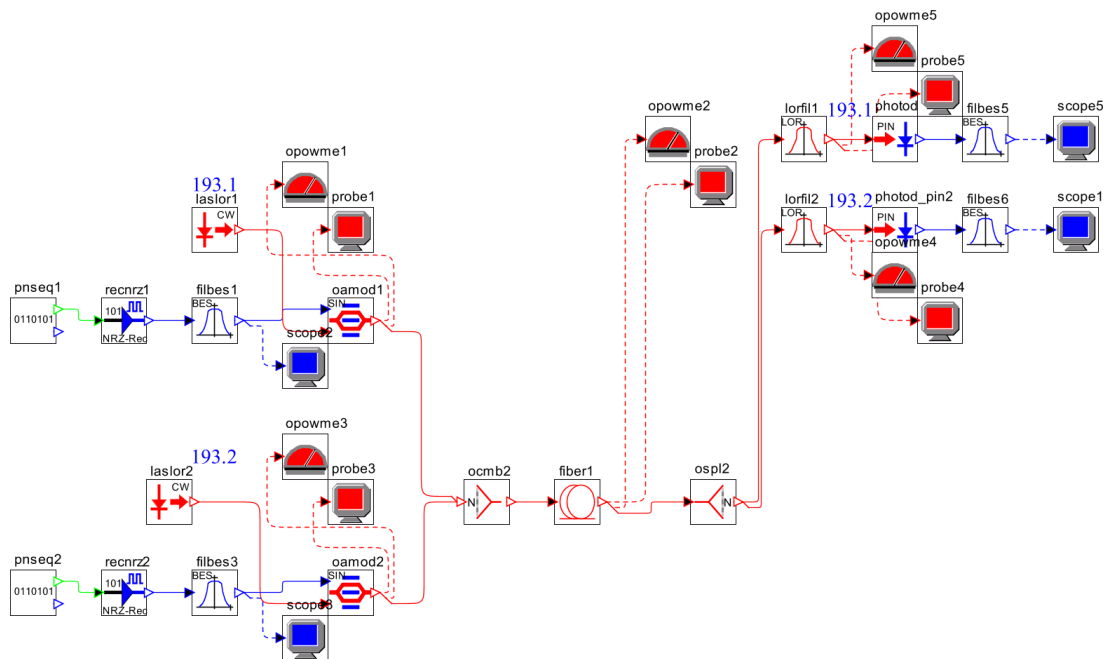
V definici ITU-T G989.2 je také popis parametrů pro to, jak by měl vypadat přijímač a vysílač optického signálu. V tabulce 4.2 jsou zmíněné parametry pro sestupný směr při 9,95328 Gbit/s.

Tab. 4.2: Parametry vysílače a přijímače definované v sestupném směru

Vysílač					
	Jednotka	Hodnota			
Nominální rychlost linky	Gbit/s	9,95328			
Vlnová délka – pásmo	nm	1596–1603			
Rozestup mezi kanály	GHz	100			
Linkový kód	–	NRZ			
ODN třída		N1	N2	E1	E2
Průměrný minimální výkon	dBm	3	5	7	9
Průměrný maximální výkon	dBm	7	9	11	11
Přijímač					
Max. odrazivost	dB	–20			
Referenční BER	–	$10^{-4}$			
Útlumová třída		N1	N2	E1	E2
Min. cit. pro ref. BER	dBm	–28	–28	–28	–28
Max. cit. pro ref. BER	dBm	–7	–7	–7	–9

## 4.2.1 Zadání a realizace úlohy v programu OptSim™

Vytvořte DWDM topologii v programu OptSim™ dle níže uvedeného postupu. Porovnejte signály, spektra a diagramy oka na začátku a na konci trasy.



Obr. 4.9: Topologie v úloze 2

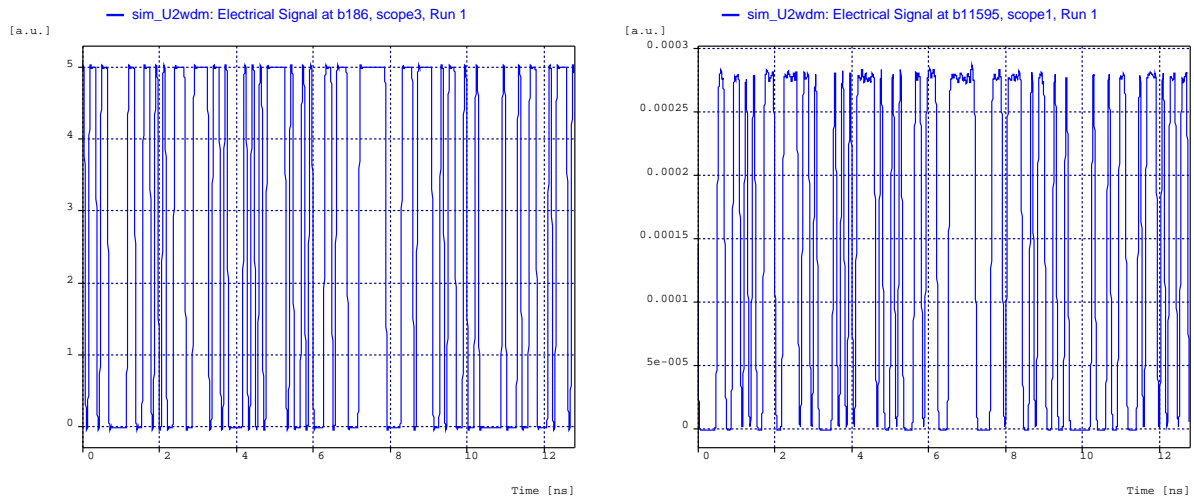
Otevřete U2wdm.moml a uložte jej jako nový projekt. V této úloze je třeba rozšířit do DWDM se 100 GHz rozestupem mezi kanály (využití pásma C). V nastavení parametrů nastavíme Lower limit 192,6 a Upper limit 193,55 THz. Center frequency 193.1 THz. Rychlost 10 Gbit/s jako u předchozí úlohy. Parametry zapojení nastavte dle následujících parametrů:

- CWLaser:  $P = 0,001$  W,  $f_0 = 193,1$  THz.
- Pulse Gen : Unit Volt,  $A\_Max = 5$  V,  $A\_Min = 0$  V, Bit\_Rate = 10 Gbit,
- MZModulator :  $U\_0 = 0$  V ,  $U\_PI = 5$  V, Modulation Source Electrical port.
- SMF = 10 km.
- Analytical filter : Mode electrical.
- Lorentzian optical filter : Notch Filter = Bandpass, Number of stages = 4, center frequency = 193,1 THz, -3 dB twosided Bandwidth 30 GHz.

Na přímou selekci kanálu byl použit lorentzovský optický filtr, ten funguje jako pásmová propust s nastavenou středovou frekvencí přijímaného kanálu a pásmem propusti poklesu o 3 dB je 30 GHz.

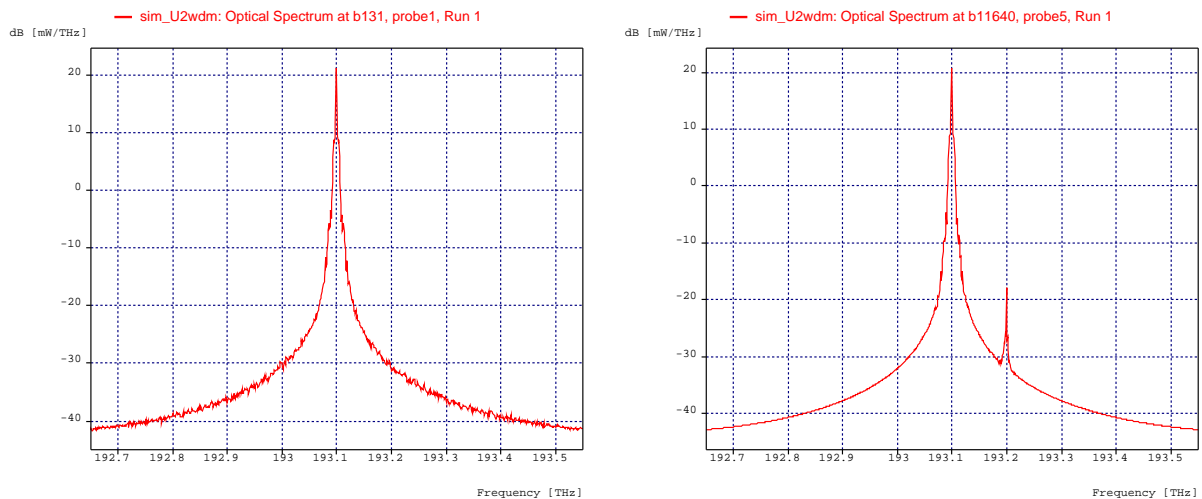
## 4.2.2 Výsledky OptSim™

Na obrázcích níže jsou zobrazeny signály na vstupu a výstupu. U NRZ jsou vidět lehké zákmity, které mají vliv na kvalitu signálu. V diagramu oka se projevily jen minimálně. U diagramu zobrazující spektrum na měřicím přístroji probe5 je vidět utlumený kanál na 193.2 THz.



(a) Vstupní signál na frekvenci 193,2 THz - scope3 (b) Výstupní signál na frekvenci 193,2 THz - scope1

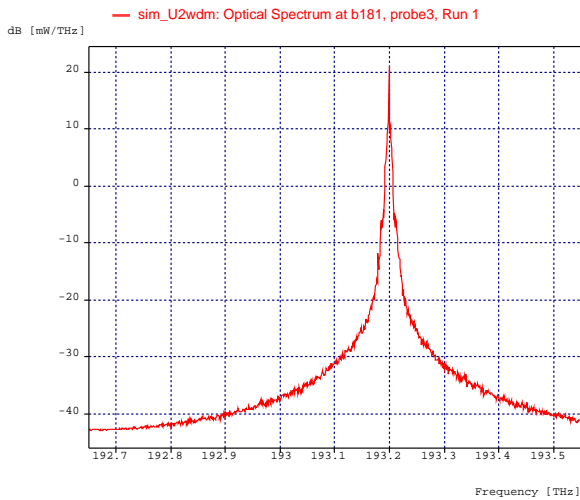
Obr. 4.10: Signálové porovnání na začátku a konci trasy pro frekvenci 193,2 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)



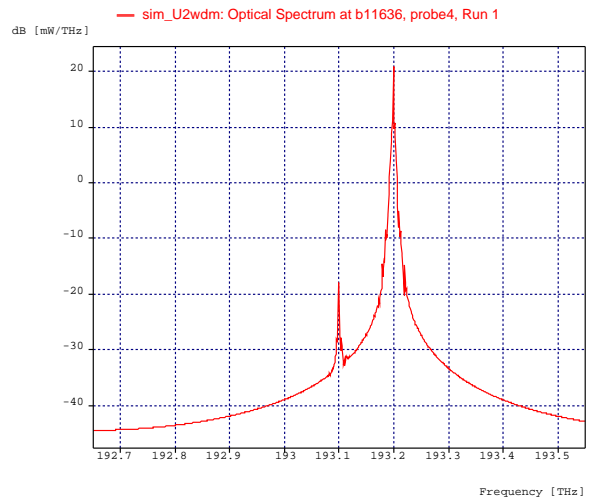
(a) Vstupní spektrum probe1

(b) Výstupní spektrum probe5

Obr. 4.11: Vstupní a výstupní optické spektrum kanálu 193.1 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)

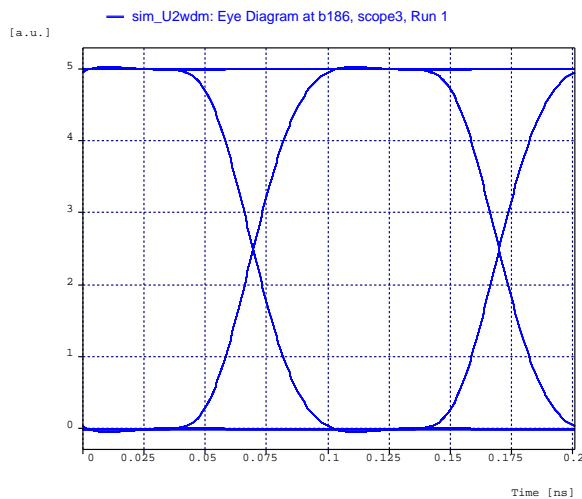


(a) Vstupní signál 193,2 THz - probe3

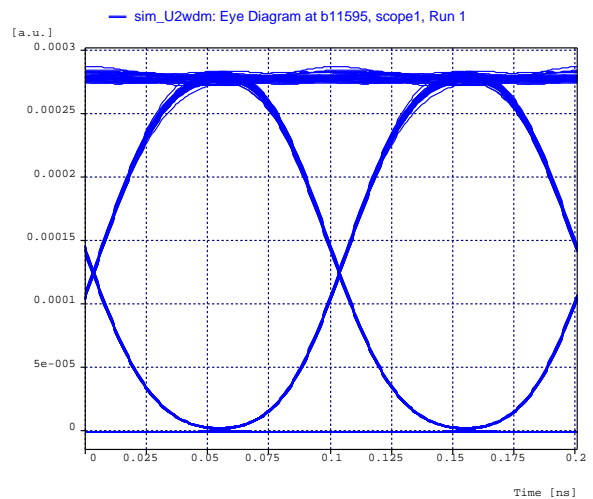


(b) Výstupní signál 193,2 THz - probe4

Obr. 4.12: Vstupní a výstupní optické spektrum kanálu 193.2 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Vstupní diagram oka - scope3



(b) Výstupní diagram oka - scope1

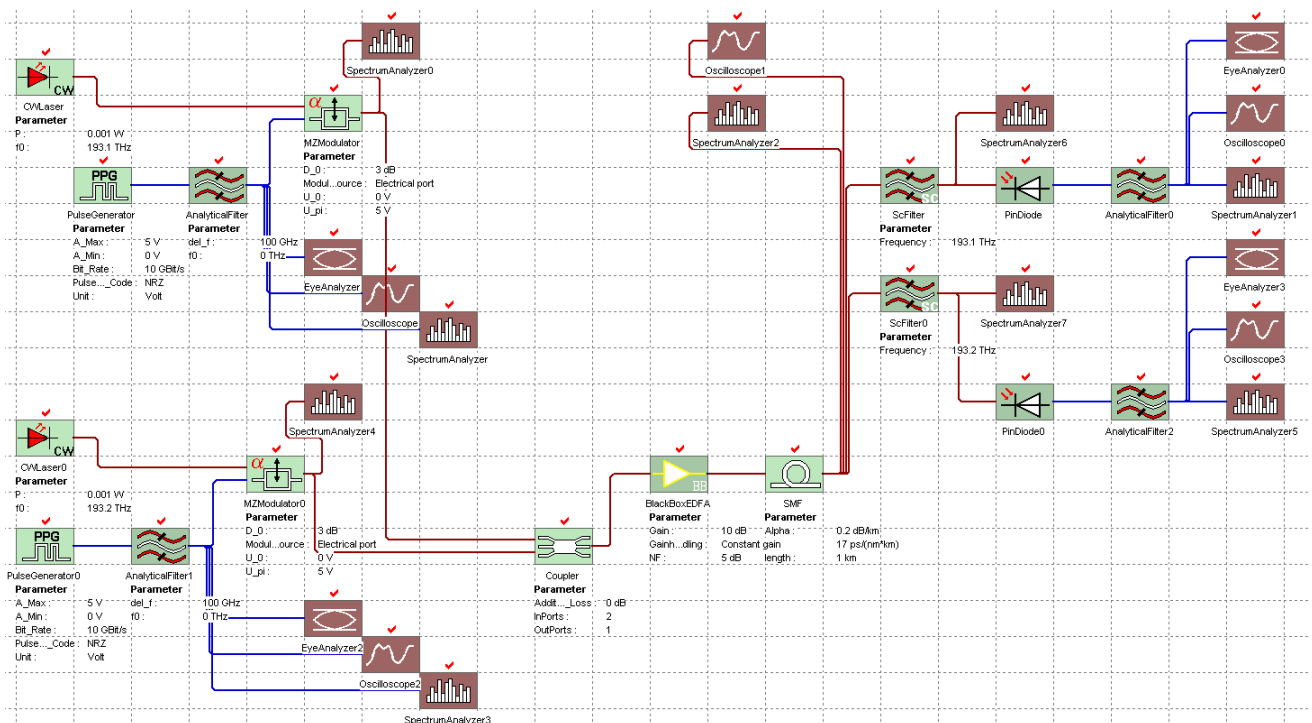
Obr. 4.13: Vstupní a výstupní oko (Zdroj: Vlastní zpracování)

### 4.2.3 Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS

Vytvořte DWDM topologii v programu PHOTOSS dle níže uvedeného postupu. Porovnejte signály, spektra a diagramy oka na začátku a na konci trasy.

Otevřete program PHOTOSS a přes file->open zvolte „U2 wdm vychozi.pho“. Uložte jako přes save as do souboru s jiným názvem než „U2 wdm vychozi.pho“ (nepřepisujte jej). V nastavení simulace je nutno nastavit metodu simulace na Separated Channels. Díky tomuto nastavení lze použít jednoduchý filtr na selekci kanálu (SC filter). Nastavíme Center frequency 193,1 THz. Ref bitrate 10 Gbit/s. Ref bandwidth 100 GHz. S každým dalším kanálem je třeba upravit coupler a přidat mu vstupní port (Inport).

Dále upravte topologii podle schématu 4.14:

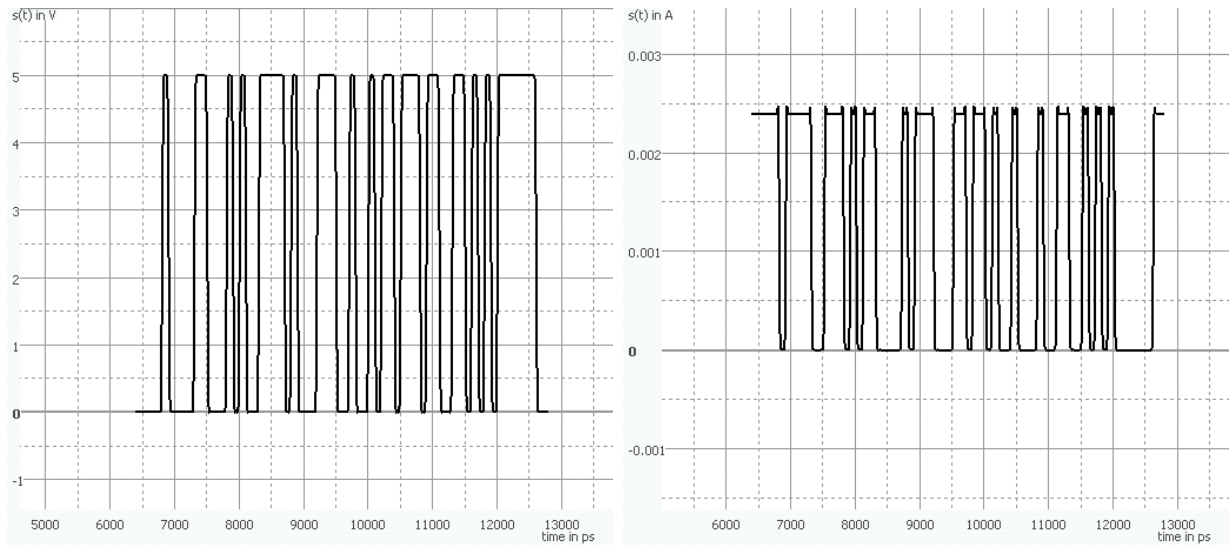


Obr. 4.14: PHOTOSS topologie v úloze 2

Parametry použité v úloze:

- CWLaser:  $P = 0,001 \text{ W}$ ,  $f_0 = 193,1 \text{ THz}$ .
- Pulse Gen: Unit = Volt, Pulse\_code = NRZ, A\_Max = 5V, A\_Min = 0V, Bit\_Rate = 10Gbit,
- MZModulator:  $U_0 = 0\text{V}$ ,  $U_{PI} = 5\text{V}$ , Modulation Source Electrical port.
- Analytical filter,0: Mode electrical, type Bessel, del\_f = 100GHz.
- SMF: lenght = 1 km, alpha = 0,2dB/km.
- coupler: Additional\_loss = 0dB, InPorts dle potřeby, outport = 1.
- BlackBoxEDFA: Gain 10dB, NF = 5dB. ScFilter: 193.1THz.

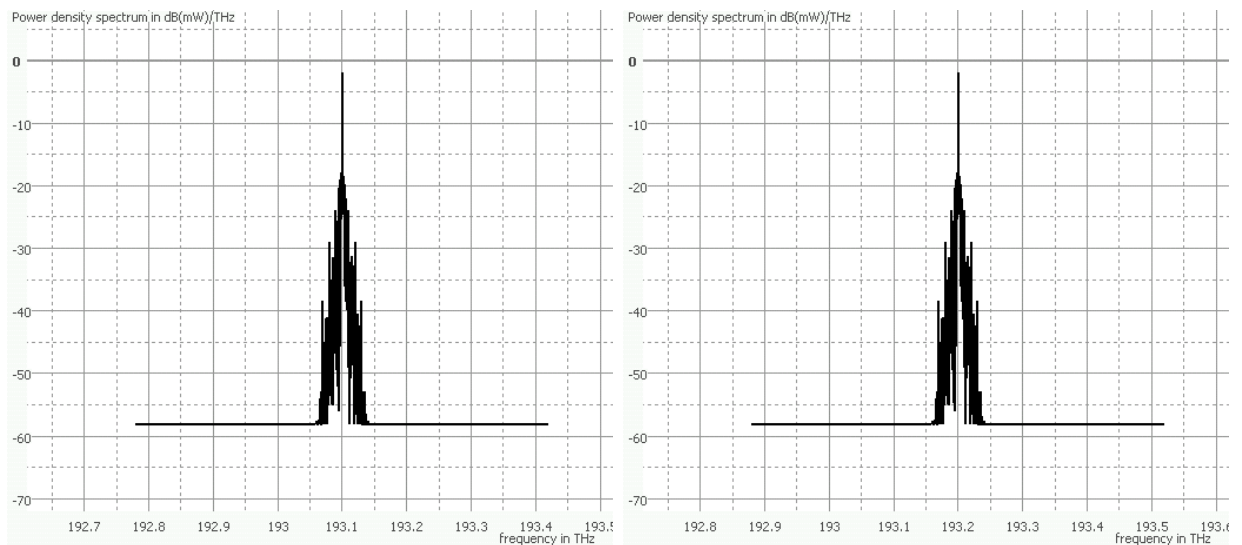
## 4.2.4 Výsledky PHOTOSS



(a) Vstupní signál na 193,1 THz - Oscilloscope

(b) Výstupní signál na 193,1 THz - Oscilloscope0

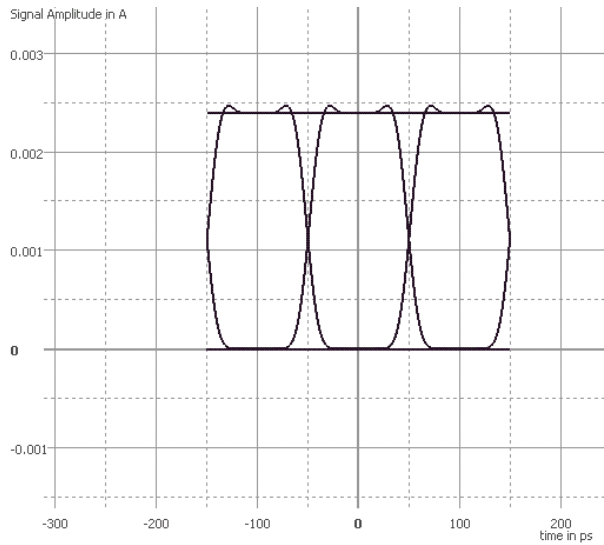
Obr. 4.15: Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)



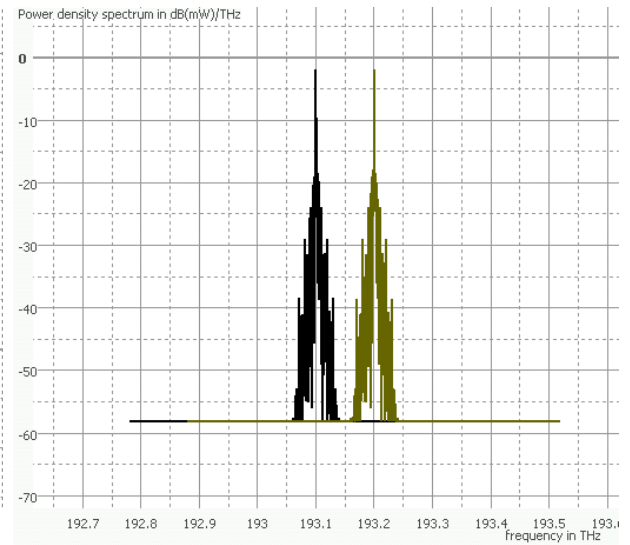
(a) Výstupní spektrum SpectrumAnalyzer6

(b) Výstupní spektrum SpectrumAnalyzer7

Obr. 4.16: Výstupní spektrum přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Výstupní spektrum na Eye0



(b) Výstupní spektrum na konci vlákna

Obr. 4.17: Spektrum na konci vlákna a diagram oka na konci přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)

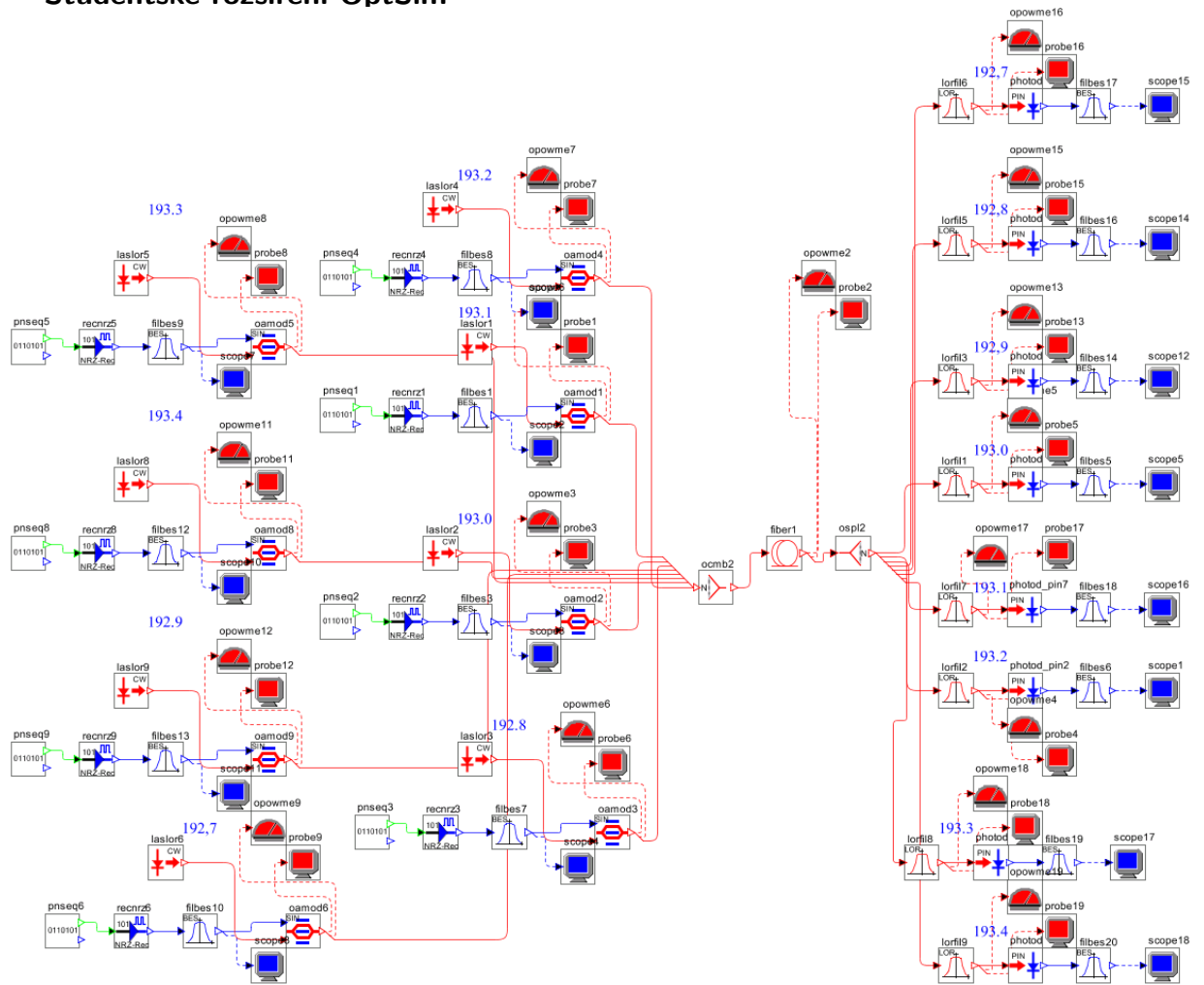
### Rozšíření PHOTOSS

Po odsimulování zjistěte, jak se změní výkonová charakteristika při změně délky vlákna na 10 km.

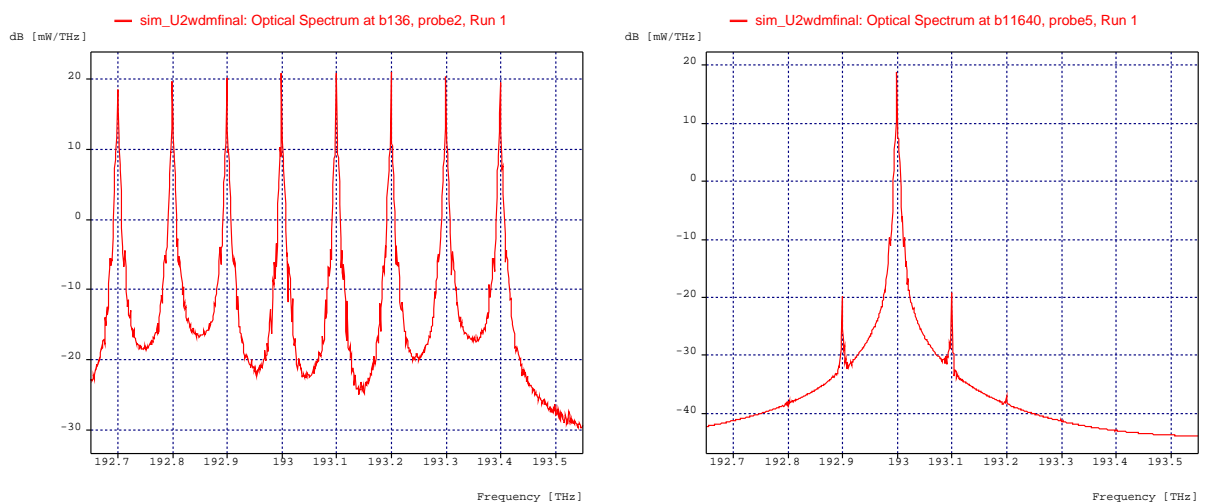
### 4.2.5 Studentské rozšíření

Ve specifikovaném rozsahu 192,6 – 193,55 THz rozšířte do 8 kanálů DWDM s rozestupem 100 GHz.

# Studentské rozšíření OptSim™



Obr. 4.18: Topologie v úloze 2 – studentské rozšíření OptSim™

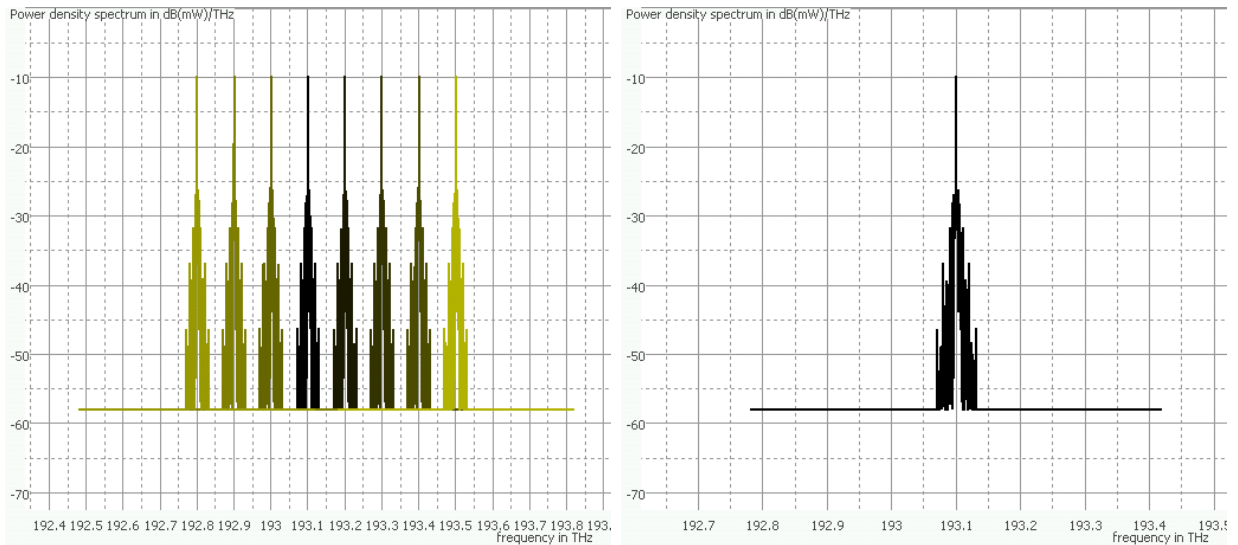


(a) Výstupní spektrum – probe2

(b) Výstupní spektrum kanálu – probe5

Obr. 4.19: Výstupní optické spektrum WDM OptSim™ (Zdroj: Vlastní zpracování)





(a) Výstupní spektrum celkové – SpectrumAnalyzer0  
 (b) Výstupní spektrum kanálu – SpectrumAnalyzer5

Obr. 4.21: Výstupní optické spektrum (Zdroj: Vlastní zpracování)

#### 4.2.6 Závěr úlohy

Student si v úloze odzkouší, že WDM je technologie škálování signálů pomocí vlnových délek.

#### 4.2.7 Otázky k úloze

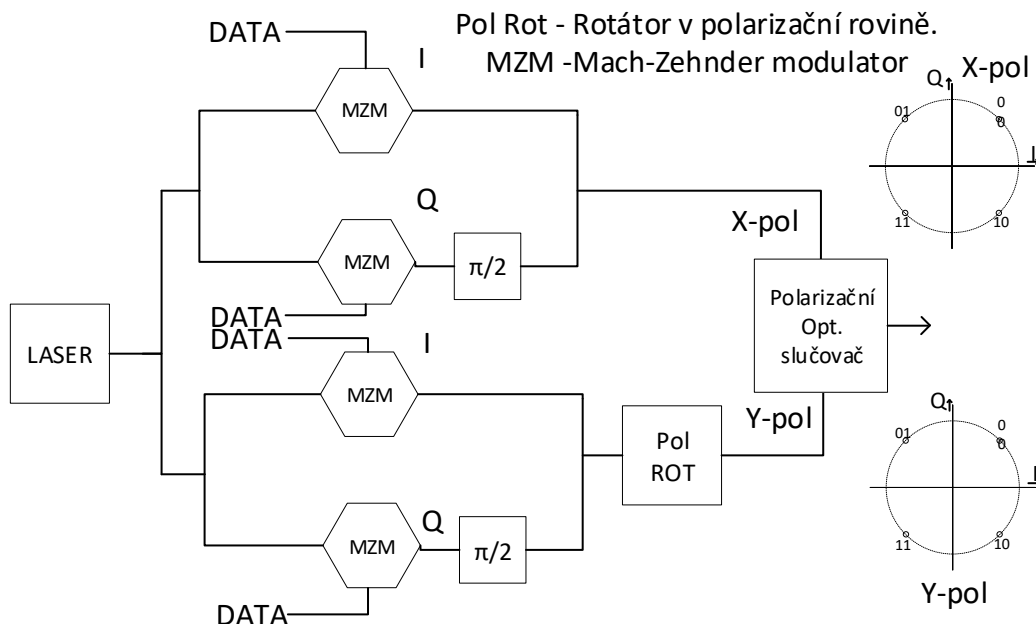
1. Porovnejte DWDM a CWDM. Jaké jsou hlavní rozdíly mezi těmito technologiemi?
2. Proč je důležité potlačení vedlejších vlnových délek v přijímači? Vysvětlete.
3. Jaká je aktuální rychlost, po rozšíření na 8 kanálů, kterou může jeden zákazník přijímat? Uvažujte, že by měl alokovaných všech 8 kanálů.
4. Jakým jiným způsobem než je škálováním WDM lze ještě navýšit rychlost?

## 4.3 Simulace koherentního přenosu (PM-QPSK)

### PM-QPSK

Z anglického názvu Polarization multiplexed - Quadrature Phase-Shift Keying. Někdy označována jako DP-QPSK (dual polarization). Jak název vyjadřuje, jde o modulaci QPSK obohacenou o další polarizační rozměr ve vlákně. PM-QPSK je rozšířený koherentní způsob modulace, která pro svoji funkci na přijímači vyžaduje znalost fáze vysílaného signálu.

Modulátor PM-QPSK je složen ze dvou QPSK modulátorů. Výstupy z těchto modulátorů prochází polarizačním slučovačem dvou signálů (ve schématu 4.22 rozděleno na opt. slučovač a ve větvi Y-polarizace jako rotátor polarizace).



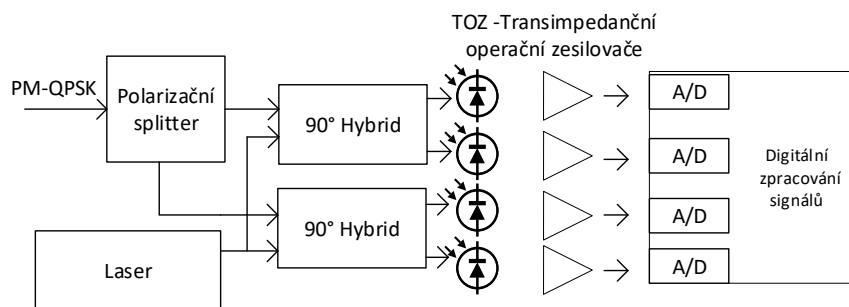
Obr. 4.22: PM-QPSK modulátor/vysílač (Zdroj: Převzato a upraveno z [11])

Obrázek 4.23 znázorňuje funkční blokové schéma moderního optického koherentního přijímače. Příchozí optický signál prochází polarizačním rozdělovačem (polarizační splitter), který rozděluje signál na dva ortogonální polarizační signály. Tento rozdělovač vytvoří dva signály, z nichž je jeden polarizovaný v ose X a druhý v ose Y. Každý z nich je předán do 90-ti stupňového optického hybridního obvodu. Tento obvod umožňuje, aby složky I a Q fáze signálu byly extrahovány v důsledku známého signálu generovaného místním oscilátorem. Tento proces extrakce umožňuje lokální oscilátorový laser, který je podstatou koherentní detekce. Fázové signály se

nyní převedou z optické domény na elektronickou doménu pomocí série vyvážených fotodetektorů. Každý z těchto signálů se skládá ze tří prvků:

- úroveň šumu,
- element digitálního převodníku představující výkon lokálního oscilátoru,
- koherentní signál.

Pokud by byl použit jediný fotodetektor, bylo by nutné použít lokální oscilátorový laser o 20 až 25 decibelů (dB) větší výkon než příchozí signál, aby výsledná signál mohl dominovat oproti generovanému šumu. Pomocí vyváženého fotodetektoru je možné použít mnohem méně výkonný lokální oscilátor. Za účelem obnovy přenášených bitů se provádí synchronizace nosné fáze v bloku zpracování signálu [11].



Obr. 4.23: PM-QPSK přijímač (Zdroj: Převezato a upraveno z [11])

Kromě obrovského zvýšení citlivosti detektoru může být koherentní detektor laděn tak, aby přijímal pouze určitou vlnovou délku, což umožňuje vysokou úroveň selekce signálu z kanálů WDM.

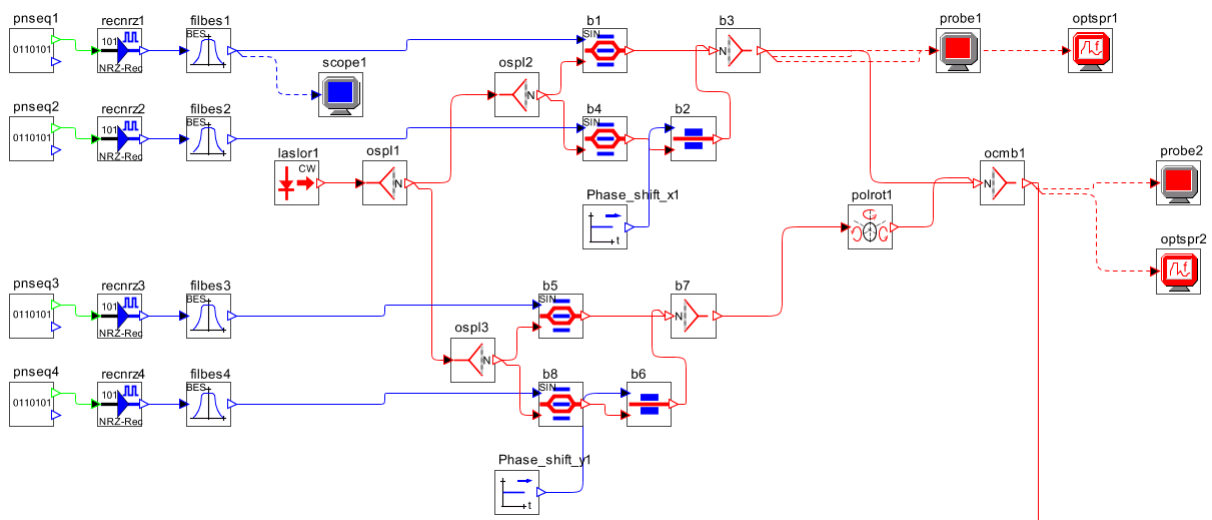
### 4.3.1 Zadání a realizace úlohy v programu OptSim™

Vytvořte v programu OptSim™ PM-QPSK vysílač a přijímač se vzdáleností 1 km. File -> New -> Sample-mode project.

Zvolte a potvrďte umístění projektu. Parametry simulace (time domain) nastavte:

- lower limit 192,8992 THz, upper limit 193,1008 THz, center frequency 193 THz, vbs Bandwidth 0,2016 THz.
- reference bitrate = 28 Gbit/s, samples per bit = 9, total simulated time-span = 60ns, optical field representation = dual polarization.

Strana vysílače:



Obr. 4.24: PM-QPSK modulátor OptSim™

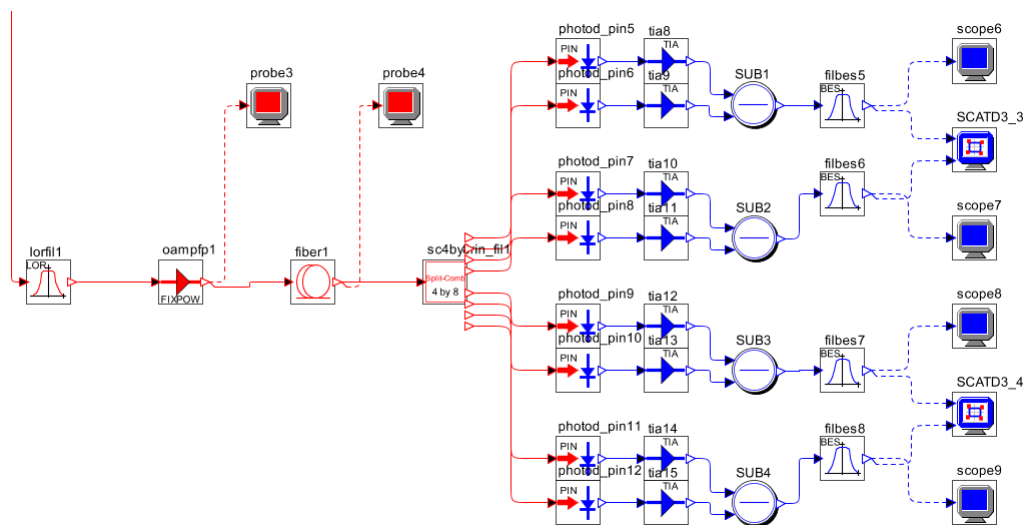
S parametry:

- pnseq1: bitrate = 28Gbit/s, PseudoRandomSequence Manual, degree = 11, Polynomial Type Deterministic, Polynomial number = 1; v advanced záložce: bit edge Deterministic, bit edge with respect to Sim start time = 0, starting time = 0, starting point 0.
- pnseq2: bitrate = 28Gbit/s, PseudoRandomSequence Manual, degree = 11, Polynomial Type Deterministic, Polynomial number = 2; v advanced záložce: bit edge Deterministic, bit edge with respect to Sim start time = 0, starting time = 512, starting point 0.
- pnseq3: bitrate = 28Gbit/s, PseudoRandomSequence Manual, degree = 11, Polynomial Type Deterministic, Polynomial number = 3; v advanced záložce: bit edge Deterministic, bit edge with respect to Sim start time = 0, starting time = 1024, starting point 0.
- pnseq4: bitrate = 28Gbit/s, PseudoRandomSequence Manual, degree = 11, Polynomial Type Deterministic, Polynomial number = 4; v advanced záložce:

bit edge Deterministic, bit edge with respect to Sim start time = 0, starting time = 1536, starting point 0.

- recnrz1-4: low level = -5, high level = 5, time slope 0, crossing point 50
- filbes1-4: lowpass filter, number of poles = 10, -3 dB bandwidth = 28 GHz, amplitude plot = no.
- lasor1: Center frekvency: 193.0 THz, source status = 1, cw power 3 mW, Noise Type = ideal.
- optical splitter osp11: splitter s útlumem 3 dB na každý výstup.
- osp12,3 a b3,b7: jsou couplery a splittery s nulovým útlumem.
- MZM b1,4,5,8: excess loss = 0 dB, offset voltage  $V_{on} = 5$  V, extinction ratio = 20 dB, chirp factor = 0,  $V_{pi} = 5$  V.
- optical phase modulator b2,b6: excess loss = 0dB, zero phase voltage = 0,  $V_{pi} = 5$  V, electrical filtering = no.
- bias signal generator „phase\_shift\_X,Y“: level 2.5 AU.
- polarization rotator „polrot1“: rotation about axis  $S1 = 0^\circ$ ,  $S2 = 0^\circ$ ,  $S3 = 180^\circ$ , Number of rotation = one, first rotation = Axis\_S3.
- ocmb1 = 3.0 dB na každý výstup.

Strana přijímače s trasou:



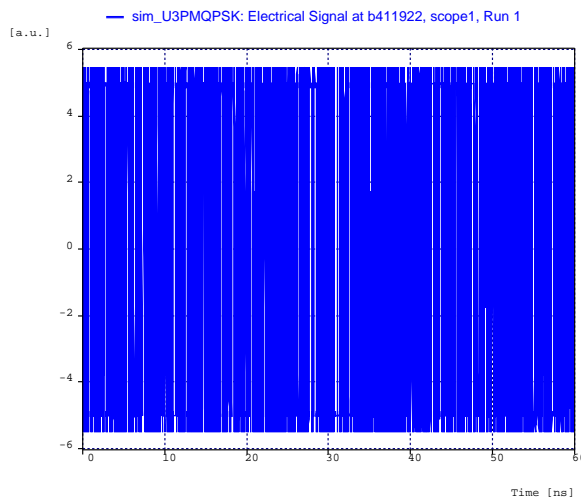
Obr. 4.25: PM-QPSK demodulátor/přijímač OptSim™

S parametry:

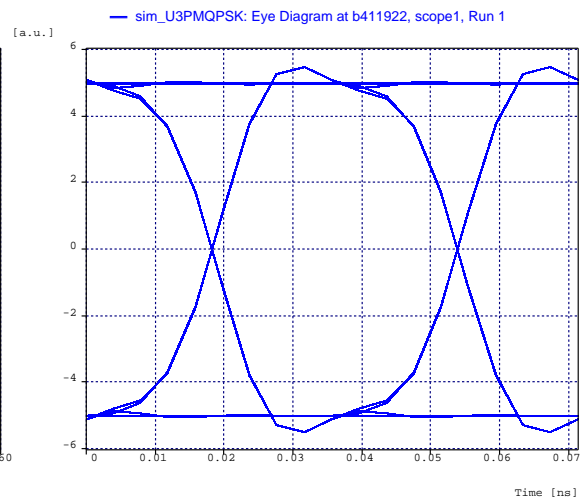
- Optical lorentzian filter lorfil1: filter = bandpass, stages = 5, -3 dB bandwidth = 23,8 GHz.
- Fixed gain optical amplifier oampfp1: Output power = 5 mW.
- Fiber: lenght = 1 km.
- Splitter-combiner 4by8 (sc4by8rin\_fil1): ex = 0, ey = 0, plo = 10, philo = 0, RIN = -155, NPOLES = 5, bw\_rin = 30.

- Photod\_pin: quantum efficiency = 0.7, Quantum noise = ON, dark current = 0.
- TIA electrical amplifier: transimpedance = 200 ohm, Gain = 46,0206, noise density 29,12965 pA/sqrt(Hz), standard deviation =  $1,034e^{-5}$  AU.
- Electrical subtractor sub1-4.
- Bessel filter filbes5-8: Lowpass, poles = 5, -3 dB bandwidth 28 GHz.

### 4.3.2 Výsledky OptSim™

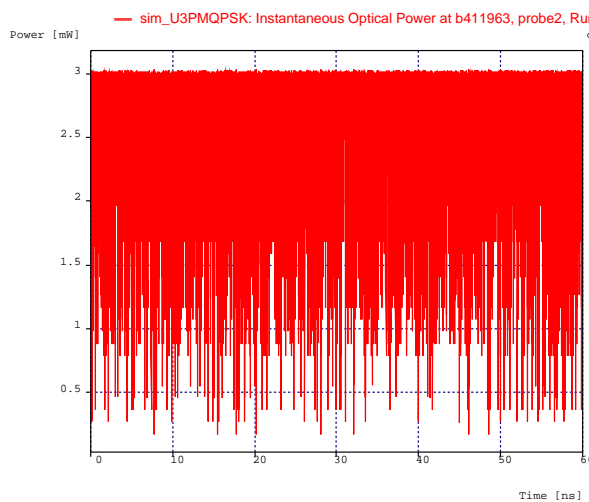


(a) Průběh signálu scope1.

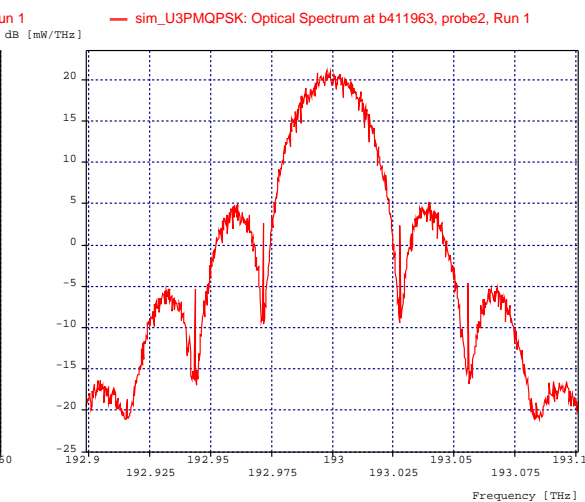


(b) Diagram oka scope1.

Obr. 4.26: Výstup z modulátorů zobrazení na osciloskopu (Zdroj: Vlastní zpracování)

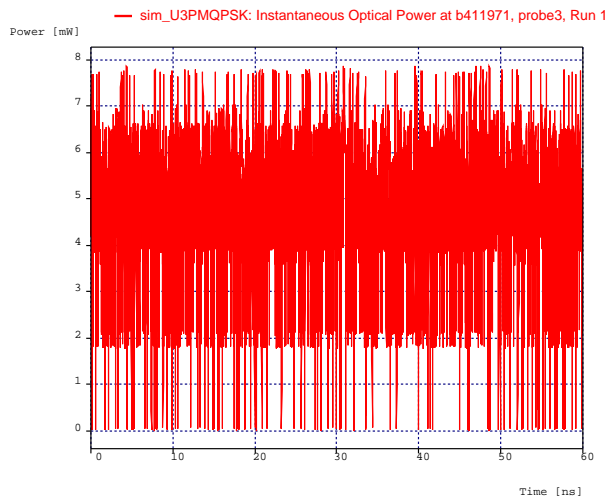


(a) Výkonová charakteristika Probe2 - výstup vysílače.

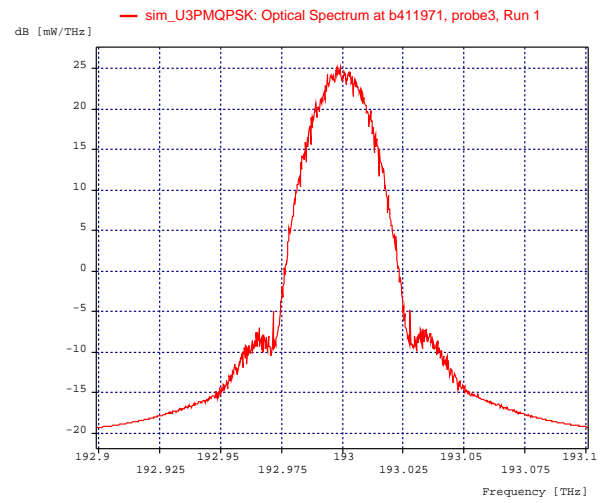


(b) Optické spektrum Probe2

Obr. 4.27: Výstup z modulátorů zobrazení diagram oka na výstupu z přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)

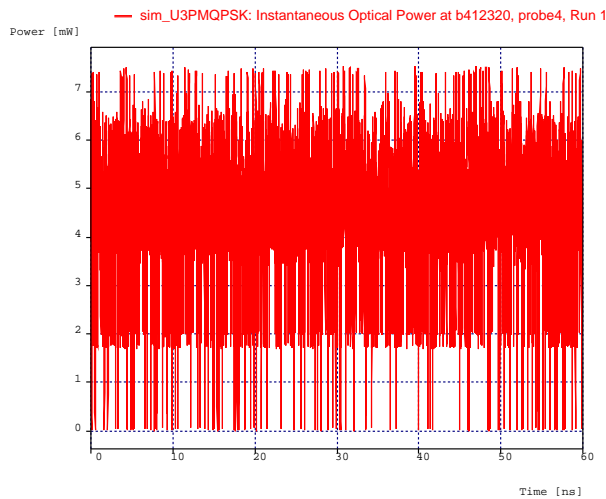


(a) Výkonová charakteristika probe3

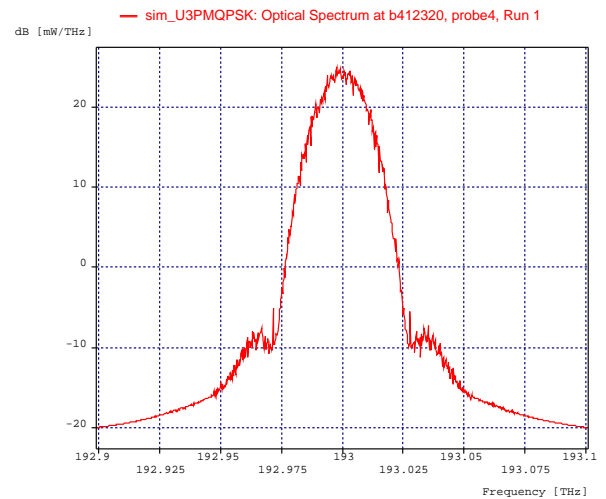


(b) Optické spektrum probe3

Obr. 4.28: Spektrum a výkon na vstupu do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

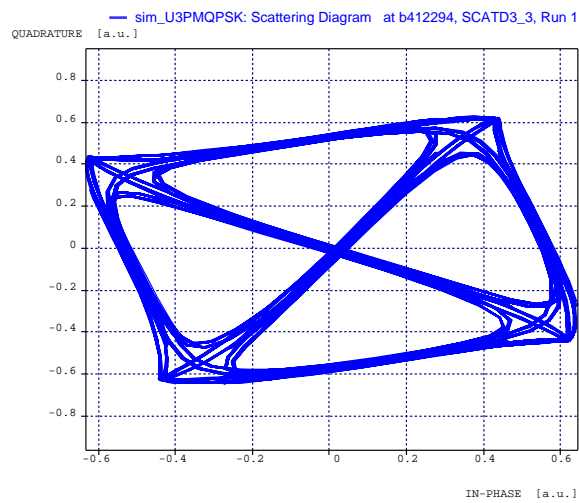


(a) Výkonová charakteristika probe4

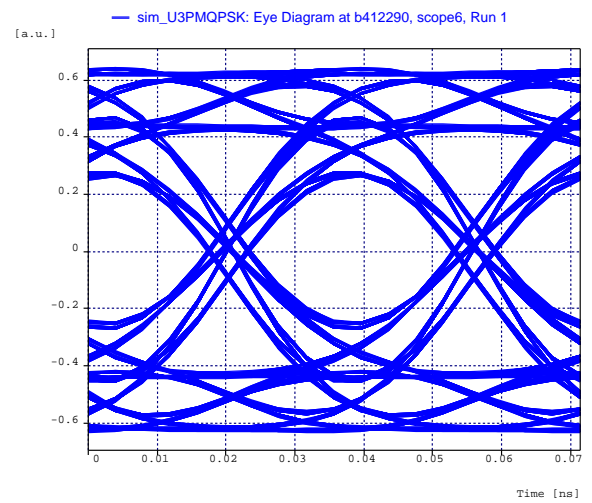


(b) Optické spektrum probe4

Obr. 4.29: Konstelační diagramy na výstupu z vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Konstelační diagram na straně přijímače



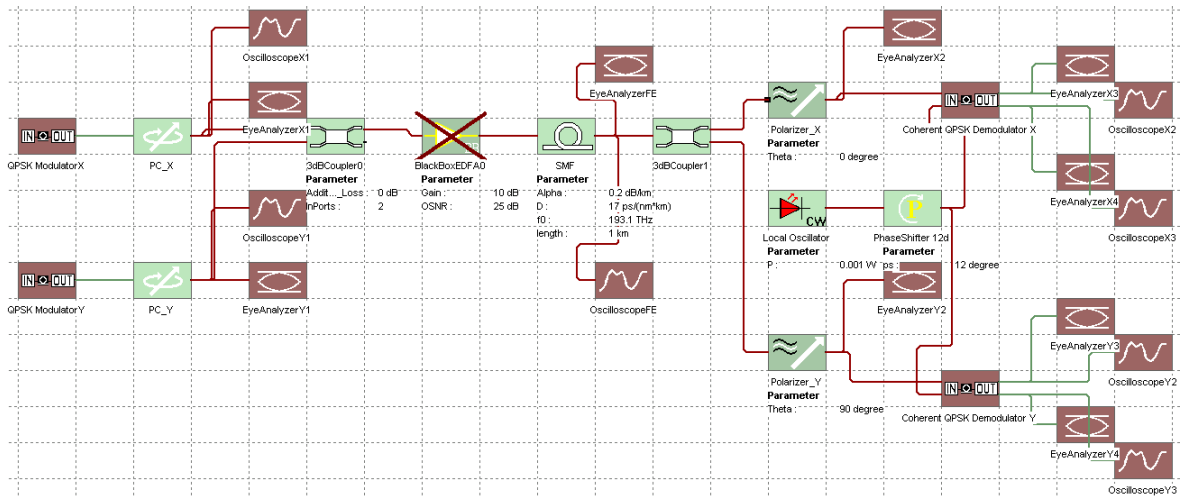
(b) Diagram oka scope6

Obr. 4.30: Spektrum a diagram oka na straně přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)

### 4.3.3 Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS

Sestavte PM-QPSK vysílač a přijímač z modulů v programu PHOTOSS.

Otevřete program PHOTOSS a načtěte soubor „U3 pmqpsk stud.pho“. Zobrazí se přednastavené prostředí s moduly potřebnými k sestavení cvičné úlohy na PM-QPSK vysílač, přenosový kanál a přijímač. Uložte jej přes file save as, jako „U3 pmqpsk stud resene.pho“ (v případě, že soubor již existuje, přepište jej). Nyní můžete začít se spojováním modulů.



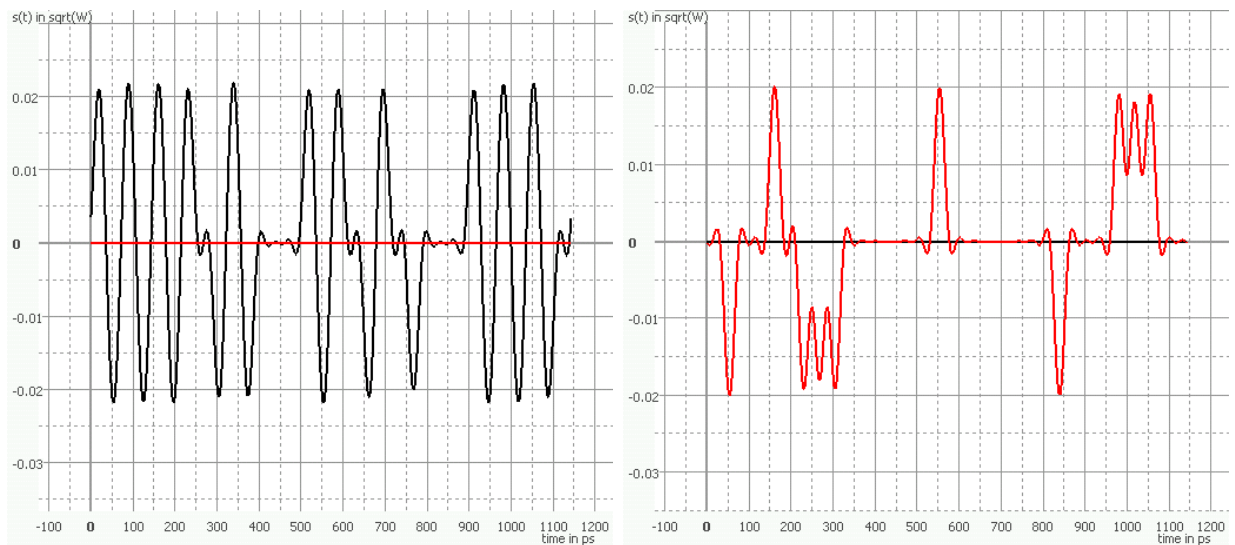
Obr. 4.31: PHOTOSS topologie v úloze 3

#### Postup:

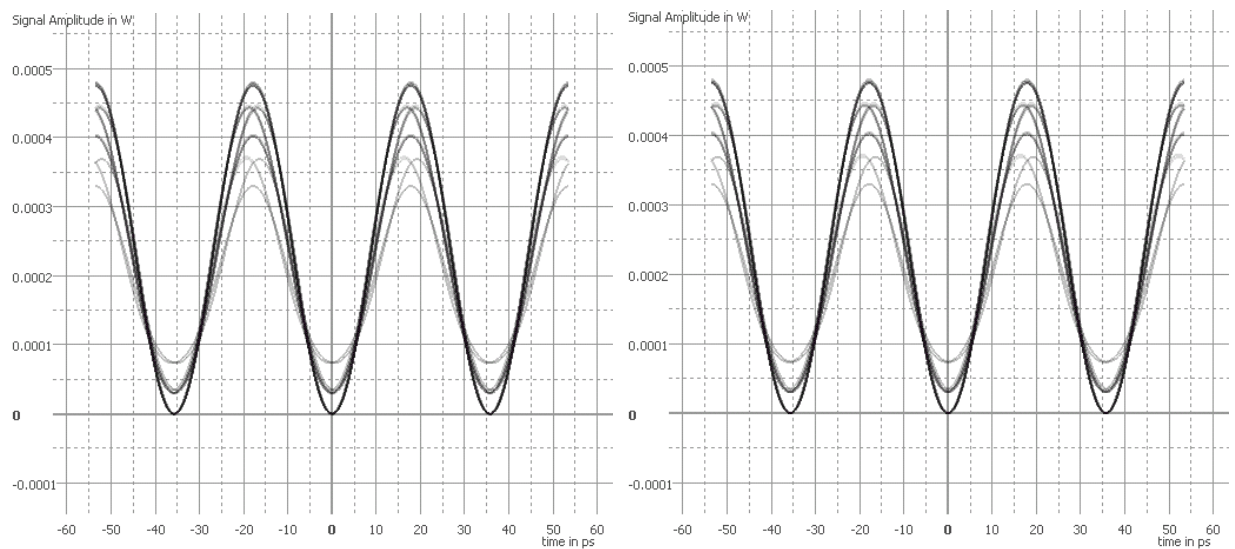
QPSK modulátor X navedte do polarizátoru PC\_X. Z něj vyvedte výstup do OscilloscopeX1, EyeAnalyzerX1 a 3dBCoupleru0. Opakujte i pro modulátor v rovině Y. Přenosová cesta je z 3dBCoupleru0 do BlackBoxEDFA0 do SMF do 3dBCoupleru1. Výstup z vlákna (SMF) vyvedte do EyeAnalyzerFE a OscilloscopeFE.

Přijímač v rovině X se skládá z Polarizer\_X, Coherent QPSK Demodulátor X, Laser Oscilátor, Phase shifter 12d. Výstup z Polarizeru\_X navedte do demodulátoru a EyeAnalyzerX2. Ujistěte se, že vrchní přípoj do demodulátoru je výstup z polarizéru. Druhý port vyžaduje optický signál z lokálního oscilátoru. Zde je fázově posunut o 12 stupňů. Výstupy z demodulátorů navedte na eyeAnalyzer a osciloskop (celkem 2x2 prvky). Postup propojení přijímače provedte i pro rovinu Y.

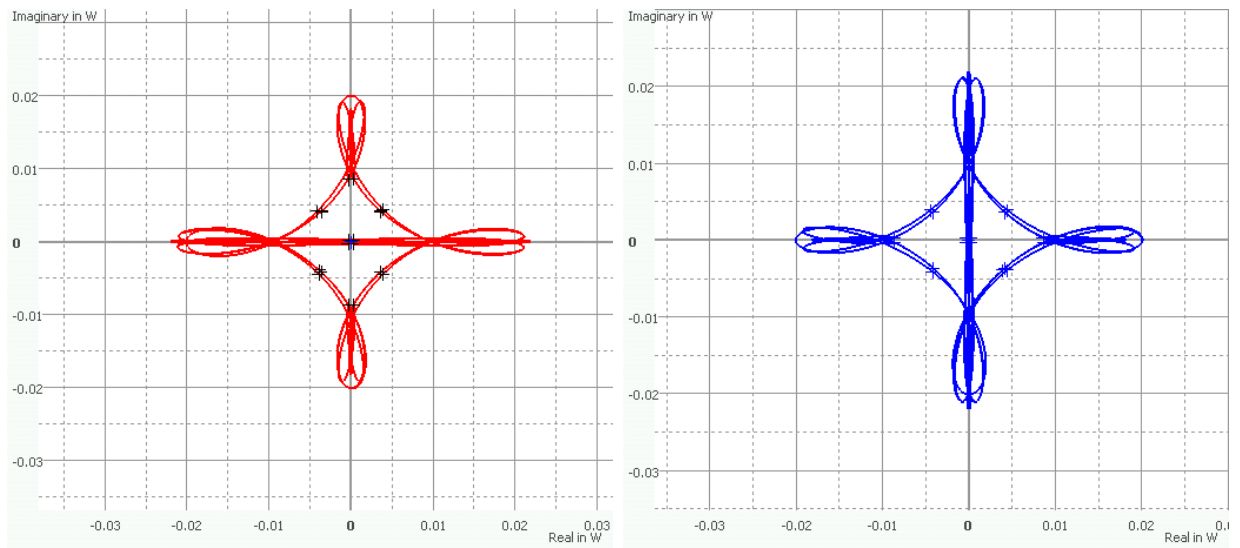
### 4.3.4 Výsledky PHOTOSS



Obr. 4.32: Výstup z modulátorů zobrazení na osciloskopu (Zdroj: Vlastní zpracování)



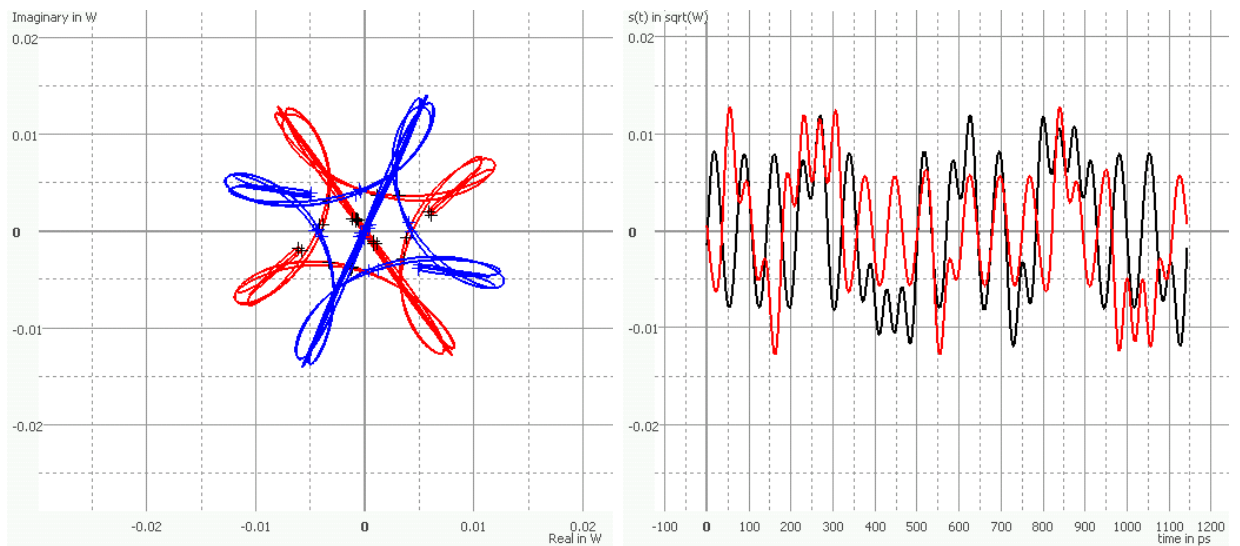
Obr. 4.33: Výstup z modulátorů zobrazení diagram oka před vstupem do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Konstelační diagram na ose X

(b) Konstelační diagram na ose Y

Obr. 4.34: Konstelační diagramy na vstupu do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Konstelační diagram ve vlákně

(b) Souběh signálů v polarizačních rovinách. Černá X, Červená Y.

Obr. 4.35: Spektrum na konci vlákna a diagram oka na konci přijmače (Zdroj: Vlastní zpracování)

### 4.3.5 Závěr úlohy

V úloze si student vyzkoušel postavení topologie, ve které se nacházel vysílač a přijímač modulačního formátu PM-QPSK. Student měl zjistit způsob jakým funguje modulace, demodulace se změnou polarizační roviny a případným řešením problémů s tím spojených.

### 4.3.6 Otázky k úloze

1. Jaký je rozdíl mezi QPSK, DQPSK a QAM?
2. Jakou výhodu má použití klíčovacích metod v přenosu signálu?
3. Co je to koherentní přenos?
4. Z kolika nosných se PM-QPSK signál skládá?
5. Kolika stavové je PM-QPSK?

## 5 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvoření laboratorních úloh v programech pro simulace optických systémů OptSim<sup>TM</sup> a PHOTOSS. Tyto úlohy měly umožnit studentům pochopit problematiku přenosu dat v lokálních a metropolitních sítích.

Prvním krokem bylo vytvoření teoretické základny práce. Následně jsem se začal obeznávat se simulačními programy OptSim<sup>TM</sup> a PHOTOSS. Po seznámení se s jednotlivými aplikačními prostředími jsem vytvořil topologii a odzkoušel jednoduchou přístupovou síť. Z důvodu zachování co nejjednodušší topologie byla zvolena trasa bez dalších útlumů a spojek.

Při vytváření simulací jsem zjistil výhody i nevýhody těchto programů. Ty jsem detailně popsal v kapitole Výsledky testovací topologie. Největším rozdílem bylo, že v programu PHOTOSS se signál dokázal přenést na výrazně menší vzdálenost než tomu bylo u programu OptSim<sup>TM</sup>.

Návrhy úloh jsou tvořeny tak, aby se studenti obeznámili s jednotlivými funkcemi návrhů a dokázali je implementovat v simulačních programech. V první úloze student sestaví topologii vysílače a přijímače - přístupovou síť. Tato úloha slouží k vyzkoušení programů, a proto je její obtížnost spíše nižší. Druhou úlohou je rozšíření již vytvořené přístupové sítě do WDM topologie. Úkolem studenta je postavit topologii na dvou daných frekvencích podle návodu. Výsledkem studentského rozšíření je DWDM o osmi kanálech. Třetí úloha se věnuje PM-QPSK. Zde student prostuduje způsob modulace a využití polarizačních rovin v kombinaci s modulací QPSK. V programu PHOTOSS je postup řešen jako skládání modulů, přičemž v programu OptSim<sup>TM</sup> je třeba úlohu postavit celou.

Na základě vytvořených koster a postupů tvoření laboratorních cvičení je možné konstatovat, že cíle práce byly splněny.

# Literatura

- [1] FS. The Advantages and Disadvantages of Fiber Optic Transmission. *fs.com* [online]. ©2009-2018 [cit. 2018-09-30]. Dostupné z: <https://www.fs.com/the-advantages-and-disadvantages-of-fiber-optic-transmission-aid-431.html>
- [2] LIGHTREADING. Distributed Feedback (DFB) Lasers *lightreading.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: [https://www.lightreading.com/distributed-feedback-\(dfb\)-lasers/d/d-id/575160](https://www.lightreading.com/distributed-feedback-(dfb)-lasers/d/d-id/575160)
- [3] LIGHTREADING. PIN vs. APD: Different Sensitivity, Different Applications *lightreading.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <https://electronics360.globalspec.com/article/10397/pin-vs-apd-different-sensitivity-different-applications>
- [4] FILKA, Miloslav. *Optické přenosy informací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-5064-6.
- [5] MTELCOMMUNICATIONS. Měření disperze *mtel.cz* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <http://www.mtel.cz/mereni-disperze.php>
- [6] ELECTRONICDESIGN. What's the Difference Between NRZ, NRZI, and Manchester Encoding? *electronicdesign.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-nrz-nrzi-and-manchester-encoding>
- [7] Číž, Radim. *Principy modulací a přenosu sdělovacích signálů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-5117-9.
- [8] KYSELAK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy* [online]. [cit. 24. 11. 2018]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=10290](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10290)
- [9] DOROCIÁK, Petr. *Vliv polarizační disperze na chybovost optického kanálu* [online]. [cit. 20. 10. 2018]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5151](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5151)
- [10] Modulation roundup: error rates, noise, and capacity *Krishna Pillai* [online] [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/print/4017668>

- [11] Coherent WDM Technologies *Infinera* [online] [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: [https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2015/07/Infinera\\_Coherent\\_Tech.pdf](https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2015/07/Infinera_Coherent_Tech.pdf)
- [12] DUFFEK, Luděk. *Modulátor QAM* [online]. [cit. 22. 02. 2019]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=4927](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4927)
- [13] Surveys of Communication Standards by Students: Modulation Techniques [online] [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/UMB/modulate.htm>
- [14] FIBEROPTICSOLUTION. How to Use WDM for Fiber Capacity Expansion? *fiber-optic-solutions.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <http://www.fiber-optic-solutions.com/use-wdm-fiber-capacity-expansion.html>
- [15] FILKA, Miloslav. *Přenosová média*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4444-7.
- [16] ITU. G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2003 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/en>
- [17] ITU. G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2012 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>
- [18] LIGHTWAVE. Challenges in Next-Gen PON Deployment *www.lightwaveonline.com* [online] [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.lightwaveonline.com/articles/2017/06/challenges-in-next-gen-pon-deployment.html>
- [19] G.984.3 : Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2003 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-201401-I/en>
- [20] G.989 : 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2003 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989-201510-I/en>
- [21] G.989.1 : 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2003 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-I/en>

- [22] OptSim Product Overview. *Synopsys.com - RSOFT*[online]. Mountain View, CA: Synopsys, ©2018 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/system-network-optsim.html>
- [23] FINISAR. APPLICATION NOTES Optical Modes In VCSELs *finisar.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: [https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/application\\_note\\_vcsl\\_optical\\_modes.pdf](https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/application_note_vcsl_optical_modes.pdf)
- [24] P. I. SYSTEMTECHNIK JENS LENGE. Home of PHOTOSS *lenge.de* [online] [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: [http://www.lenge.de/english/PHOTOSS\\_overview.php](http://www.lenge.de/english/PHOTOSS_overview.php)
- [25] JENS LENGE *User Manual PHOTOSS 5.92*. Bergkamen 2013. 423 s. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <http://www.lenge.de/downloads/PHOTOSS%20User%20Manual.pdf>
- [26] BINH, Le Nguyen. *Optical modulation: advanced techniques and applications in transmission systems and networks*. Boca Raton, [2018]. ISBN 978-1498745239.
- [27] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-29-5.

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>AES</b>	Standard pokročilého šifrování (z angl. Advanced Encryption Standard)
<b>AON</b>	Aktivní optická síť (z angl. Active Optical Network)
<b>APD</b>	Lavinová fotodioda (z angl. Avalanche Photo Diode)
<b>API</b>	Rozhraní pro programování (z angl. Application Programming Interface)
<b>ATM</b>	Asynchronní přenos (z angl. Asynchronous Transfer Mode)
<b>BER</b>	Poměr počtu chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů (z angl. Bit Error Rate)
<b>BPON</b>	Širokopásmová pasivní optická síť (z angl. Broadband Passive Optical Network)
<b>BPSK</b>	Dvoustavové fázové klíčování (z angl. Binary Phase Shift Keying)
<b>CATV</b>	Kabelová televize (z angl. Cable television)
<b>CDMA</b>	Vícenásobný přístup s kódovým dělením (z angl. Code Division Multiple Access)
<b>CW</b>	Kontinuální paprsek (z angl. Continuous Wave)
<b>CWDM</b>	Hrubé vlnové dělení (z angl. Coarse Wavelength Division Multiplex)
<b>DPSK</b>	Klíčování rozdílovým posuvem fáze (z angl. Differential Phase Shift Keying)
<b>DWDM</b>	„Hustý“ vlnový multiplex (z angl. Dense Wavelength Division Multiplex)
<b>DFB</b>	Distribuovaná zpětná vazba (z angl. Distributed feedback)
<b>EDFA</b>	Erbium dopovaný vláknový zesilovač (z angl. Erbium Doped Fiber Amplifier)
<b>EDC</b>	Kompenzace elektronické disperze (z angl. Electronic Dispersion Compensation)
<b>FEC</b>	Dopředné potlačení chyb (z angl. Forward Error Control)
<b>FP</b>	Fabry-Perot
<b>FSO</b>	Bezdrátové optické spoje (z angl. Free Space Optics)
<b>FTTH</b>	Vlákno až do domu, bytu (z angl. Fiber-to-the-home)
<b>FTTO</b>	Vlákno až do kanceláře (z angl. Fiber-to-the-office)
<b>FTTx</b>	Generická zkratka architektury sítě vyjadřující konec optického vlákna (z angl. Fiber-to-the-x)
<b>GEM</b>	GPON zapouzdřovací metoda (z angl. GPON Encapsulation Method)
<b>GPON</b>	Gigabitová pasivní optická síť (z angl. Gigabitcapable Passive Optical Network)
<b>GTC</b>	GPON přenosová konvergence (z angl. GPON Transmission

	Convergence)
<b>iFoG</b>	Interferometrický optický gyroskop (z angl. Interferometric Fiber Optic Gyroscope)
<b>IP</b>	Internetový protokol na třetí vrstvě ISO/OSI (z angl. Internet Protocol)
<b>ITU</b>	Mezinárodní telekomunikační unie (z angl. International Telecommunication Union)
<b>LAN</b>	Lokální síť (z angl. Local Area Network)
<b>LED</b>	Světlo vyzařující dioda (z angl. Light Emitting Diode)
<b>MAN</b>	Propoj na úrovni metropole/města (z angl. Metropolitan Area Network)
<b>MMF</b>	Vícevidový typ vlákna (z angl. Multimode Fiber)
<b>NG-PON</b>	Pasivní optická síť příští generace (z angl. Next-Generation Passive Optical Network)
<b>NRZ</b>	Linkový kód bez návratu k nule (z angl. Non-return to zero)
<b>OCDMA</b>	Optický vícenásobný přístup s kódovým dělením (z angl. Optical Code Division Multiple Access)
<b>ODN</b>	Optická distribuční síť (z angl. Optical Distribution Network)
<b>OLT</b>	Optické linkové zakončení (z angl. Optical Line Termination)
<b>ONT</b>	Koncový terminál uživatele (z angl. Optical Network Termination)
<b>ONU</b>	Optická síťová jednotka (z angl. Optical Network Unit)
<b>OTDM</b>	Optický časový multiplex (z angl. Optical Time Division Multiplexing)
<b>P2M</b>	Mnohabodové připojení, rozvětvení (z angl. Point-to-Multipoint)
<b>P2P</b>	Spojení bod-bod (z angl. Point-to-Point)
<b>PCB</b>	Fyzický řídicí blok (z angl. Physical control block )
<b>PIN</b>	Základní typ polovodičové fotodiody s intrinickou regulací
<b>PMD</b>	Polarizační vidová disperze (z angl. Polarisation Mode Dispersion)
<b>PON</b>	Pasivní optická síť (z angl. Passive Optical Network)
<b>PSK</b>	Fázové klíčování (z angl. Phase-shift keying)
<b>RF</b>	Rádiová frekvence (z angl. Radio frequency)
<b>QAM</b>	Kvadrurní amplitudová modulace (z angl. Quadrature Amplitude Modulation)
<b>QPSK</b>	Kvadrurní klíčování fázovým posuvem (z angl. Quadrature phase-shift keying)
<b>SDH</b>	Synchronní Digitální Hierarchie
<b>SMF</b>	Jednovidový typ vlákna (z angl. Singlemode Fiber)
<b>SNR</b>	Poměr signálu k šumu (z angl. signal noise ratio)
<b>TDM</b>	Časový multiplex (z angl. Time Division Multiplex)

<b>TDMA</b>	Vícenásobný přístup s časovým dělením (z angl. Time Division Multiple Access)
<b>VCSEL</b>	Plošně vyzářující laser (z angl. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers)
<b>WAN</b>	Propojení rozsáhlejšího území (z angl. Wide Area Network)
<b>WDM</b>	Vlnový multiplex (z angl. Wavelength Division Multiplexing)
<b>Wi-Fi</b>	Bezdrátové spojení
<b>WWDM</b>	Široký vlnový multiplex (z angl. Wide Wavelength Division Multiplex)
<b>XG-PON</b>	10-gigabitová pasivní optická síť (z angl. 10-Gigabit-capable Passive Optical Network)

# Seznam příloh

A Obsah přiloženého CD

92

# A Obsah přiloženého CD

Obsahem přiloženého CD je dokument této práce a jednotlivá cvičení rozřazené do složek.

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── U1 Opt ..... adresář úlohy 1 OptSim
│   ├── stud1.moml ..... úloha 1 OptSim
│   └── U1 PH0 ..... adresář úlohy 1 PHOTOSS
│       ├── stud1.moml ..... úloha 2 PHOTOSS
│       └── U2 WDM OPT ..... adresář úlohy 2 OptSim
│           ├── U2wdm.moml ..... úloha 2 OptSim
│           ├── U2wdmfinal.moml ..... řešená úloha 2 OptSim
│           └── U2 WDM PH0 ..... adresář úlohy 2 PHOTOSS
│               ├── U2 wdm
│               │   ├── U2 wdm.pho ..... řešená uloha WDM 2
│               │   ├── U2 wdm vychozi.pho ..... výchozí soubor pro úlohu 2
│               │   └── U2wdm stud ..... adresář úlohy 2 studentské rozšíření
│               │       └── u2wdmstud.pho ..... řešená úloha 2 studentské rozsireni
│               └── U3 pmqpsk OPT ..... adresář úlohy 3 OptSim
│                   ├── U3PMQPSK.moml ..... řešená úloha 3 OptSim
│                   └── U3 pmqps PH0 ..... adresář úlohy 3 PHOTOSS
│                       ├── U3 pmqpsk stud.pho ..... výchozí soubor pro úlohu 3 PHOTOSS
│                       ├── U3 pmqpsk stud resene.pho ..... řešená úloha 3 PHOTOSS
│                       └── xchalo13DP.pdf ..... Diplomová práce text
```