

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Bc. Václav Richtř

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

Studium pokročilých modulačních formátů u optických systémů

květen 2014

Diplomant:

Bc. Václav Řichtr

Vedoucí práce:

Ing. Michal Lucki, Ph.D.

Čestné prohlášení

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

Datum: 12. 5. 2014

.....

podpis diplomanta

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji Ing. Michalu Luckimu, Ph.D. za odborné vedení a konzultování při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a ostatním blízkým za trpělivost a podporu při studiu.

Zadání diplomové práce
(Originál v originálu diplomové práce,
oboustranná kopie v kopii diplomové práce)

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá pokročilými optickými modulačními formáty a uspořádáním optického systému v prostředí OptSim. Modulační formáty popisuje a v simulacích zkoumá jejich možnosti použití v optickém systému, pro danou problematiku nejčastěji nasazovanému, tedy DWDM, jenž je zde také stručně popsán. Dále obsahuje simulaci výběrového optického modulačního formátu, který na uvažovaném systému dosahuje nejlepších vlastností za účelem prokázání, že tento systém dokáže pracovat na vysokokapacitních přenosech.

Klíčová slova: pokročilé optické modulační formáty, optické systémy, WDM, DWDM, OptSim, Q-faktor

Summary:

This thesis deals with advanced optical modulation formats and arrangement of the optical system in OptSim environment. It describes modulation formats and examines their potential use in simulations of optical system DWDM that there is also briefly outlined. It also contains a simulation of selective optical modulation format, which achieves the best qualities on the considered system in order to prove the ability of this system to operate at high transmission capacity.

Index terms: advanced optical modulation formats, optical systems, WDM, DWMD, OptSim, Q-factor

Obsah

1.	Úvod	1
1.1	Cíle práce	1
1.2	Struktura práce	1
2.	Pokročilé optické modulační formáty	2
2.1	Intenzitní modulační formáty	3
2.1.1	Binární	3
2.1.2	Pseudo-vícestavové modulace	4
2.1.3	Modulace s korelativním kódováním a částečnou odezvou	4
2.1.4	Vestigial Sideband and Single Sideband	5
2.2	(Diferenciální) fázové modulační formáty	6
2.2.1	Binární	6
2.2.2	Vícestavové	7
3.	Vývoj a aktuální trendy	7
3.1	Vývoj optických systémů	7
3.2	Aktuální trendy použití modulačních formátů	9
3.2.1	Modulační formáty pro systémy pracující s rychlostí na 100 Gb.s^{-1} na kanál	10
3.2.2	Modulační formáty pro systémy pracující s rychlostí nad 100 Gb.s^{-1} na kanál	13
3.2.3	Shrnutí	16
3.3	Síť CESNET2	17
3.4	Princip WDM systému	18
3.4.1	CWDM	19
3.4.2	DWDM	19
3.5	Topologie a použitelné kanálové rozestupy systému DWDM	20
3.5.1	Point-to-Point topologie DWDM	20
3.5.2	Kruhová topologie DWDM	20
3.5.3	Použitelné kanálové rozestupy DWDM	21
3.6	Možnosti minimalizace útlumu	22
4.	Schémat a simulační prostředí	23
4.1	Simulační prostředí OptSim	23
4.2	Vyhodnocení simulací	23
4.3	Simulace modulačních formátů v systému DWDM	25
4.3.1	Volba simulací	25
4.3.2	Nastavení simulací	26
4.3.3	Schémat pro simulace	28
5.	Výsledky	31
5.1	Výsledky simulace modulačních formátů v systému DWDM	31

5.1.1	DWDM systém, přenosová rychlost 10 Gb.s ⁻¹ na kanál, bez kompenzace DCF	31
5.1.2	DWDM systém, přenosová rychlost 10 Gb.s ⁻¹ na kanál, kompenzace DCF	34
5.1.3	DWDM systém, přenosová rychlost 40 Gb.s ⁻¹ na kanál, kompenzace DCF	35
5.1.4	DWDM systém, přenosová rychlost 100 Gb.s ⁻¹ na kanál, kompenzace DCF	36
5.1.5	Shrnutí	37
5.2	Simulace terabitových přenosových kapacit	40
5.2.1	Simulace termitových přenosových kapacit, modulace PM-QPSK.....	40
5.2.2	Simulace termitových přenosových kapacit, modulace PM-QPSK, vlákno s nižším útlumem ITU-T G. 654	42
6.	Závěr	43
	Seznam obrázků.....	45
	Seznam tabulek.....	46
	Seznam použitých zkratek.....	47
	Příloha.....	49
	Seznam použité literatury	50

1. Úvod

1.1 Cíle práce

Cílem práce bylo hledání výkonnostních limitů optických modulačních formátů z pohledu různých parametrů v prostředí OptSim. Nejprve je potřeba prozkoumat danou problematiku a to jak z hlediska modulačních formátů, tak se zaměřením na optické systémy, aby bylo možné později určit systém, který je pro uvedený předmět bádání aktuálně nejvhodnější a bude nejlépe odrážet výkonnost vybraných modulací. Ten bude zkoumán jak z hlediska například využití frekvenčního spektra, tak aby u něho byla možnost použití pro vysokokapacitní a vysokorychlostní přenosy. Zaměřím se též na metody minimalizace útlumu a rozbor možných topologií vybraného optického systému. Volba daného systému a modulačních formátů vychází i z určitého historického vývoje, takže je potřeba se zaměřit i na zmapování tohoto problému a přejít při jeho řešení až k aktuálním trendům. Podstatnou částí práce se tedy stane zkoumání pokročilých optických modulačních formátů, kde budou zkoumány jak intenzitní a fázové, binární či vícestavové modulace, tak možnost využití polarizační multiplexace, a to z důvodu pokrytí všech možných typů těchto formátů, které jsou známy. Po zvolení zkoumaného systému i modulací pro simulace se pokusím najít ty, které se pro něho svými vlastnostmi jeví jako nejvhodnější. Výsledkem se tak stane simulace na optimalizovaném systému využívajícím modulační formát, který ze zkoumaných bude vykazovat nejlepší dílčí výsledky, za účelem dosažení zmíněných vysokokapacitních a vysokorychlostních přenosů s danou maximální bitovou chybovostí.

1.2 Struktura práce

Práce je rozdělena celkem do šesti kapitol. Hlavní část práce je přitom od 2. do 6. Druhá kapitola popisuje pokročilé optické modulační formáty obecně. Věnuji se zde jejich rozdělení podle fyzikálního atributu, který využívají k přenosu informace, a jednotlivé modulační formáty následně stručně popisuji. Ve třetí kapitole se zabývám vývojem i aktuálními trendy optických systémů pro vysokokapacitní a vysokorychlostní přenosy se zaměřením na použitelné modulační formáty. Dále zde popisuji síť CESNET2, fungující na území České republiky, na které vysvětluji zvolení daného systému DWDM pro simulace. Stručně charakterizuji systém WDM (Wavelength Division Multiplexing), jeho typy a možné topologie. Popisuji též možnosti minimalizace útlumu. Ve 4. kapitole charakterizuji konkrétní simulační schémata s jejich nastavením a použité simulační prostředí OptSim. Představuji též způsob vyhodnocení simulací. Kapitola 5, jež obsahuje výsledky, je strukturovaná do dvou podkapitol 5.1 a 5.2. První obsahuje simulace na čtyřkanálovém systému DWDM a obsahuje další podkapitoly, které pojednávají o systémech fungujících na různých přenosových rychlostech na kanál. Druhá pak ukazuje

simulaci, která obsahuje výběrový modulační formát a jež potvrzuje, že je možné ho použít pro vysokokapacitní přenosy s využitím jak standardního optického vlákna ITU-T G. 652, tak vláken dle novějších norem. V 6. kapitole je pak obsažen závěr, kde celou práci shrnuji.

2. Pokročilé optické modulační formáty

Kapitola hovoří o pokročilých optických modulačních formátech, které lze využít pro vysokokapacitní optické sítě. Grafický přehled těchto modulačních formátů a jejich rozdělení do různých typů je pak znázorněn v tabulce 2.1. Jednotlivé podkapitoly se pak věnují těmto typům detailněji.

Intenzitní modulace						(Rozdílové) fázové modulace				
Bez paměti				S pamětí		Bez paměti				
Binární		Vícetavové		Pseudo- vícetavové	Korelativní kódování	Binární		Vícetavové		
OOK				M-ASK	CSRZ VSB- CSRZ	DB AMI	NRZ	RZ	NRZ	RZ
Bez čirpu		S čirpem					(D)PSK	(D)QPSK		
NRZ	RZ	NRZ	RZ							
VSB/SSB		C- NRZ DST	CRZ ACRZ							

Tabulka 2.1: Přehled nejdůležitějších intenzitních a fázových modulačních formátů [1]

Modulační formáty lze rozdělit do tří skupin, podle toho, jaký fyzikální atribut je u nich využit k přenosu informace na: intenzitní, fázové (nebo frekvenční) a polarizační.

Obecně rozlišujeme modulace na modulace s pamětí a bez paměti. Paměť modulace přidává závislost aktuálně přenášených dat na datech již přenesených. Dále pak známe modulace binární, které mají dva stavy a vícetavové s M stavy (M = počet stavů).

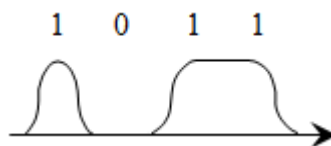
V tabulce není uvedena kvadrurní amplitudová modulace (QAM), která v podstatě vznikne součtem dvou modulací ASK v kvadrurních složkách (amplitudové klíčování - Amplitude Shift Keying) a polarizační multiplexování – obojím se zabýváme v kapitole 3 a jejich podkapitolách.

2.1 Intenzitní modulační formáty

2.1.1 Binární

Non Return-to-Zero On/Off Keying

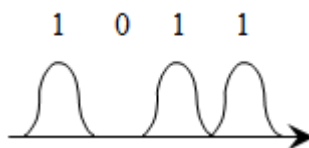
Non Return-to-Zero On/Off Keying (NRZ-OOK) je nejjednodušší modulační formát s relativně malou elektrickou šířkou pásma, který je často označován jen jako NRZ. Logická úroveň „1“ zaplňuje celý bitový interval, během kterého nedochází k návratu k nule. Intenzita signálu se mění mezi log. úrovněmi „1“ a „0“ v závislosti na změně signálu. Log. úrovní „1“ odpovídá maximální amplituda signálu a log. úrovní „0“ nulový signál. Pro přenosové rychlosti 10 Gb.s^{-1} a vyšší je nejuvhodněji generován pomocí přímo modulovaného laseru nebo elektroabsorpčního modulátoru (pro krátký a střední dosah transpondérů), či Mach-Zenderova modulátoru (MZM) bez čirpu (u dálkových aplikací). [1]



Obrázek 2.1: Optický signál NRZ [2]

Return-to-Zero On/Off Keying

Šířka impulsu je kratší než šířka bitového intervalu a poté klesne na logickou úroveň „0“. Return-to-Zero On/Off Keying (RZ-OOK) modulace má tři běžně používané formáty: RZ s 50% střídou, RZ s 33% střídou, RZ s 67% střídou - Carrier-Suppressed Return-to-Zero (CSRZ). RZ vysílače typicky používají pro rychlosti 40 Gb.s^{-1} a vyšší pulzní tvarovač v sérii s datovým modulátorem. Pulzní tvarovač je realizován jako sinusově řízený Mach-Zenderův modulátor. Všechny RZ impulsy mají stejný tvar, který je nezávislý na sousední bitové hodnotě. RZ modulátory jsou oproti NRZ odolnější vůči disperzi a nelineárním jevům. Na druhou stranu jsou ale obtížněji realizovatelné, a tím pádem i dražší. [1]



Obrázek 2.2: Optický signál RZ [2]

Chirped Return-to-Zero

Modulační formát Chirped Return-to-Zero (CRZ) se používá u některých podmořských optických systémů. Účelem jeho vzniku bylo potlačit na dlouhých optických trasách vliv nelinearit a disperze. Optická nosná tohoto formátu se mírně frekvenčně rozmítá v době trvání pulsu. Vlivem kladné chromatické disperze dochází v optickém vlákne k tomu, že se výše položené frekvence ve spektru modulačního signálu šíří optickým vláknem rychleji, než ty níže položené, v časové poloze se tento mechanismus jeví jako roztažení pulsu. To lze kompenzovat změnou frekvence optické nosné v průběhu každého modulačního pulsu tak, že se frekvence optické nosné v části náběžné hrany mírně zmenší a v části sestupné hrany zvýší. Jevu frekvenčního rozmítání se často v optice říká čirp (z anglického „chirp“). [3]

2.1.2 Pseudo-vícestavové modulace

Carrier-Suppressed Return-to-Zero

CSRZ je pseudo-vícestavový modulační formát, který se vyznačuje tím, že mění orientaci optického pole v každém bitovém přechodu (na rozdíl od formátu s korelativním kódováním) a je zcela nezávislý na části signálu nesoucím informaci (viz tabulka 2.2). Pro generování signálu CSRZ má sinusové řídicí napětí druhého modulátoru dvojnásobnou frekvenci oproti 50% RZ a kmitá s dvojnásobnou amplitudou. Oproti standardním RZ modulacím je tu podstatný rozdíl. Fáze pulsů se mění o π každou následující bitovou periodu, což zapříčiní destruktivní ovlivňování nosné frekvence. Ve spektrální rovině je tedy spektrální složka na nosné frekvenci potlačena a to vede k zlepšení kvality signálu. Tedy v průměru polovina jedničkových bitů má kladné znaménko, zatímco druhá polovina má záporné znaménko, což má za následek nulovou střední hodnotu optického pole obálky. V důsledku vymizení přenosu v optickém středu frekvence, je patrný i původ názvu tohoto modulačního formátu. [1]

2.1.3 Modulace s korelativním kódováním a částečnou odezvou

Optické modulace Duobinary (DB) a Alternate-Mark Inversion (AMI) patří do modulačních formátů s korelativním kódováním, jejichž podtřída je označována jako modulační formát s částečnou odezvou. Korelativní kódování představuje na rozdíl od CSRZ výrazný vzájemný vztah mezi optickou fází a datovou informací: u DB dochází ke změně fáze vždy, když je lichý počet nulových bitů mezi dvěma po sobě následujícími jedničkovými bity, zatímco pro AMI vznikají fázové změny pro každý jedničkový bit (i pro sousední jedničkové bity), nezávisle na počtu nulových bitů mezi nimi (viz tabulka 2.2). [1]

Duobinary

Nejvýznamnějším představitelem formátů s částečnou odezvou je DB. V optických komunikacích je DB modulace také známá pod názvy Phase-Shaped Binary Transmission (PSBT) a Phased Amplitude-Shift Signaling (PASS).

Hlavní výhodou signálů DB je jejich vyšší tolerance k chromatické disperzi (spektrum tohoto modulačního formátu je výrazně zúženo díky filtraci spektra výstupních pulsů před modulací relativně úzkou dolní propustí a užší spektrum má za následek vyšší odolnost vůči chromatické disperzi [3]) v porovnání s binárními formáty. DB vysílače používají předkódovaná elektrická data na vstupu, tento předkódovaný datový proud vykazuje změnu úrovně pro každý nulový bit obsažený v původní sekvenci dat a zabraňuje šíření chyb po detekci. V případě jedničkového bitu, se úroveň signálu nemění. Předkódovaná sekvence je přeměněna na tři úrovně elektrického signálu prostřednictvím výrazné elektrické filtrace dolní propustí. Tři úrovně elektrický signál je pak použit k řízení Mach-Zenderova modulátoru. [1]

Alternate-Mark Inversion

AMI, která je někdy také klasifikována jako formát s částečnou odezvou, vzhledem k způsobu, jakým je vygenerována, nesdílí omezení šířky pásma charakteristik dalších formátů s částečnou odezvou. V optice, je AMI typicky realizována v podobě RZ (RZ-AMI). Stejně jako ostatní RZ-OOK formáty využívá přídavného fázového kódování, dodatečná fázová modulace AMI může pomoci snížit účinky některých vláknových nelinearit. Jedno z možných provedení vysílače AMI je shodné s realizací DB vysílače s tím rozdílem, že na místo zpoždovacího a sčítacího filtru (dolní propust) používaného pro DB, je zde použit elektrický zpoždovací a odčítací filtr (horní propust). Pro získání RZ-AMI je pak datový modulátor následovaný RZ pulzním tvarovačem. [1]

Posloupnost dat	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
DQPSK	0		$+\frac{\pi}{2}$		π		$+\frac{\pi}{2}$		$-\frac{\pi}{2}$		$-\frac{\pi}{2}$	
CSRZ	0	0	+1	0	+1	-1	+1	0	0	-1	0	-1
DB	0	0	+1	0	-1	-1	-1	0	0	-1	0	+1
AMI	0	0	+1	0	-1	+1	-1	0	0	+1	0	-1

Tabulka 2.2: Příklady pro symbolové kódování [1]

2.1.4 Vestigial Sideband and Single Sideband

U některých modulačních formátů je také možné potlačit polovinu jejich spektrálního obsahu vhodným optickým filtrováním. Vzhledem k tomu, že spektrum

reálných hodnot základního pásma signálu je symetrické kolem nulové frekvence, po odfiltrování redundantní poloviny spektra (tj. jednoho ze dvou spektrálních postranních pásem) bude zachován celý informační obsah. Této skutečnosti je využíváno u Single Sideband (SSB), kdy je jedno postranní pásmo zcela potlačené, a u Vestigial Sideband (VSB), kde optický filtr potlačí hlavní část jednoho postranního pásma, zatímco ve stejnou dobu plní některé činnosti filtru na druhém.

Zatímco realizace SSB filtrování je v praxi obtížná kvůli potížím při tvorbě příslušných optických nebo elektrických filtračních funkcí, optický VSB formát byl úspěšně aplikován na NRZ-OOK, RZ-OOK a CSRZ-OOK. V systému WDM, může být VSB filtrace prováděna buď u vysílače, nebo u přijímače. Filtrování u vysílače zaručuje maximální spektrální kompresi a vysoce spektrálně efektivní WDM přenos. Výhodou VSB filtrování v přijímači je snížení WDM kanálových přeslechů pokud se používají nestejně WDM kanálové rozestupy. [1]

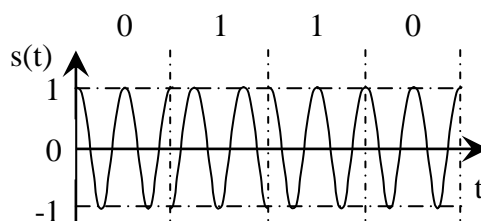
2.2 (Diferenciální) fázové modulační formáty

2.2.1 Binární

Binary Differential Phase Shift Keying

Binary Differential Phase Shift Keying (DBPSK nebo jen DPSK) moduluje informaci na binární fázové změny mezi sousedními bity: jedničkový bit je kódován na π fázovou změnu a nulový bit je reprezentován neexistencí fázové změny (viz obrázek 2.3). Stejně jako OOK může být i DPSK implementována v RZ a NRZ formátech. Hlavní výhodou použití DPSK místo OOK je o 3 dB vyšší citlivost přijímače.

Optický DPSK vysílač diferenciálně kóduje přenášená data před modulací, aby se zabránilo propagaci chyb u přijímače. Předkódovaná sekvence, pak moduluje fázi vysílacího laseru mezi 0 a π . Chceme-li provést optickou fázovou modulaci, lze použít buď lineární fázový modulátor, nebo Mach-Zenderův modulátor. Stejně jako pro OOK, může být pulsní tvarovač připojen v sérii s datovým modulátorem k převodu signálu NRZ-DPSK na RZ-DPSK. [1]



Obrázek 2.3: Diferenční binární fázová modulace [4]

2.2.2 Vícestavové

Differential Quadrature Phase Shift Keying

Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) je vícestavový modulační formát (více než 1 bit na symbol) pracující na podobném principu jako DBPSK jen s tím rozdílem, že přenáší čtyři stavy fáze optické nosné $\{0, +\pi/2, -\pi/2, \pi\}$ s poloviční symbolovou rychlostí k celkové přenosové rychlosti. Stejně jako v případě DPSK se DQPSK vysílač nejvhodněji realizuje dvěma vnořenými Mach-Zenderovými modulátory pracujícími jako fázové modulátory. I zde může být do struktury přidán pulzní tvarovač pro výrobu RZ-DQPSK z NRZ-DQPSK. [1]

3. Vývoj a aktuální trendy

Tato kapitola je zaměřená na vývoj optických systémů a trendy v použití pokročilých modulačních formátů. Dále obsahuje podkapitoly věnované síti CESNET2 fungující na českém území, rozebírá princip a možné topologie systému WDM a zkoumá možnosti minimalizace útlumu.

3.1 Vývoj optických systémů

Původně byly využívány jednokanálové systémy nesoucí informace o rychlostech kolem 1 Gb.s^{-1} , současně se již využívají systémy s více kanály (80-100) s rychlostmi překračujícími 100 Gb.s^{-1} na kanál. [5]

Aktuální řešení využívá princip zvýšení kapacity v optickém systému pomocí WDM. V roce 1990 byl navržen systém, který využíval hustý vlnový multiplex (DWDM) v kombinaci s erbiem dopovanými vláknovými zesilovači (EDFA) a s využitím OOK modulačních formátů a přímou detekcí, nicméně tyto systémy pracovaly jen do rychlosti 10 Gb.s^{-1} na kanál. Pro další zvýšení přenosové kapacity byly podrobně zkoumány vícestavové modulační formáty s jednou nebo více nosnými, které využívaly nové detekční systémy, nová vlákna a Ramanovy zesilovače. Následně bylo zjištěno, že pokrok v digitální koherentní detekci může umožnit praktické implementace sofistikovanějších vícestavových a multidimenzionálních modulačních formátů s vyšší spektrální účinností.[6] Koherentní detekce byla zkoumána již od roku 1980, nicméně byla odsunuta do oblasti akademických pokusů po dobu nejméně dvě desetiletí a to zejména díky problémům s šířkou spektrální čáry laserů, která byla v té době 50 MHz, druhý důvod byl právě vznik zesilovačů EDFA. [7] Pokročilé modulační formáty, které využívají nejen amplitudu, ale i další signálové domény, jako jsou fáze či stavy polarizace, jsou sofistikovanějšími technikami pro kódování elektrických dat na optickou nosnou. Navíc zvyšují funkčnost a spektrální účinnost v porovnání s analogovými modulačními formáty

pro vláknovou komunikaci. Výhodou využití vláknových optických digitálních modulačních formátů je, že využití digitálního signálu snižuje hardwarovou složitost, šum a interferenční chyby v porovnání s analogovým signálem, který vyžaduje velkou šířku pásma na symbol k jeho přenesení. [8]

Techniky, které nám pomohou dosáhnout požadovaných vysokokapacitních přenosu jsou [6]:

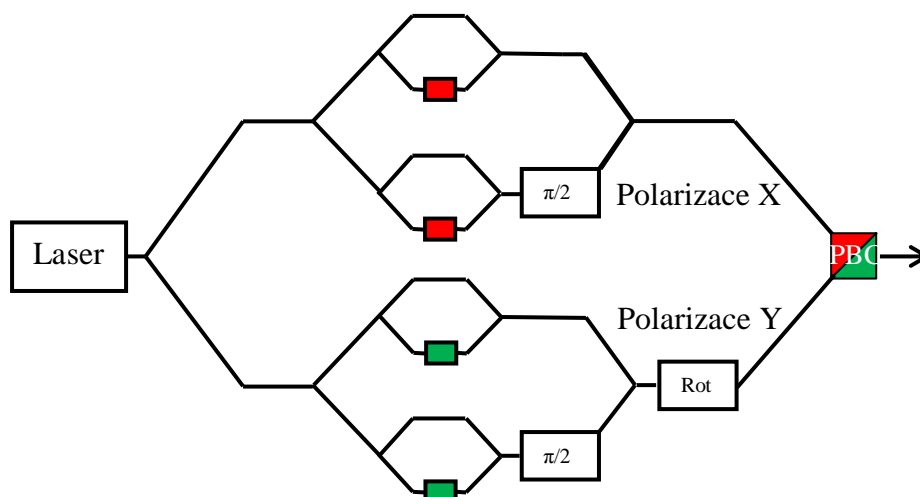
na straně vysílače: - vícestavový modulační formát nebo polarizační multiplexace

na přenosové cestě: - nová vlákna s nízkými ztrátami a / nebo s větší efektivní plochou
- pokročilé zesilování jako je distribuovaný Ramanův zesilovač

na straně přijímače: - digitální koherentní detekce

Vícestavové modulace nebo polarizační multiplexace na straně vysílače umožňují snížení modulační rychlosti při zachování stejné přenosové rychlosti oproti jiným modulačním formátům. Díky tomuto snížení, jsou elektrické a optické komponenty k realizaci těchto modulačních rychlostí již komerčně dostupné. Navíc tyto pomalejší komponenty mají nižší spotřebu a cenu, a je možné je zasadit do užšího gridu DWDM. Oproti tomu se vysílače kvůli většímu množství komponent, ze kterých se skládají a jež jsou potřebné k jejich realizaci, stávají složitějšími. [6]

Přechod od binárních do změny polarizace využívajících formátů lze vysvětlit následujícím způsobem. Základem je, že tyto modulace využívají MZM. Zatímco klasická PSK (Phase Shift Keying) modulace využívá jeden MZM, QPSK modulace již využívá dva. Horní rameno takového modulátoru tvoří soufázovou složku a dolní díky využití optického fázového modulátoru s posunem $\pi/2$ kvadrurní složku výsledného QPSK signálu. Využijeme-li navíc ještě polarizační multiplexaci, bude se celý systém skládat již z ramen čtyř, kdy horní dvě ramena tvoří polarizaci v jedné ose například X a dolní Y. Rozšíření vysílače má výhodu uvedenou v předešlém odstavci a to tu, že je možné lépe využít frekvenční spektrum. Čím více je ale stavů, tím menší výkon připadá pro každý bit v modulačním symbolu, protože výkon z jednoho laseru se musí rozdělit do daných ramen, což má za příčinu pokles dosahu. [7] Na obrázku 3.1 je znázorněno schéma vysílače PM-QPSK.



Obrázek 3.1: Schéma PM-QPSK vysílače [7]

U polarizační multiplexace s dvěma ortogonálními polarizacemi je dobré poznamenat, že se v literatuře můžeme setkat s jejími různými označeními, jako jsou: PDM – Polarization Division Multiplexing, PM – Polarization Multiplexing, DP – Dual Polarization a nebo OP – Orthogonal Polarization. V této práci se proto přikloním pro zjednodušení k jednotnému značení PM. [6]

Na přenosové cestě nám nová vlákna s nízkými ztrátami a / nebo s větší efektivní plochou umožní prodloužit překlenutelné vzdálenosti a pokročile zesilování zlepšit odstup optického signálu od šumu (OSNR). [6]

Na straně přijímače se jeví jako slibný způsob pro dosažení vyšší rychlosti přenosu dat a vyšší kapacity koherentní detekce. Tato detekce nám umožňuje využít univerzální front-end přijímače pro diferenční modulační formáty, a tím se přesune složitost sledování fáze a polarizace do digitální domény, což sníží složitost příjmu vícestavových a multidimenzionálních kódovaných optických signálů. Digitální koherentní detekce, také umožňuje elektrickou kompenzaci lineárních optických vad, jako jsou vláknová chromatická disperze (CD), polarizační vidová disperze (PMD) a účinky úzké optické filtrace. [6]

3.2 Aktuální trendy použití modulačních formátů

V této kapitole se zaměřím na zvyšování přenosové kapacity optického systému s využitím modulačních formátů, které jsou v podkapitolách 3.2.1 a 3.2.2 rozděleny podle přenosové rychlosti na kanál na modulační formáty do $100 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ a nad $100 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pro binární OOK modulační formát je vyžadována šířka pásma optických a elektrických komponent pro $100 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ rychlosti na kanál nad 70 GHz. Pro tak vysoké frekvence jsou elektrické nebo elektricko-optické komponenty poměrně drahé. [6] Jak již bylo popsáno v kapitole 3.1, s pomocí digitální koherentní detekce na straně přijímače

a / nebo pokročilých modulačních formátů na straně vysílače lze tuto nevýhodu do značné míry odstranit. Navíc nám použití úzkého optického spektra a polarizační multiplexace do budoucna umožní zlepšovat optickou spektrální účinnost. Nicméně kvůli složitosti zatím jen hrstka dodavatelů DWDM systémů učinila významný krok v praktických a spolehlivých implementacích koherentního systému – většinou vyvíjejí systémy své [7].

K dalšímu snížení modulační rychlosti modulovaného signálu může být použita modulace s více nosnými. Generování signálu s více nosnými může být prováděno optickou nebo elektrickou metodou. Pokud jsou tyto vícenásobné subnosné frekvenčně ortogonálně multiplexovány, nazýváme je OFDM signály. Pro tyto OFDM signály může být každá subnosná modulována pomocí BPSK, QPSK nebo vícestavovými elektrickými signály. Protože každá subnosná nese signál nižší bitové rychlosti, může být více odolná vůči CD a PMD. Nicméně OFDM signály vyžadují složitější vysílač než modulační formáty s jednou nosnou. Naopak využitím signálů s jednou nosnou a polarizačním multiplexováním byly pro rychlost 112 Gb.s^{-1} na jeden kanál zjištěny modulační rychlosti u PM-QPSK, PM-8PSK, PM-8QAM, PM-16QAM, 64QAM a PM, 28, 18.7, 18.7, 14 a 9,33 Gbaud. Elektrické a optické komponenty k realizaci těchto modulačních rychlostí jsou již komerčně dostupné. Proto mohou být 100G systémy s modulačními formáty založenými na jedné nosné praktičtější. [6]

Hlavní důraz u rychlosti nad 100 Gb.s^{-1} je kladen právě na vícestavové modulační formáty založené na M-QAM schématu a koherentním příjmu aplikovaném na modulační formáty s jednou nosnou i více subnosnými. Stěžejním cílem je maximalizovat jejich spektrální účinnost. S ohledem na potenciální 400 Gb.s^{-1} a 1 Tb.s^{-1} možnosti přenosu je také potřeba použít a zvýšit flexibilní grid DWDM systémů. Jinou možností pro tyto rychlosti je použití OFDM signálů, nicméně zde narážíme na problémy související s tímto modulačním formátem, uvedenými v této kapitole. [9]

3.2.1 Modulační formáty pro systémy pracující s rychlostí na 100 Gb.s^{-1} na kanál

Tabulka 3.1 shrnuje OSNR požadavky vícestavových modulačních formátů uvedených a zkoumaných v [6] na rychlosti přibližně 112 Gb.s^{-1} na kanál s $\text{BER} = 1 \times 10^{-3}$. Naměřené hodnoty OSNR při $\text{BER} = 1 \times 10^{-3}$ jsou 15.8, 19, 17.9, 20, a 26,4 dB pro $\sim 112 \text{ Gb.s}^{-1}$ QPSK, 8PSK, 8QAM, 16QAM, 64QAM. Ve srovnání s teoretickými předpoklady, tak stále existuje několika decibelová rezerva. Modulace PM-QPSK s digitální koherentní detekcí má ve srovnání s ostatními uvedenými formáty výhody v nižších OSNR požadavcích a v jednoduché konfiguraci vysílače.

Modulační formát	Požadavek na OSNR [dB] (teoretický)	Požadavek na OSNR [dB] (naměřený)
PM-QPSK	13	15,8
PM-8PSK	16,6	19
PM-8QAM	15	17,9
PM-16QAM	17	20
PM-64QAM	21,5	26,4

Tabulka 3.1: OSNR požadavky vybraných modulačních formátů [6]

















Použití těchto pokročilých formátů bylo prokázáno v mnoha vysokokapacitních přenosových experimentech a v posledních letech publikováno na top konferencích European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) a Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), vše je znázorněno v tabulce 3.2. QPSK signál má nižší OSNR požadavky, takže může být přenášen na delší vzdálenosti. Dále jsou zde uvedeny běžně demonstrovány nejvyšší spektrální účinnosti pro 100 Gb.s⁻¹ PM-QPSK, PM-8PSK, PM-8QAM a PM-16QAM, které jsou: 3,2, 4, 4, a 6,2 bit/Hz/s. Tyto pokročilé modulační formáty mohou být generovány využitím komerčně dostupných optických modulátorů s binárními elektricky řízenými signály prostřednictvím nových syntézních metod. S využitím digitální koherentní detekce mohou být všechny tyto modulační formáty detekovány využitím universálních přijímačů front-end.[6]

Modulační formát	Bitová rychlost na kanál [Gb.s⁻¹]	Spektrální účinnost [b/Hz/s]	Kapacita [Tb.s⁻¹]
PM-RZ-8QAM	114	4	32
PM-RZ-DQPSK	160	3,2	25,6
PM-RZ-8PSK	114	4	17
PM-QPSK	112	2	16,4
PM-QPSK	112	2	15,5
PM-O-QPSK	111	2	13,5
PM-16QAM	112	6,2	1

Tabulka 3.2: Vybrané vlastnosti modulačních formátů zjištěné v různých experimentech [6]

Další porovnání modulačních formátů je uvedeno v [9]. V kategorii modulačních formátů pro 100 Gb.s⁻¹ jsou zkoumány OOK, OOK-VSB, DQPSK, RZ-DPSK-3ASK, PM-DQPSK, OP-FDM-RZ-DQPSK, PM-QPSK a PM-OFDM-QPSK. Tyto formáty jsou uvedeny v tabulce 2.3. Z ní je patrné, že nejvhodnějším formátem pro 100 Gb.s⁻¹ systémy je stejně jako v [6] PM-QPSK, zde následovaný PM-OFDM-QPSK. PM-QPSK umožňuje koherentní detekci, jeho předpokládaný dosah je 1500 km, při uvažované chybovosti BER = 4x10⁻³ vykazuje nejlepší toleranci k OSNR < 15 dB, je velmi odolný vůči CD

a PMD. Srovnatelné vlastnosti vykazuje i PM-OFDM-QPSK u kterého se navíc předpokládá větší dosah až do 2000 km, nicméně jeho nevýhoda je v nekompatibilitě s 10G a 40G systémy a nemožnost využít u něho filtraci pomocí rekonfigurovatelných optických add-drop multiplexerů (ROADM). Další výhodou PM-QPSK je dostupnost jeho komponent pro 100G systémy, optimální výkonová spotřeba a přijatelná mohutnost systému, pro systémy na dlouhou vzdálenost se také jeví jako cenově přijatelný formát. Oproti tomu jsou nevýhodami PM-OFDM-QPSK vyšší spotřeba, mohutnost systému a pro 100G systémy potřeba dvou 50G rozhraní.

Modulační formát	OOK	OOK-VSB	DQPSK	RZ-DPSK-3ASK	PM-DQPSK	OP-FDM-RZ-DQPSK	PM-QPSK	PM-OFDM-QPSK
koh./nekoh.	nekoh.	nekoh.	nekoh.	nekoh.	nekoh.	nekoh.	koh.	koh.
bitů/symbol	1	1	2	2,5	2x2	2x2	2x2	2x2x2
modulační rychlost(Gbd)	112	112	56	44	28	28	28	14
konstelace								 x2
DWDM grid (GHz)								
spektrální účinnost (bit/s/Hz)	0,5	1	1	2	2	1	2	2
OSNR tolerance [dB] při BER=4x10 ⁻³	17,5	18,5	15,5	>20	15,5	15,5	<15	<15

Tabulka 3.3: Modulační formáty pro systémy 100 Gb.s⁻¹ [9]

Jiné zkoumání modulačních formátů proběhlo v [10] i zde je uvedeno, že nejběžněji používaný formát na rychlosti 100 Gb.s⁻¹ na kanál je PM-QPSK. Hovoří se tu i o možnosti použití QPSK modulace, kde je však potřeba 2 x vyšší modulační rychlost. Modulace PM-QPSK je zde podrobena porovnání s 8PSK a OFDM a je uvedeno, že dosahuje optimální rovnováhy mezi cenou a složitostí, navíc také podporuje koherentní detekci a využití DSP. Co se týká běžně používaných modulačních formátů pro 40G systémy, tak těmi jsou modulace PSK, DPSK, QPSK a CRZ-DQPSK u kterých je též menší srovnání. Fázová modulace PSK má o 3 dB nižší OSNR požadavky než OOK a je ovlivňována menšími nelineárními jevy. Lepší než DPSK je pak QPSK modulace, která redukuje modulační rychlost na polovinu. RZ technologie pak pomáhá s OSNR požadavky, nelinearitami

a PMD účinky a RZ s čirpem tedy CRZ navíc kompenzuje zkreslení fáze způsobené právě nelineárními účinky, též zlepšuje přenášený výkon – proto se používá CRZ-DQPSK. [10]

V [11] se pak jako významný kandidáti pro 40G, ale i 100G systémy jeví modulační DPSK, DQPSK a koherentní QPSK (PM-QPSK).

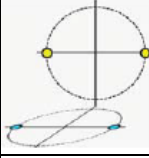
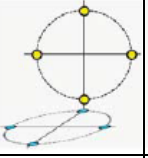
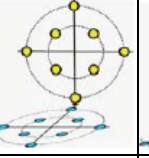
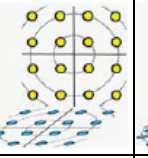
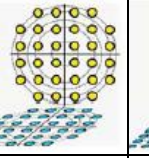
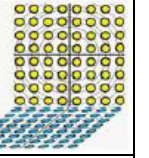
3.2.2 Modulační formáty pro systémy pracující s rychlostí nad 100 Gb.s⁻¹ na kanál

V druhé kategorii modulačních formátů pro systémy nad 100 Gb.s⁻¹ byly v [9] zkoumány jmenovitě formáty PM-QPSK, PM-8QAM, PM-16QAM, PM-32QAM, PM-64QAM, PM-256QAM pro rychlosti 200, 400 a 1000 Gb.s⁻¹. Jako referenční modulační formát byl uveden 100 Gb.s⁻¹ PM-QPSK. Formáty použitelné na této rychlosti lze rozdělit podle počtu nosných na modulační formáty s jednou nosnou a s více nosnými.

Modulační formáty s jednou nosnou

Pro dosažení 100 Gb.s⁻¹ a vyšších rychlostí s využitím pouze jedné nosné musí být použité vícestavové modulační formáty. V poslední době se k získání přenosových rychlostí 200 Gb.s⁻¹ na kanál používá QAM schéma společně s polarizačním multiplexováním, konkrétně PM-16QAM. Pro signál M-QAM nebo 2^m QAM platí, že m značí počet bitů, které jsou přeneseny v jednom časovém slotu nebo symbolu, kde m je celé číslo. Přidáním polarizačního multiplexování vytvoříme PM-2^m-QAM formát, u kterého je za symbol přeneseno 2 x m bitů.

Pro PM-QAM signály mohou být využity různé konstelace. Tyto konstelace jsou zobrazeny v tabulce 3.4. Se zvyšujícím se počtem symbolů se Euklidovské vzdálenosti mezi symboly výrazně snižují. Takže se zvyšuje bitová chybovost, což vyžaduje větší poměr OSNR a to úměrně se zvýšením počtu symbolů v QAM konstelaci. Tabulka 3.4 zahrnuje teoretické hodnoty penalty OSNR za předpokladu, že je na všech formátech stejná bitová rychlost. Podle Shannonovy teorie musí být zvyšující se spektrální účinnost zaplácena větším OSNR. Shannonova teorie byla využita k popisu kapacitních limitů optických vláknových přenosů a sítí zahrnujících klasické vláknové chyby jako zesílení spontánní emise, CD a vláknové nelinearity založené na Kerrově jevu. V současné době je ve vysokém zájmu výzkumu optimalizace spektrální účinnosti signálů M-QAM pomocí Nyquistova filtrování. Nyquistova-WDM (N-WDM) již byla prokázána v podmořských přenosových konfiguracích využívajících PM-RZ-QPSK. N-WDM kanálová rozteč je rovna kanálové rozteči $f_n = 1$, kde f_n udává poměr mezi WDM gridem a modulační rychlostí. Na pozemních (městských) přenosových konfiguracích byla kvůli cenové efektivitě RZ modulace vynechána. V této kapitole neuvažujeme N-WDM s Nyquistovým faktorem $f_n = 1$, ale s pesimističtějšími hodnotami $f_n = 1,56$ (= 50 GHz / 32 Gbaud) jako referencí pro spektrální účinnost dat pro formáty s jednou nosnou na rychlostech více jak 100 Gb.s⁻¹. Aktuální 100 Gb.s⁻¹ systémy s 32 Gbaud symbolovou rychlostí budou fungovat na přenosové rychlosti 128 Gb.s⁻¹ namísto 112 Gb.s⁻¹ za symbol s 28 Gbaudy. [9]

Modulační formát	PM-BPSK	PM-QPSK	PM-8QAM	PM-16QAM	PM-32QAM	PM-64QAM
bit/symbol	2x1	2x2	2x3	2x4	2x5	2x6
konstelace						
Penalta OSNR [dB]	0	0	2	4	6	8,5

Tabulka 3.4: Porovnání modulačních formátů pro systémy nad 100 Gb.s^{-1} (Penalty OSNR jsou vztaženy k stejným bitovým rychlostem – PM-BPSK slouží jako reference) [9]

V tabulce 3.5 jsou uvedeny modulační formáty nad 100 Gb.s^{-1} se 100 Gb.s^{-1} referencí a s polarizační multiplexací použitou u všech formátů. Jak již bylo vysvětleno výše, uvažujeme pesimističtější hodnoty f_n , konkrétně $f_n = 1,56$. Spektrální účinnost dat u 400 Gb.s^{-1} PM-256QAM bude limitována na 8 bit/s/Hz a celková kapacita přes C-pásmo bude kolem 35 Tb.s^{-1} . Nicméně s optimističtějšími hodnotami f_n a vysokým výkonem se může náš postoj M-QAM versus spektrální účinnost změnit tak, že 8 bit/s/Hz můžeme získat s nižšími M-QAM modulacemi: např. s PM-128QAM, PM-64QAM nebo dokonce i s PM-32QAM.

Dva 1 Tb.s^{-1} formáty jsou v tabulce 3.5 uvedeny k naznačení potřeb velmi vysokých symbolových rychlostí. Proto je dnes vhodnější pro tyto rychlosti využít systémy s více nosnými, které mají nižší modulační rychlosti. Hodnoty OSNR jsou uvedeny s ohledem na minimální a maximální možné symbolové rychlosti. Všechny jsou vztaženy k referenční OSNR hodnotě $8,2 \text{ dB}$ vypočtené pro 40 Gb.s^{-1} PM-QPSK. OSNR hodnoty při minimální přenosové rychlosti jsou spojeny s minimální Q-faktorem $8,5 \text{ dB}$ (max. BER = $3,8e^{-3}$). OSNR hodnoty s maximální symbolovou rychlostí jsou spojeny s minimálním Q-faktorem $6,4 \text{ dB}$ (max. BER = $1,8e^{-2}$). Čistý OSNR zisk pro maximální modulační rychlosti je vyšší o $2,4 \text{ dB}$.

Hodnota penalty OSNR je odkazována k referenci 100 Gb.s^{-1} . OSNR penalta např. pro PM-64QAM na 400 Gb.s^{-1} dosahuje již $14,5 \text{ dB}$, což znamená, že 400 Gb.s^{-1} M-QAM potřebují být regenerovány dříve než 100 Gb.s^{-1} QPSK. Hlavními limitními faktory pro vysokou symbolovou rychlost je rychlost digitálně-analogové (DA) a analogově-digitální (AD) konverze. Pokud se podíváme na možnosti symbolových rychlostí, které mohou být v blízké době realizovatelné, tak pravděpodobná je rychlost 43 Gbaud pro 400 Gb.s^{-1} jednonosné PM-64QAM. [9]

Modulační formát	PM-QPSK	PM-16QAM	PM-QPSK	PM-8QAM	PM-16QAM	PM-32QAM	PM-64QAM	PM-256QAM	PM-32QAM	PM-64QAM
bitová rychlost [Gb.s ⁻¹]	100	200	400						1000	
symbolová rychlost [Gbd]	28-32	28-32	112-128	75-85	56-64	45-51	37-43	28-32	112-128	93-107
bit/symbol	4	8	4	6	8	10	12	16	10	12
kanálová rozteč	50	50	200	133	100	80	67	50	200	166
SE* [bit/s/Hz]	2	4	2	3	4	5	6	8	5	6
počet C-pásmových kanálů	88	44	22	33	44	55	66	88	22	26
celková kapacita [Tb.s ⁻¹]	8,8	17,6	8,8	13,3	17,6	22	26,4	35	22	26
OSNR [dB] min. bit.rychlost	12,2	19,2	18,2	20,2	22,2	24,2	26,7	>30	28,2	30,7
OSNR [dB] max. bit.rychlost	9,8	16,8	15,8	17,8	19,8	21,8	24,3	>30	25,8	28,3

Tabulka 3.5: Přehled M-QAM možností pro 400 a 1000 Gb.s⁻¹ využívající 100 Gb.s⁻¹ (PM-QPSK) a 200 Gb.s⁻¹ (PM-16QAM) jako referenci [9]

*SE – spectral efficiency (spektrální účinnost)

Modulační formáty s více nosnými – OFDM přenosy

O-OFDM jako formát s více nosnými, s kterým bylo seznámeno v kapitole 3.2, je atraktivním přístupem pro podporu vysoce širokopásmových kanálů. Vysílač a přijímač OFDM systému má podobné nastavení jako QAM systémy.

V několika přenosových experimentech využívajících polarizačně multiplexované O-OFDM a PM-O-OFDM bylo pro podmořské vzdálenosti dosaženo terabitových přenosových rychlostí na kanál. Nedávné pokusy pro přenosy v terénu přes instalované standardní jednovidové vlákno (SMF) použily PM-OFDM formát se 112G DQPSK kanály s využitím 253 Gb.s⁻¹ OFDM se subnosnými nesoucími QPSK signál a 400 Gb.s⁻¹ nesoucími 8QAM signály přes 768 km a Tb.s⁻¹ přes 454 km a 3560 km. [9]

3.2.3 Shrnutí

Modulační formáty se zkoumají na systému WDM. S rostoucí bitovou rychlostí a přenosovou vzdáleností jsou však spojené fyzické limity, které použití tohoto systému omezují, tyto limity, které jsou uvedené v [10] jsou:

- nižší OSNR
- nižší tolerance k disperzi
- silnější nelineární účinky
- silnější účinky PMD

Čím vyšší je tedy rychlost, tím vzrůstá požadavek na OSNR, klesá tolerance k disperzi a PMD a jsou silnější účinky nelinearit [10].

Z informací uvedených v kapitolách 3.2.1 a 3.2.2 je patrné, že aktuálním trendem je použití vícecestavových modulačních formátů nebo polarizační multiplexace. Tyto formáty, které mohou být nasazovány i díky pokrokům v digitální koherentní detekci, zvyšují spektrální účinnost v porovnání s analogovými modulačními formáty. Další jejich výhodou je, že využití digitálního signálu snižuje požadavky na hardware, šum a interferenční chyby, ve srovnání s analogovým signálem, který vyžaduje velkou šířku pásma na symbol k jeho přenesení. Snižují též modulační rychlost. Signály s více nosnými mohou být odolnější vůči CD a PMD, a to díky nižším bitovým rychlostem jednotlivých subnosných nesoucích signál, nicméně je u těchto modulačních formátů horší komerční dostupnost elektrických a optických komponent k jejich realizaci.

Pro systémy se 100 Gb.s^{-1} na kanál se na základě uvedených informací jeví jako praktičtější modulační formáty s jednou nosnou. V tabulkách 3.1 – 3.3 a na konci kapitoly 3.2.1 jsou pak uvedeny možné modulační formáty pro 100 Gb.s^{-1} rychlosti z nichž nejlépe vychází vzhledem ke svým vlastnostem formát PM-QPSK. Tato modulace je označena jako velmi dobré řešení hned v několika zdrojích, například v [6], [9], [10] a [11].

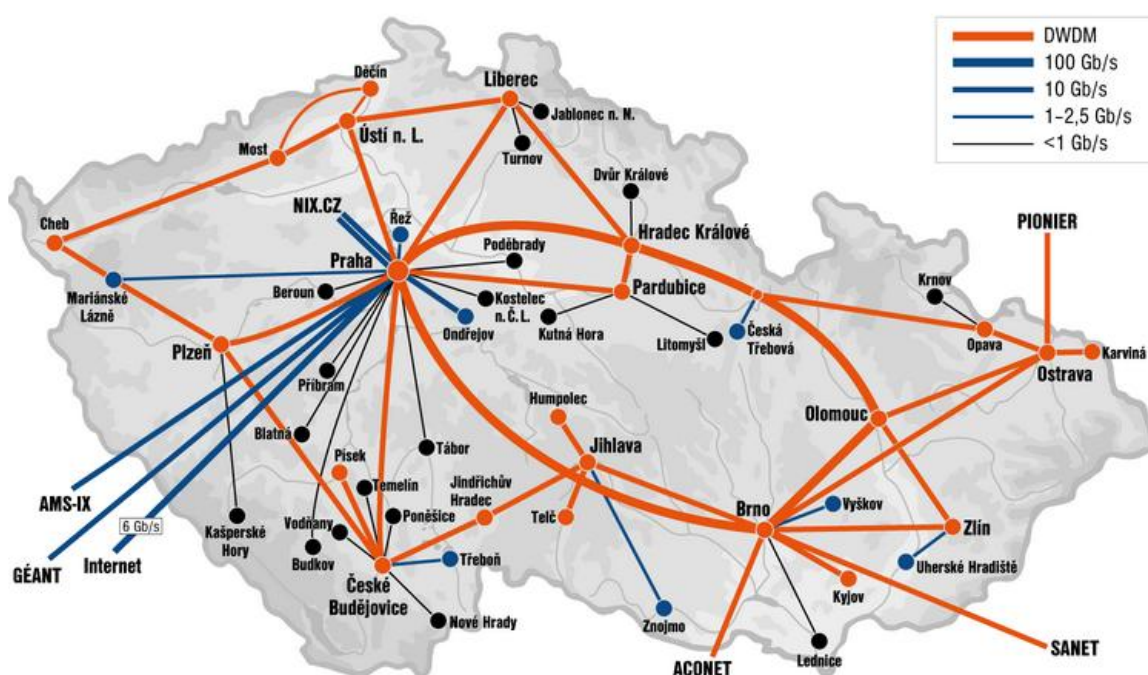
Pro další hierarchii 400 Gb.s^{-1} přenosů se velmi podporuje myšlenka znovu zaktualizovat elektronické technologie podporující symbolové rychlosti do 32 Gbaud, ale také to, aby byli kompatibilní s ROADM technologiemi podporujícími fixní grid 50 GHz. V současnosti nejslibnější řešení pro 400 Gb.s^{-1} přenosy jsou založeny na dvounosných 200 Gb.s^{-1} PM-16QAM modulacích se symbolovou rychlostí 32 Gbaud, podporující spektrální účinnost = 4 bit/s/Hz. Díky tomuto řešení je OSNR ztráta v porovnání se 100 Gb.s^{-1} PM-QPSK limitována na asi 4 dB. Reálné využití jednonosného řešení PM-MQAM bude záviset na pokroku v rychlostech převodu ADC a DAC v koherentním detektoru, Nyquistově filtračních technikách a implementaci vysoce výkonných systémů.

Směrem k Tb.s^{-1} rychlostem se jeví jako slibná možnost využití O-OFDM modulace vyžadující v současnosti nereálné vysoké symbolové rychlosti, které se v nejbližší době jeví jako technologicky neproveditelné. Druhou možností pro Tb.s^{-1} rychlosti je využití M-QAM s vysokými konstelacemi, nicméně zde platí stejné

nedostatky, jako již u tohoto formátu uvedené v předešlém odstavci. Pro budoucí 400 Gb.s^{-1} a 1 Tb.s^{-1} bitové rychlosti je vyžadována podpora flexibilního managementu gridu. Toto tvrzení je založeno na řešení formátů s náročnými symbolovými rychlostmi, které jsou $2x - 4x$ vyšší než je v současnosti možné.

3.3 Síť CESNET2

Na základě informací uvedených v předešlých kapitolách se jako žádoucí jeví rozpracování jako například u sítě CESNET2. Kapitola pojednává o názorném řešení dané problematiky v reálné síti fungující na území České republiky. Uvedená síť je spravována sdružením CESNET [12].



Obrázek 3.2: Topologie sítě CESNET2 k lednu 2014 [13]

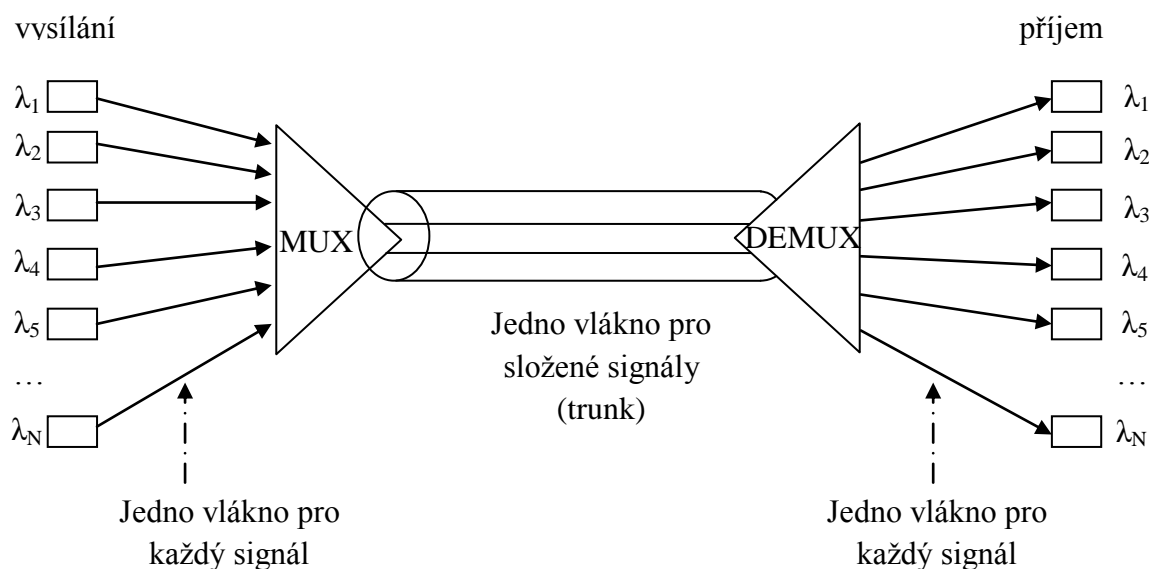
Z obrázku 3.2 znázorňujícím topologii sítě CESNET2 je patrné, že jádrem sítě je bohatá infrastruktura s desítkami přenosových kanálů o rychlostech 1 , 10 a 100 Gb.s^{-1} . S jejím budováním bylo započato v roce 2005, kdy byla zprovozněna první DWDM trasa mezi Prahou a Brnem. Průběžně je neustále rozšiřován jak počet připojených uzlů, tak i počet a kapacita kanálů. Jádro sítě, které tvoří okruh Praha – Hradec Králové – Olomouc – Brno – Praha pracuje od roku 2013 na přenosové rychlosti 100 Gb.s^{-1} na kanál. Trasy do menších uzlů nabízejí rychlosti v rozsahu od 10 do 1000 Mb.s^{-1} . Také jejich kapacita je průběžně navyšována v souladu s potřebami a reálným provozem konkrétních uzlů.

Topologie sítě se skládá z kruhů procházejících omezeným počtem měst (ideálně do čtyř měst na jednom kruhu). Cílem je redundantní páteř sítě s nepříliš dlouhými trasami a tudíž s malým zpožděním, které vzniká v aktivních prvcích sítě. [13]

Ani tato síť se nevyhnula nasazení systému DWDM. Zatímco optické trasy na delší vzdálenosti již fungují na 100 Gb.s^{-1} na kanál, trasy na kratší vzdálenosti nikoliv. To je další důvod toho, proč se v následující části práce zabýváme se praktickým simulováním optického systému zaměřím na systém DWDM fungujícím na kratší vzdálenosti bez použití optických zesilovačů na trase.

3.4 Princip WDM systému

Vlnový multiplex WDM je založen na myšlence sdružit několik optických kanálů, které byly dříve přenášeny každý jedním vláknem, do jednoho vlákna na základě vlnového, čili v podstatě frekvenčního oddělení. [14] Toto společné vlákno, které je jednovidové, může přenášet mnoho odlišných vlnových délek ve stejný čas. Například pokud do něho sdružíme (multiplexujeme) dva lasery o různé vlnové délce, bude obsahovat dva módy prvního řádu s odlišnými vlnovými délkami na rozdíl od mnohavidového vlákna, které přenáší několik odlišných módů pro každou vlnovou délku. Vlnová délka, kterou můžeme chápat též jako jakousi adresu k směrování signálu, slouží k různým účelům (přenáší různé informace), proto je pro každý kanál jiná a takto vzniklé optické kanály jsou na sobě nezávislé. Na konci vlákna jsou pak od sebe odděleny (demultiplexovány) a detekovány každá zvlášť. [15]



Obrázek 3.3: Princip vlnového sdružování [16]

Obrázek 3.3 graficky znázorňuje princip vlnového sdružování. Každý kanál pro multiplexaci označený $\lambda_1 - \lambda_N$, kde N udává pořadové číslo kanálu, musí splňovat určité požadavky a rychlostní limity přenosové soustavy. Vynásobením N x přenosová rychlost na kanál pak získáme celkovou přenosovou kapacitu celého systému.

Výhody systému WDM [15]:

- pracuje na standardních jednovidových vláknech
- pracuje s nízkými rychlostními zařízeními
- transparentní: nezávisí na protokolu, který má být přenášen
- rozšiřitelný: místo přepínání do nových technologií mohou být nové kanály jednoduše přidány k těm stávajícím. Firmy pouze musí zaplatit za šířku pásma, kterou aktuálně potřebují - snadné zvýšení kapacity

Systém WDM lze rozdělit do dvou verzí v kterých existuje a to na Coarse WDM (CWDM) neboli hrubý vlnový multiplex a již zmíněný DWDM. O těchto systémech hovoří kapitoly 3.4.1 a 3.4.2.

3.4.1 CWDM

Hrubý vlnový multiplex CWDM, který je charakterizován v doporučení ITU-T G. 694.2 viz [17], má na rozdíl od DWDM širší kanálové rozestupy. V tomto doporučení je definován v rozmezí od 1271 nm do 1611 nm s pevně danými rozestupy 20 nm. Do takto omezeného spektra lze umístit 18 kanálů, spektrální účinnost je tedy mnohem nižší než v případě DWDM u kterého by se do tohoto 20 nm pásma dalo vložit hned několik desítek kanálů. Rastr CWDM je takto navržen z toho důvodu, aby ho bylo v případě potřeby možné kombinovat právě se systémem DWDM, čímž se spektrální účinnost takového systému výrazně zvedne. Díky velkým rozestupům umožňuje použití laserů s větší šířkou vyzařovaného spektra nebo s větší nestabilitou pracovní vlnové délky dané teplotním přeladěním. Akceptovatelné hodnoty frekvenčního přeladění těchto laserů se uvádějí mezi 6 – 7 nm. [18]

3.4.2 DWDM

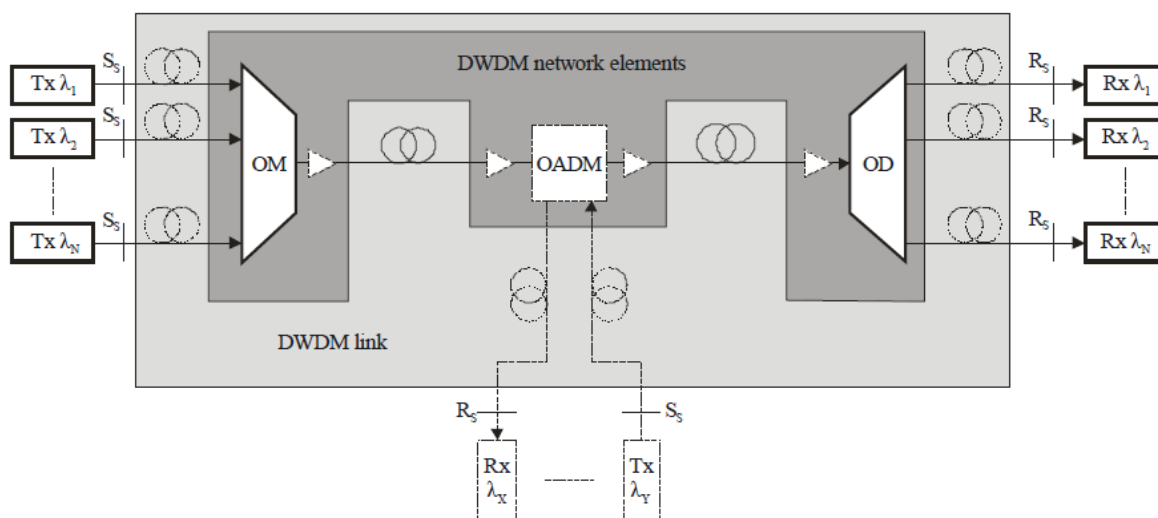
DWDM systém je popsán v doporučení ITU-T G. 694.1 viz [19]. Rozestupy použitých kanálů podle tohoto doporučení jsou uvedeny v kapitole 3.5.3. Referenční frekvence je 193,1 THz a použitelné vlnové délky, respektive frekvence, jsou z pásma C (1530 – 1565 nm) a L (1565 – 1625 nm). Důvodem zvolení pásma C je, že standardní optické vlákno na jeho vlnových délkách vykazuje nejnižších hodnot útlumu a bez problému v něm pracují optické zesilovače EDFA. Pásmo L se pak v současnosti začíná používat u vysokokapacitních přenosů. [18]

3.5 Topologie a použitelné kanálové rozestupy systému DWDM

V této kapitole popisují topologie, které je možné běžně použít u systému DWDM a jež jsou uvedené v doporučeních ITU-T G. 698.1 [20] a G. 698.2 [21]. Tedy point-to-point topologií a kruhovou topologií.

3.5.1 Point-to-Point topologie DWDM

Uvedená topologie je dominantní pro přenosy s velkým dosahem vyžadující velmi vysoké přenosové rychlosti, celkové šířky pásma, vysokou signálovou integritu a spolehlivost či rychlou obnovovací schopnost. Při využití zesilovačů se point-to-point DWDM systém používá pro dosahy řádově několik stovek kilometrů. Typický počet zesilovačů na optické trase se pohybuje pod 10. Při použití add-drop multiplexace je možno s trasy navíc odebrat či do ní naopak přidat další kanály. Celkový počet kanálů, kanálové rozestupy, typ použitého vlákna, metoda modulace a typ použitých komponent jsou parametry, které určují celkovou kapacitu systému. [22]

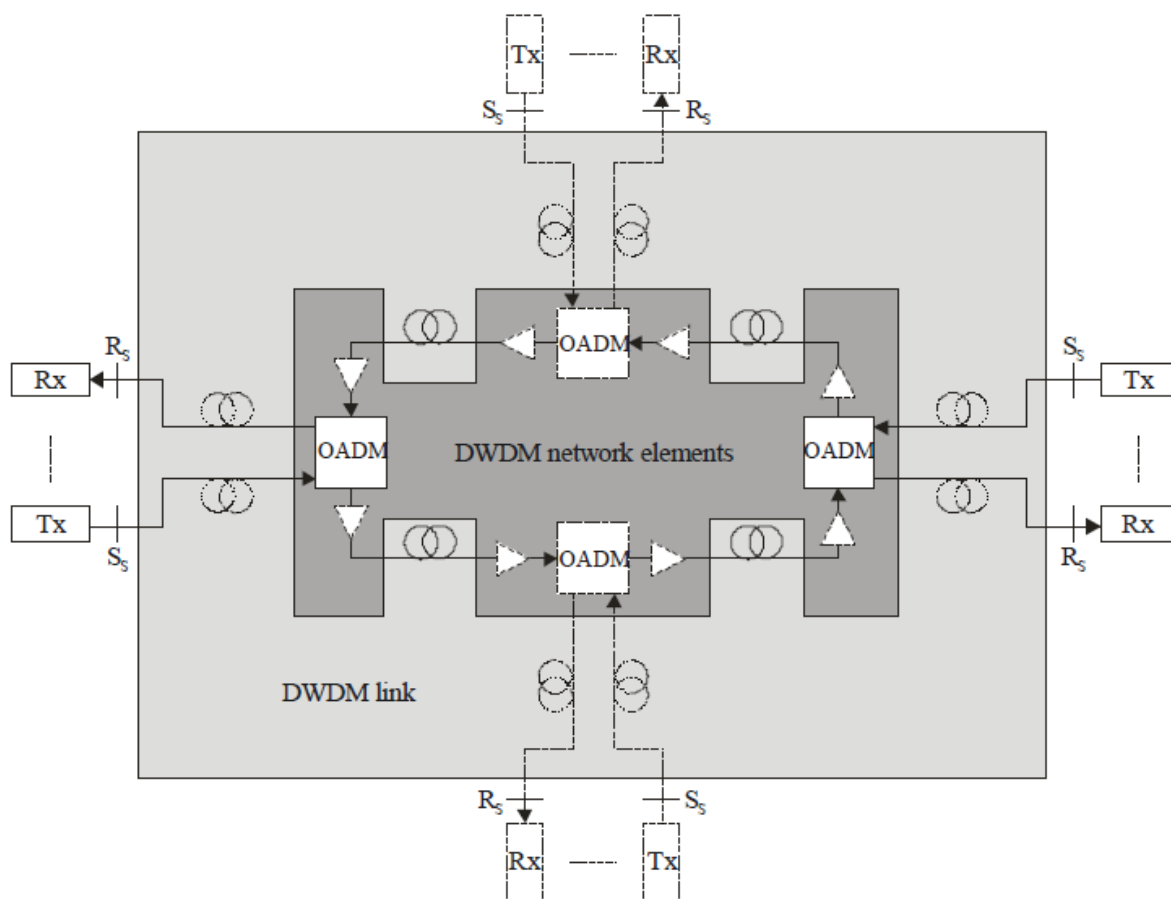


Obrázek 3.4: DWDM point-to-point topologie s OADM a optickými zesilovači [21]

3.5.2 Kruhová topologie DWDM

Existuje řada systémů, které jsou v praxi nasazeny a využívají tuto topologii. Obecně se kruhová topologie DWDM skládá z vlákna v kruhové konfiguraci, které plně vzájemně propojuje uzly sítě, ty jsou minimálně 2. Některé systémy mají vlákna v kruhu dvě, kvůli síťové ochraně. Takovéto sítě zpravidla pokrývají oblast lokálních a metropolitních sítí s dosahy několik desítek kilometrů. Obsahují několik optických kanálů a uzlů. Každý uzel obsahuje OADM. Stejně jako u topologie point-to-point i zde je pro větší dosah možno použít optických zesilovačů. Po vyvážení vlnových délek s OADM

uzlu je pak možno spojení s multiplexorem či demultiplexorem pro další zpracování signálu. [22]



Obrázek 3.5: DWDM kruhová topologie s OADM a optickými zesilovači [21]

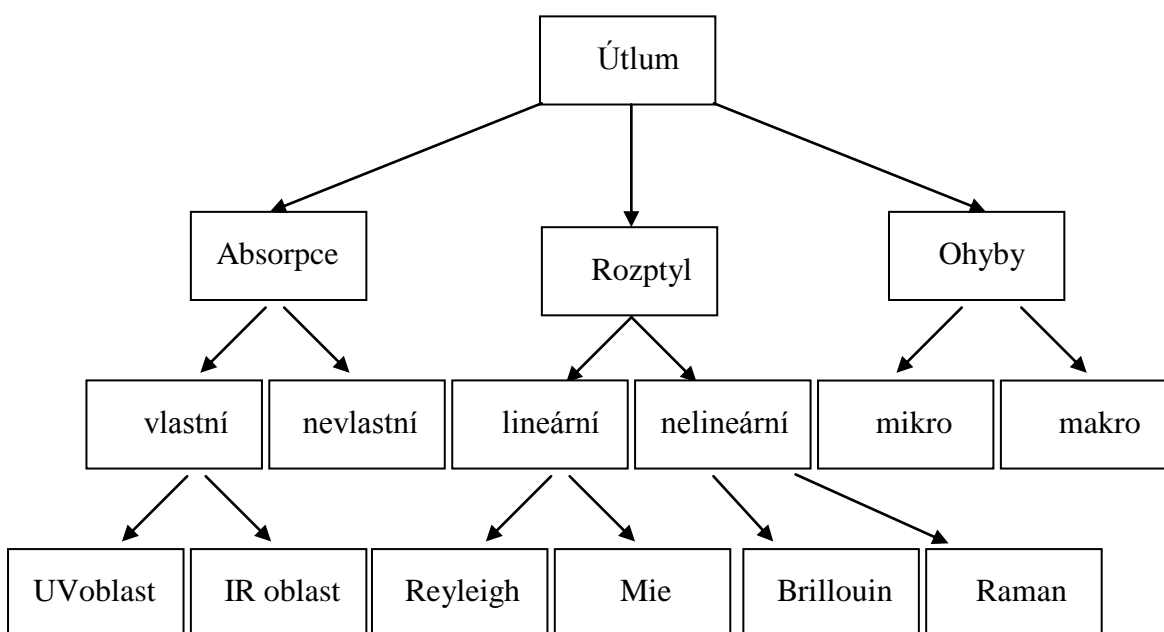
Uvedené konfigurace DWDM systému na obrázcích 3.4 a 3.5 umožňují jednosměrný provoz. V aktuálních doporučeních ITU-T G. 698.1 [20] a G. 698.2 [21] jsou zobrazeny i konfigurace pro obousměrný provoz, nicméně neobsahují žádné obousměrné aplikace, ale očekává se, že v jejich budoucí revizi budou přidány. Topologie obousměrná se od té jednosměrné liší v tom, že optický multiplexor u verze point-to-point může pracovat i jako optický demultiplexor a naopak. Optické zesílení probíhá v obou případech taktéž obousměrně. Více informací lze dohledat v [20] a [21].

3.5.3 Použitelné kanálové rozestupy DWDM

Kanálové rozestupy, které je možné u systému DWDM využít jsou uvedené v doporučení ITU-T G. 694.1 viz [19]. V této práci se zabývám použitím fixního gridu, ten je v [19] uveden v rozsahu od 12,5 GHz do 100 GHz a širšího (celočíslné násobky 100 GHz).

3.6 Možnosti minimalizace útlumu

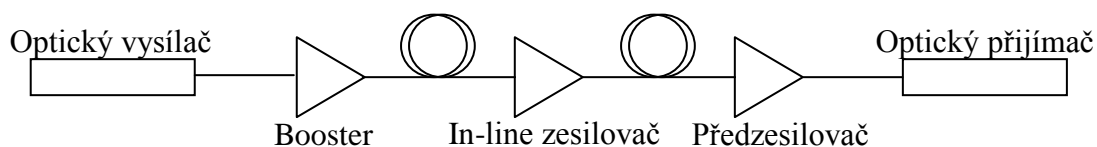
Aspektem, na který je potřeba brát při návrhu optického systému zřetel je útlum. Zdroje útlumu jsou znázorněné na obrázku 3.6, bližší informace o těchto jevech lze najít v [23] a [24].



Obrázek 3.6: Jevy způsobující útlum optického záření [23]

Různé typy jednovlákových vláken, které mají hodnoty útlumu či disperze vylepšené, jsou pak uvedena v doporučeních ITU-T G. 652 – 657 viz [25], [26], [27], [28], [29] a [30]. S použitím těchto vláken je pak možné díky menšímu útlumu či disperzi dosáhnout větších přenosových vzdáleností.

Druhou možností jak snížit útlum je pak využití optických zesilovačů na trase. Nicméně zde pak přecházíme z pasivních optických sítí k sítím aktivním. Podle umístění optických zesilovačů na trase je pak označujeme jako booster neboli výkonový zesilovač, in-line zesilovač a předzesilovač, kde odlišné umístění na trase vede k různým vlastnostem, které jsou uvedené v doporučení ITU-T G. 662 viz [31].



Obrázek 3.7: Výkonový zesilovač, linkový zesilovač a předzesilovač a jejich umístění na optické trase

Optické zesilovače lze navíc rozdělit do tří kategorií podle způsobu dodání energie potřebné k jeho správné funkci na:

- polovodičové zesilovače SOA (Semiconductor Optical Amplifier)
- vláknové zesilovače s dotací xDFA (x Doped Fiber Amplifier) – x = přípustný chemický prvek
- Ramanovy zesilovače RA (Raman Amplifier)

Toto rozdělení s dalšími informacemi o optických zesilovačích je uvedené v [32].

4. Schémata a simulační prostředí

Následující kapitola nejprve stručně popisuje simulační prostředí OptSim, dále hovoří o způsobu vyhodnocení simulací, důvodu volby daného systému DWDM, jeho nastavení a popisu simulačních schémat.

4.1 Simulační prostředí OptSim

K simulacím bylo využito simulační prostředí OptSim od firmy RSoft Design Group. Toto prostředí podporuje dva módy pro simulace – block mód a sample mód. V diplomové práci je použitý tzv. sample mód, při kterém signálová data procházející mezi komponentami představují jeden vzorek nebo časový krok celkového simulačního času, na rozdíl od block módu, kde signálová data reprezentují celý simulační čas v jednom bloku dat. V uvedeném sample módu byl využit režim Variable Bandwidth Simulation (VBS), který provádí plně časové simulace s možnostmi zahrnutí / nezahrnutí šumu nebo lineární / nelineární simulace. [33]

4.2 Vyhodnocení simulací

K vyhodnocení simulací, respektive k zjištění Q-faktoru a bitové chybovosti (BER) byla využita komponenta *electrical scope*, umožňující vykreslení diagramu oka, amplitudy elektrického signálu, histogramu optimálních okamžiků vzorkování a výkonového spektra elektrického signálu.

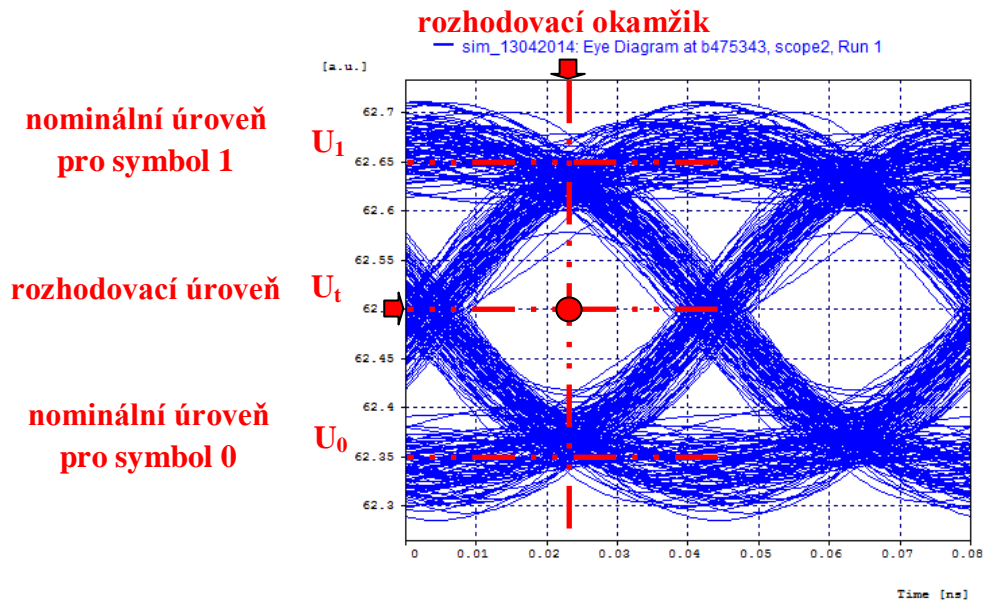
Odhad Q-faktoru z diagramu oka je počítán využitím středních hodnot a rozptylu vzorků signálu využitím následujícího vzorce:

$$Q = \frac{m_1 - m_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1)$$

kde m_1 , m_0 jsou střední hodnoty vyhodnocovaných signálových vzorků „1“ respektive „0“, σ_1 a σ_0 jsou rozptyly vyhodnocovaných signálových vzorků „1“ resp. „0“. Problém nastává, chceme-li určit hodnotu Q-faktoru u modulací s více jak dvěma stavy, pak je potřeba přijímaný signál rozdělit až na kvadrurní a soufázovou složku, kde každá tato složka již obsahuje pouze dvě hodnoty signálových vzorků. Pokud je navíc použit signál s polarizačním multiplexováním je potřeba nejprve na přijímači tyto dvě polarizace rozdělit a až poté ho dále členit až na výslednou soufázovou a kvadrurní složku. Z tohoto důvodu pro vícestavové modulace nestačí pro vyhodnocení Q-faktoru jenom jedna součástka *electrical scope*, ale je potřeba pro čtyřstavové modulace dvou a pro osmistavové již čtyř těchto součástek. Tímto způsobem jsem tedy v práci dané modulace vyhodnocoval s tím, že při použití více uvedených součástek, jsem jako výslednou hodnotu Q-faktoru pro danou modulaci bral tu, která byla na dané *electrical scope* nejnižší, tedy hodnotu nejhorší. Z Q-faktoru je pak možné pomocí vzorce

$$\text{OSNR} = 20 * \log(Q) \quad (2)$$

určit odstup optického signálu od šumu (OSNR) v decibelech [dB].



Obrázek 4.1: Diagram oka [34]

BER je počítaná s využitím Gaussova rozdělení pro funkci hustoty pravděpodobnosti z přijímaného signálu následujícím způsobem

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \left[\text{erfc} \left(\frac{m_1 - V_{\text{th}}}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \text{erfc} \left(\frac{V_{\text{th}} - m_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) \right] \quad (3)$$

kde V_{th} je práh rozhodnutí mezi „1“ a „0“ a erfc komplementární chybová funkce. [33]

4.3 Simulace modulačních formátů v systému DWDM

Zde je popsáno nastavení komponent potřebných pro simulace tohoto systému s uvedením důvodu volby právě tohoto systému a modulací.

4.3.1 Volba simulací

Pro simulace jednotlivých modulačních formátů a hledání z vybraných modulací té s nejlepšími dosaženými výsledky bylo využito systému DWDM se čtyřmi kanály (kapitola 5.1 a její podkapitoly). Tento systém byl vybrán na základě informací uvedených v kapitole 3 a jejích dílčích částech, kde bylo například zjištěno, že je to systém, jenž je aktuálně pro řešení dané problematiky běžně používaný či má předpoklad pro efektivní využití frekvenčního spektra. Další důvody pro jeho volbu jsou tedy popsány ve zmíněné kapitole 3. Vyhodnocení výsledků probíhalo na druhém kanále tak, aby byly výsledky ovlivněny sousedními kanály z obou stran (na sousední vyšší i nižší vlnové délce z daného gridu). Bylo rozhodnuto, že simulace proběhnou na rychlostech 10, 40 a 100 Gb.s⁻¹ na kanál. Nižší rychlosti na kanál nejsou vzhledem k požadavkům na vysokokapacitní přenosy dostačující a aktuální. Naopak u vyšších přenosových rychlostí existují omezení jakožto rychlost ADC a DAC převodu či příliš vysoké potřebné symbolové rychlosti a nutnost řešení potřeby flexibilního gridu (viz kapitola 3). U systému získávám co nejmenší rozestupy mezi kanály. Na rychlosti 10 Gb.s⁻¹ na kanál simuluji na rozestupech 50 GHz a na ostatních tohoto rozestupu dosahuji. Vzhledem k tomu, že na rychlostech 40 a 100 Gb.s⁻¹ na kanál je kvůli vysokým přenosovým rychlostem nutno použít kompenzátor disperze, rozhodl jsem se zde pro kompenzaci pomocí vlákna DCF, které má velký rozsah nastavitelných parametrů.

Pro simulace byly vybrány zástupci z intenzitních, fázových i polarizačních skupin modulačních formátů, jmenovitě: NRZ-OOK, RZ-OOK, CRZ, CSRZ jakožto zástupci intenzitních, BPSK, QPSK a DQPSK jako zástupci fázových a PM-QPSK a PM-DQPSK zastupující polarizační modulace. Uvedené modulace jsou v rozpětí od binárních až po osmistavové (při použití PM). U modulace QPSK a PM-QPSK je pak použit koherentní přijímač na rozdíl od ostatních modulací využívajících přímou detekci. Výběrem modulací jsem se snažil pokrýt všechny možnosti pro získání vysokokapacitních přenosů uvedených v kapitole 3.1. Na straně vysílače to je použití vícecestavových modulačních formátů a polarizační multiplexace, což je v tomto případě použití modulací QPSK, DQPSK, PM-QPSK a PM-DQPSK, na straně přijímače pak použití koherentní detekce, kterou sem využil u modulací QPSK a PM-QPSK. Na přenosové cestě je pak možno použít nová vlákna, simulace s jedním z těchto nových vláken je pak uvedena v kapitole 5.2.2.

V kapitole 5.2 pak proběhly dvě simulace, kde jsem se pokusil překonat celkovou přenosovou kapacitu systému 1 Tb.s⁻¹ s využitím modulace s nejlepšími výsledky v kapitole 5.1. Opět bylo využito systému DWDM, ale v tomto případě kvůli snaze docílit vysokokapacitních přenosových kanálů s celkem 32 kanály, první simulace je na

standardním jednovidovém vlákne typu G. 652, druhá pak na vlákne s nižším útlumem G. 654. Více informací k těmto simulacím je pak uvedeno v samotné kapitole 5.2.

4.3.2 Nastavení simulací

Využité vlákno pro všechny simulace jednotlivých modulačních formátů, s výjimkou té v kapitole 5.2.2, je standardní jednovidové typu G. 652. Pro simulace bylo vybráno z toho důvodu, aby bylo ověřeno, že není nevyhnutelně nutné, při přechodu na vyšší přenosové kapacity měnit optické kabely natažené na trase, ale na stávající infrastrukturu mnohdy postačí pouze změnit například modulační formát, nebo nastavení gridu a podobně.

Vlákno G. 652 má pro simulace nastavené následující parametry:

- referenční frekvence / vlnová délka - 195,825 THz / 1530,92025 nm pro 50 GHz grid (195,75 THz / 1531,50681 nm pro 100 GHz grid a 195,6 THz / 1532.681278 nm pro 200 GHz grid)
- útlum – 0,275 dB/km
- koeficient chromatické disperze – 17 ps / nm x km
- disperzní sklon – 0,056 ps / nm² x km
- efektivní oblast jádra – 80 μm²

Výše uvedené parametry byly vybrány na základě doporučení ITU-T G. 652 viz [25]. Pro rychlosti 40 a 100 Gb.s⁻¹ na kanál navíc bylo na přenosové trase využito disperzi kompenzující vlákno (DCF) s parametry:

- referenční frekvence / vlnová délka - 195,825 THz / 1530,92025 nm pro 50 GHz grid (195,75 THz / 1531,50681 nm pro 100 GHz grid a 195,6 THz / 1532.681278 nm pro 200 GHz grid)
- útlum – 0,44 dB/km
- koeficient chromatické disperze – - 85 ps / nm x km
- disperzní sklon – - 0,056 ps / nm² x km
- efektivní oblast jádra - 25 μm²

Důvod vložení tohoto vlákna na trase byl ten, že na těchto rychlostech na kanál byla již disperze natolik velká, že nebylo možné přenášet signál pouze po standardním jednovidovém vlákne. Například v [35] je uvedeno, že při přechodu z 10G na 40G rychlosti, se schopnost odolávat disperzi snižuje o 1/16. Koeficient chromatické disperze u těchto vláken se běžně pohybuje někde mezi -(70 až 100 ps / nm x km) [36], tudíž hodnota – 85 ps / nm x km byla z uvedeného rozsahu zvolena tak, aby byla celistvým násobkem disperze vlákna G. 652 jen s opačným znaménkem. Sklon disperzní křivky byl

zvolen – $0,056 \text{ ps} / \text{nm}^2 \times \text{km}$, tudíž potlačení disperze bude ideální a shodné pro všechny kanály, díky shodnému sklonu jako v případě vlákna G. 652 a opět opačným znaménkem. Celková délka optické trasy je tedy rozdělena mezi obě vlákna tak, jak je uvedeno na příkladech v tabulce.

Celková délka optické trasy [km]	Délka SMF vlákna [km]	Délka DCF vlákna [km]
10	8,3333	1,6667
20	16,6666	3,3334
40	33,3332	6,6668
80	66,6664	13,3336

Tabulka 4.1: Rozdělení celkové délky optické trasy mezi vlákna SMF a DCF

DCF vlákno se reálně používá pro kompenzaci disperze na optické trasy maximálně do 80 km. Na delší vzdálenosti je to již metoda kompenzace velice drahá. Například pro kompenzaci 80 km dlouhého SMF vlákna se cena těchto vláken pohybuje kolem 250 000 Kč [37]. Proto byla měřená celková délka optické trasy 80 km.

Multiplexor a demultiplexor použitý v simulaci je tvořen rozbočovači (respektive slučovači), jejichž útlum je volen podle teoretických hodnot uvedených v následující tabulce 4.2. K těmto hodnotám je ještě připočítána rezerva, protože jsou pouze ideální, nikoli reálné. Pro systém DWDM simulovaný v kapitole 5. a jejich podkapitolách, tak útlumy multiplexorů a demultiplexorů závisí na počtu kanálů.

Rozbočovací poměr (1:N)	1:2	1:4	1:8	1:16	1:32	1:64	1:128
Útlum rozbočovače [dB]	3	6	9	12	15	18	21

Tabulka 4.2: Teoretické hodnoty vloženého útlumu rozbočovačů [38]

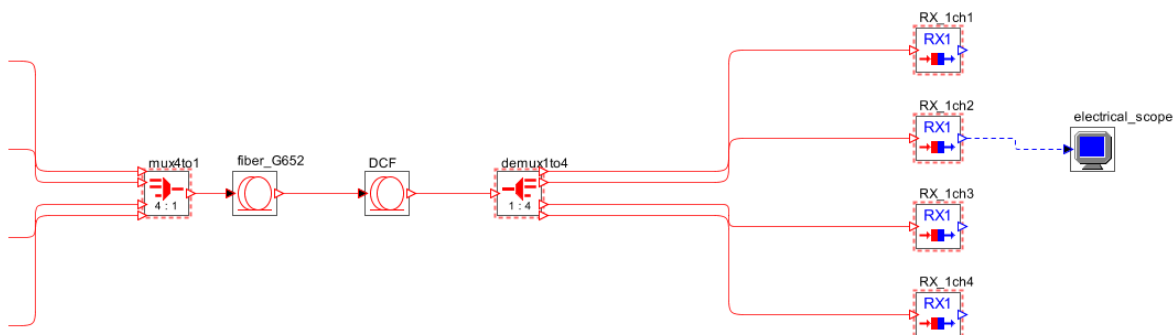
Frekvence použitých vysílačů, případně přijímačů se tak odvíjí od nastavení referenční frekvence obou vláken. Byly vybrány z rozsahu hodnot použitelných pro systém DWDM uvedených v doporučení ITU-T G. 694. 1 viz [19]. Pro přehled jsou uvedeny v tabulce 4.3. Pro simulace v kapitole 5.2, kde je využito celkem 32 kanálů, se vychází z gridu 50 GHz a 16. a 17. kanál použitý v této simulaci má hodnoty 195,80 THz, respektive 195,85 THz, ostatní frekvence se pak od těchto odvíjí. První kanál je naladěn na 195,05 THz a 32. na 196,60 THz, referenční frekvence je tak 195,825 THz, tedy stejná jako pro čtyřkanálový systém s 50 GHz gridem.

Použitý grid [GHz]	Referenční frekvence [THz]	Číslo kanálu	Frekvence kanálu [THz]
50	195,825	1	195,75
		2	195,80
		3	195,85
		4	195,90
100	195,750	1	195,60
		2	195,70
		3	195,80
		4	195,90
200	195,600	1	195,30
		2	195,50
		3	195,70
		4	195,90

Tabulka 4.3: Frekvence jednotlivých kanálů pro různé gridy použité v simulacích

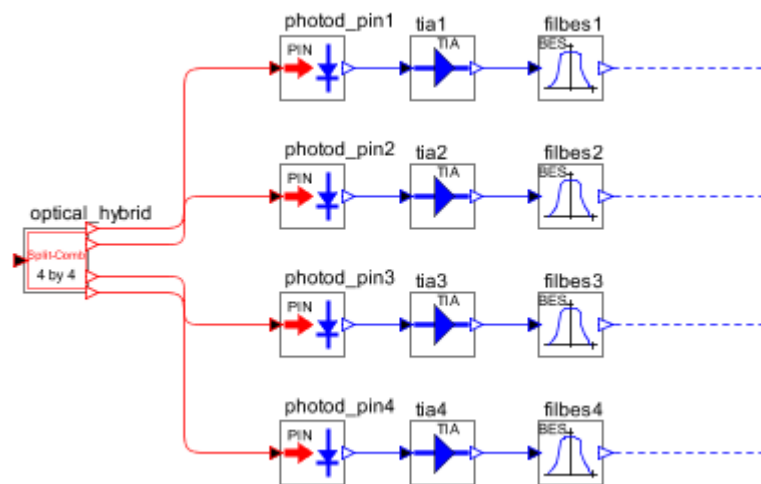
4.3.3 Schémata pro simulace

Dvoustavové modulace využívají přijímač s přímou detekcí, který je znázorněn na obrázku 4.2, popisujícím DWDM systém s kompenzací DCF. Součástka mux4to1 představuje multiplexor pro sloučení čtyř signálů přicházejících od vysílačů do jednoho optického vlákna typu G. 652. Za tímto vláknem pak následuje DCF vlákno pro kompenzaci disperze a demultiplexor (demux1to4), který tyto čtyři signály rozdělí podle frekvence daného kanálu. Přijímač, který se skládá z optického filtru následovaného PIN fotodiodou a elektrickým filtrem fungujícím jako dolní propust, je pak naladěn na frekvenci pro příjem daného signálu. Na přijímač pro druhý kanál je pak připojena součástka *electrical scope* popsaná v kapitole 4.2 pro vyhodnocení dané simulace.



Obrázek 4.2: DWDM systém s kompenzací DCF a přijímačem s přímou detekcí

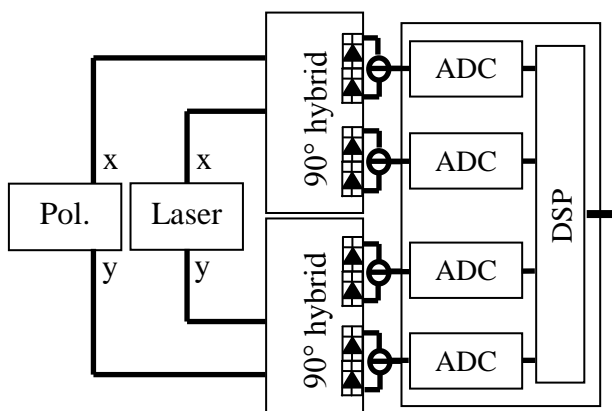
Modulace QPSK a PM-QPSK pro příjem používají přijímač s koherentní detekcí (viz obrázek 4.3). Ten je tvořen součástíkou v OptSimu zvanou jako Single Ended 90 – Degree Hybrid including Local oscillator [39]. Tato komponenta obsahuje lokální laser, rozbočovač, polarizační rozbočovač a dvě 90i stupňové hybridní součástky. Vstupní signál z optické trasy se nejprve rozdělí v polarizačním rozbočovači do dvou větví s polarizacemi X a Y, které vedou do dvou 90i stupňových hybridních součástek, kde každá má dva vstupy. Ty rozdělí vstupní signál kombinovaný se signálem z lokálního laseru, jež je navázaný do jejich druhého vstupu, do ortogonálních komponent a čtyř větví, které dále procházejí k PIN fotodiodě, elektrickému zesilovači a elektrickému filtru fungujícímu opět jako dolní propust. Tyto čtyři větve představují rozdělení signálu do jeho reálné a imaginární složky. Pro modulaci QPSK postačuje pouze jedna 90i stupňová hybridní součástka a na výstupu přijímače jsou tak pouze dvě větve PIN fotodiody, elektrický zesilovač a elektrický filtr.



Obrázek 4.3: Koherentní přijímač v prostředí OptSim

Za optickým filtrem tak jak je uvedeno na obrázku 4.4 následuje standardně DSP jednotka. Navíc je u koherentního přijímače možné nahradit optickou kompenzací disperze pomocí vlákna DCF kompenzací v elektrické doméně využitím digitálních filtrů s konečnou impulsní odezvou (tzv. FIR filtrů) [40]. V OptSimu k tomu slouží součástka označená jako Ideal Electronic Dispersion Compensator (EDC) viz [39] s nastavitelnou hodnotou disperze ke kompenzací a jejímu sklonu. Není tak nutné při přechodu na vyšší přenosové kapacity a rychlosti na kanál měnit optickou trasu, ale stačí změnit přijímač. V této práci jsem však u koherentního příjmu DCF vlákno elektrickou kompenzací disperze nenahrazoval a to z toho důvodu, aby bylo možné porovnat jednotlivé modulační formáty při použití stejné optické trasy. Nahrazení DCF vlákna elektronickou kompenzací by totiž vedlo k tomu, že by 80 km dlouhou optickou trasu složenou z SMF a DCF, bylo nutné nahradit optickou trasou tvořenou pouze SMF vláknem. Tato trasa má celkový útlum nižší než původní a výsledky by nebylo možné objektivně porovnat. DSP jednotka

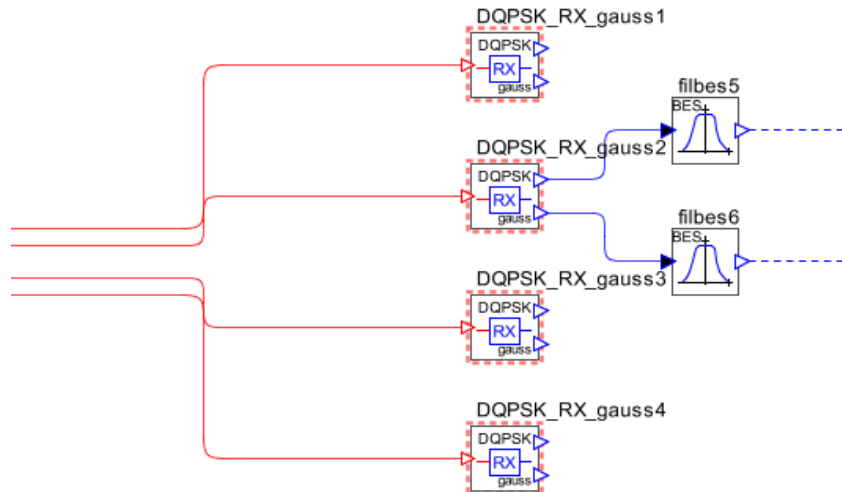
(zahrnující elektrickou filtraci a ekvalizaci) pak slouží k odstranění zkreslení v diagramu oka a mezisymbolové interference způsobených disperzními a PMD účinky, též k obnově „čistoty“ bitů [10]. Tedy lze očekávat v případě jejího použití vylepšení výsledných hodnot, které jsou uvedené ve výsledcích v kapitole 5, kdy je kvůli ponechání stejné vyhodnocovací techniky pro všechny modulace po filtraci Besselovými filtry zařazena součástka *electrical scope*.



Obrázek 4.4: Koherentní přijímač s ADC a DSP [9]

Odlišný způsob příjmu je u modulací DQPSK a PM-DQPSK. V případě modulace DQPSK je optický signál po jeho demultiplexaci veden do DQPSK přijímače, který se skládá z optického filtru, následovaného optickým rozbočovačem, jenž rozdělí signál do dvou větví, kde každá obsahuje vyvážený 2DPSK přijímač, sloužící k rozdělení signálu na kvadrurní a soufázovou složku. [39] Takto rozdělený signál ještě prochází přes elektrický filtr (viz obrázek 4.5).

Příjem PM-DQPSK pak probíhá obdobným způsobem jen s tím rozdílem, že je potřeba rozdělit dvě polarizace optického signálu do dvou větví. Toto rozdělení je realizováno využitím dvou polarizátorů, které propouštějí jen signál dané polarizace. Výstupní signál z obou polarizátorů v dvou větvích pak putuje každý do svého DQPSK přijímače, jež obsahuje stejné součástky jako u příjmu DQPSK. Vyhodnocení dále probíhá na čtyřech součástkách *electrical scope*, kdy získáváme kvadrurní a soufázovou složku pro obě polarizace signálu. Uvedený způsob příjmu je popsán v [9].



Obrázek 4.5: Přijímač DQPSK

5. Výsledky

Zde jsou uvedeny výsledky získané při simulaci v prostředí OptSim rozdělené do jednotlivých kapitol podle simulovaného systému či rychlosti na jeden kanál. Na konci každé podkapitoly je uvedeno stručné shrnutí naměřených dat s uvedením dílčích závěrů. Jako hraniční hodnotu BER, pro kterou je daný systém možný brát jako v praxi použitelný, považují hodnotu $BER = \max. 10^{-12}$. Tato hodnota je uváděna jako hraniční v [20].

5.1 Výsledky simulace modulačních formátů v systému DWDM

Kapitola pojednává o výsledcích simulace modulačních formátů na přenosových rychlostech 10, 40 a 100 $Gb.s^{-1}$ na kanál s různými rozestupy v systému DWDM. Pro rychlost 10 $Gb.s^{-1}$ pak obsahuje dvě podkapitoly, jednu bez a druhou s kompenzací DCF. V kapitole 5.1.1 jsou navíc obsaženy grafy závislosti Q-faktoru na vzdálenosti a chybovosti BER na vzdálenosti. Ve všech podkapitolách oddílu 5.1 se pak zaměřují na porovnání vlastností jednotlivých modulačních formátů na 80 km dlouhé optické trase, tato délka je zvolena jako maximální, kterou je možné kompenzovat pomocí DCF, s ohledem na přijatelnou cenu viz kapitola 4.3.2.

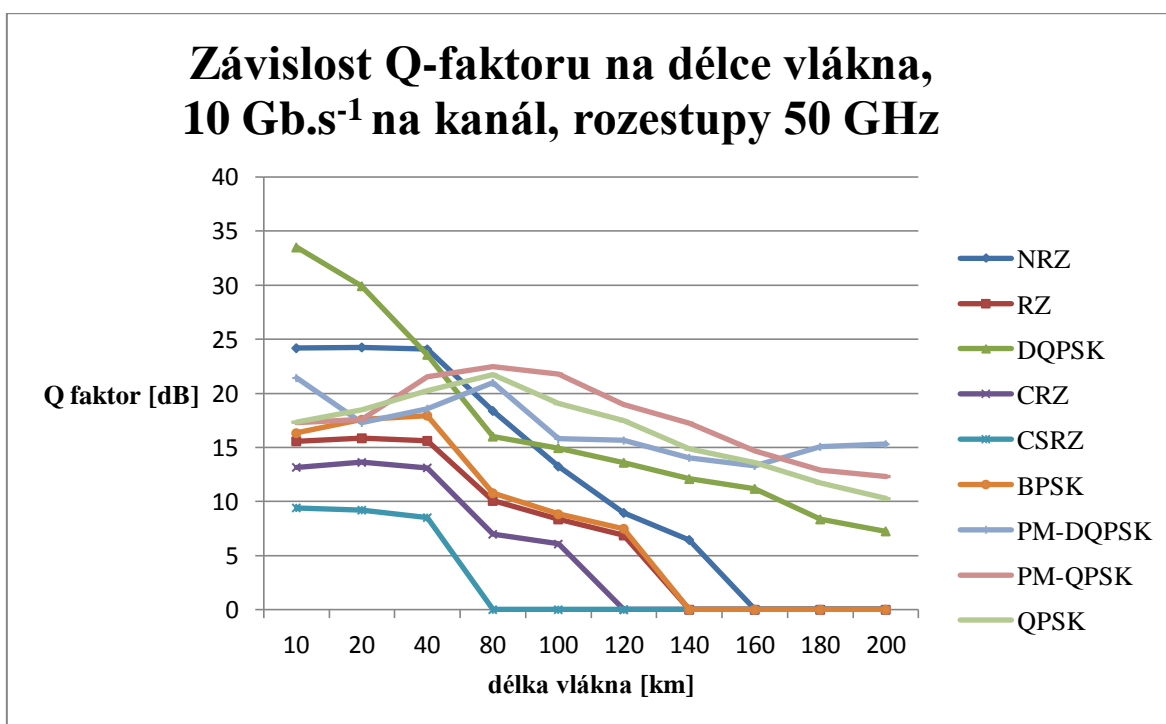
5.1.1 DWDM systém, přenosová rychlost 10 $Gb.s^{-1}$ na kanál, bez kompenzace DCF

Všechny modulační formáty simulované v této podkapitole využívají rozestupu kanálů 50 GHz. Z obrázků 5.1 znázorňujícím závislost Q-faktoru na vzdálenosti, respektive délce optické trasy, jsou patrné následující poznatky. Binární modulační

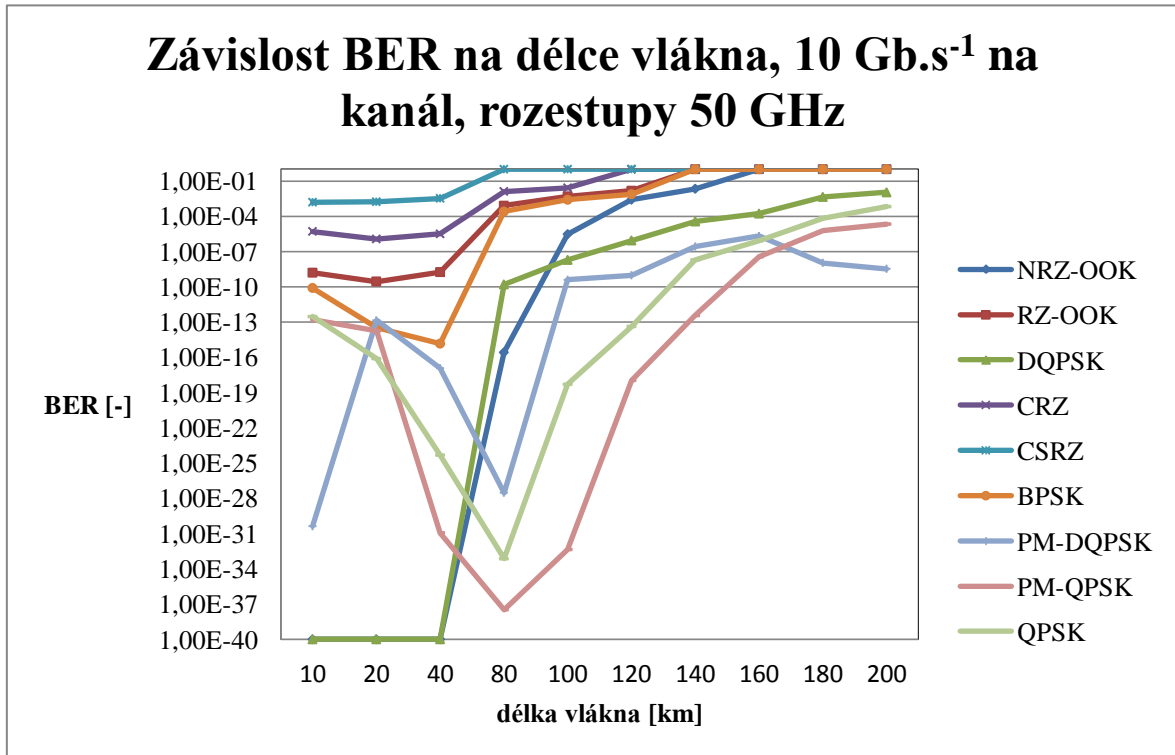
formáty vykazují vesměs stejný charakter naměřených hodnot Q-faktoru. Do délky vlákna 40 km se naměřené hodnoty v rámci daného formátu příliš nemění, nicméně pro delší vzdálenost Q-faktor strmě klesá. Nejlepší výsledky z binárních formátů vykazuje modulace NRZ-OOK následovaná BPSK modulací, jejíž výsledky jsou téměř totožné s modulací RZ-OOK. Naopak nejhorší výsledky mají modulace CRZ a CSRZ.

Zbylé vícečetové modulace se vyznačují zejména mnohem delším dosahem, to je dáno zejména tím, že jejich vysílače pro vytvoření přenosové rychlosti 10 Gb.s^{-1} na kanál vyžadují modulační rychlosti $< 10 \text{ Gbaud/s}$ (na rozdíl od modulačních formátů binárních), pro DQPSK a QPSK 5 Gbaud/s a pro PM-DQPSK a PM-QPSK $2,5 \text{ Gbaud/s}$ a tudíž nejsou tak náchylné na disperzi. Na kratších vzdálenostech do cca 40 km vykazuje nejlepší výsledky DQPSK modulace. Pro delší vzdálenosti jsou již vícečetové modulace svými výsledky velmi podobné.

Obrázek 5.2 pak graficky reprezentuje závislost chybovosti BER na délce optické trasy. Z tohoto obrázku lze získat v podstatě stejné závěry jako z obrázku 5.1. Jeho výhoda je však v tom, že lze přesně vidět, na jaké vzdálenosti daná modulace již nespĺňuje mez $\text{BER} = \text{max. } 10^{-12}$.



Obrázek 5.1: Závislost Q-faktoru na délce vlákna, 10 Gb.s^{-1} na kanál, rozestupy 50 GHz.



Obrázek 5.2: Závislost BER na délce vlákna, 10 Gb.s⁻¹ na kanál, rozestupy 50 GHz

Následující hodnoty jsou získané pro 80 km dlouhé optické vlákno. Nejlépe se zde jeví modulace PM-QPSK s Q-faktorem 22,462 dB následovaná QPSK (21,730 dB) a PM-DQPSK (20,974 dB). Překvapivě dobře se jeví i modulace NRZ (18,383 dB). U všech těchto modulací je BER minimálně řádu $3e^{-16}$ – tudíž tyto modulace jsou pro tuto vzdálenost, rychlost i rozestupy použitelné. Těsně pod hraniční hodnotou bitové chybovosti se pak nachází modulace DQPSK. Ostatní modulace již dosahují příliš velké chybovosti na to, aby je bylo možné rozumně na daném systému s uvedenými parametry využít. Vše je přehledně uvedeno v tabulce 5.1.

10 Gb.s ⁻¹ na kanál, rozestupy 50 GHz, 80 km délka vlákna (SMF)		
Modulace	Q-faktor [dB]	BER [-]
PM-QPSK	22,462	$3,271e^{-38}$
QPSK	21,730	$7,110e^{-34}$
PM-DQPSK	20,974	$2,967e^{-28}$
NRZ	18,383	$2,590e^{-16}$
DQPSK	16,012	$1,561e^{-10}$
BPSK	10,775	$2,478e^{-04}$
RZ	10,064	$7,830e^{-04}$
CRZ	6,979	$1,280e^{-02}$
CSRZ	Nelze	Nelze

Tabulka 5.1: 10 Gb.s⁻¹ na kanál, rozestupy 50 GHz, 80 km délka vlákna (SMF)

5.1.2 DWDM systém, přenosová rychlost 10 Gb.s⁻¹ na kanál, kompenzace DCF

V této kapitole má zkoumaný optický systém a optické modulace shodné nastavení jako v kapitole 5.1.1 jen s tím rozdílem, že zde se optická trasa skládá nejen z vlákna SMF, ale též z vlákna DCF pro kompenzaci disperze, stejně jako v kapitolách 5.1.3 a 5.1.4. Opět je vyhodnocení provedeno na celkové délce optické trasy 80 km.

Z tabulky 5.2, jenž se nachází pod tímto odstavcem, je patrné, že modulace, které splňují mez pro chybovost BER jsou jmenovitě DQPSK, PM-DQPSK a NRZ, těsně pod přípustnými hodnotami jsou pak modulace QPSK, PM-QPSK a BPSK.

10 Gb.s⁻¹ na kanál, rozestupy 50 GHz, 80 km délka vlákna (SMF+DCF)		
Modulace	Q-faktor [dB]	BER [-]
DQPSK	39,299	1e ⁻⁴⁰
PM-DQPSK	32,753	1e ⁻⁴⁰
NRZ	24,218	1e ⁻⁴⁰
QPSK	16,335	4,364e ⁻¹¹
PM-QPSK	16,178	1,013e ⁻¹⁰
BPSK	16,023	1,305e ⁻¹⁰
RZ	15,515	1,645e ⁻⁰⁹
CRZ	12,867	5,362e ⁻⁰⁶
CSRZ	9,343	1,740e ⁻⁰³

Tabulka 5.2: 10 Gb.s⁻¹ na kanál, rozestupy 50 GHz, 80 km délka vlákna (SMF+DCF)

Při porovnání výsledků v této a předešlé kapitole zjistíme, že u všech modulací s výjimkou QPSK a PM-QPSK došlo ke zlepšení hodnoty Q-faktoru. U modulace CSRZ se z hodnoty, kterou nebylo možné v OptSimu správně vyhodnotit dostáváme na hodnotu Q-faktoru 9,343 dB. Zhoršení hodnot BER a Q-faktoru u modulací QPSK a PM-QPSK lze vysvětlit tím, že zde převažuje vliv útlumu nad vlivem disperze. Zatímco na 80 km dlouhé trase bez DCF vlákna je celkový útlum této trasy 22 dB, při složení této trasy z vláken SMF a DCF je celkový útlum o 2,2 dB vyšší, to se projeví ve zhoršení Q-faktoru u těchto modulací i přesto, že by se vzhledem ke kompenzaci disperze dalo očekávat zlepšení výsledků, nicméně disperze je v případě těchto modulací pravděpodobně tak nízká, že Q-faktor i přesto poklesne. Konkrétní hodnoty, o které se Q-faktor změnil, jsou v tabulce 5.3.

Modulace	Q-faktor [dB]
DQPSK	+23,287
PM-DQPSK	+11,779
CRZ	+5,888
NRZ	+5,835
RZ	+5,451
BPSK	+5,248
QPSK	-5,395
PM-QPSK	-6,284
CSRZ	-

Tabulka 5.3: Změna Q -faktoru při rychlosti 10 Gb.s^{-1} na kanál po přidání DCF vlákna na optickou trasu dlouhou celkem 80 km

5.1.3 DWDM systém, přenosová rychlost 40 Gb.s^{-1} na kanál, kompenzace DCF

Na této přenosové rychlosti se již razantně projevuje výhoda vícestavových modulačních formátů v nižší modulační rychlosti vysílačů a z toho plynoucí možnosti použití užšího gridu. Zatímco binární modulační formáty pracují s modulační rychlostí 40 Gbaud/s, DQPSK i QPSK již jen na 20 Gbaud/s a PM-DQPSK s PM-QPSK 10 Gbaud/s. Binární modulační formáty již díky vysoké modulační rychlosti potřebují zvýšení rozestupů kanálů a to konkrétně na hodnotu 100 GHz. Zatímco vícestavové modulační formáty, včetně těch využívajících polarizační multiplexaci, je možné použít stále na gridu 50 GHz stejně jako na rychlosti 10 Gb.s^{-1} na kanál, nicméně je nutno počítat s nižšími hodnotami Q -faktoru. Začíná se zde silně projevovat disperze, tudíž je zde použito disperzi kompenzující vlákno DCF. Na 80 km dlouhé optické trase (SMF + DCF) z binárních formátů vychází nejlépe opět modulace NRZ-OOK s Q -faktorem 19,349 dB a chybovostí $3,195e^{-20}$.

Čtyřstavové modulační formáty DQPSK a QPSK, jak již bylo řečeno, umožňují použití 50 GHz gridu. Lepších výsledků na tomto rozestupu dosahuje modulace QPSK (16,716 dB, $1,376e^{-11}$), chybovost je však nepatrně horší než povoluje zvolená hraniční hodnota. Použijeme-li však grid 100 GHz, dostaneme u obou modulací Q -faktor > 21 dB a tedy chybovost nižší než maximální dovolenou.

Polarizační modulační formáty umožňují 50 GHz grid s velmi dobrými hodnotami Q -faktoru (> 23 dB) a BER ($< 1e^{-40}$).

Shrneme-li tedy uvedené informace tak zjistíme, že použitelné modulační formáty na této přenosové rychlosti jsou jmenovitě: DQPSK (100 GHz grid), PM-DQPSK a PM-QPSK (50 GHz grid), QPSK (100 GHz grid), NRZ (100 GHz grid) a těsně pod povolenou hodnotou se nachází QPSK s 50 GHz gridem.

40 Gb.s⁻¹ na kanál, rozestupy 100 GHz, 80 km délka vlákna (SMF + DCF)		
Modulace	Q-faktor [dB]	BER [-]
DQPSK	33,257	1e ⁻⁴⁰
PM-DQPSK*	23,649	1e ⁻⁴⁰
PM-QPSK*	23,454	1e ⁻⁴⁰
QPSK	21,171	1,818e ⁻³⁰
NRZ	19,349	3,195e ⁻²⁰
QPSK*	16,716	1,376e ⁻¹¹
RZ	15,356	2,665e ⁻⁰⁹
CRZ	12,904	4,991e ⁻⁰⁶
DQPSK*	12,697	8,500e ⁻⁰⁶
BPSK	12,333	1,896e ⁻⁰⁵
CSRZ	6,972	1,570e ⁻⁰²

Tabulka 5.4: 40 Gb.s⁻¹ na kanál, rozestupy 100 GHz, 80 km délka vlákna (SMF+DCF)

*U modulací (s *)->DQPSK, QPSK, PM-DQPSK a PM-QPSK je použit rozestup 50 GHz.

5.1.4 DWDM systém, přenosová rychlost 100 Gb.s⁻¹ na kanál, kompenzace DCF

Při přenosové rychlosti 100 Gb.s⁻¹ na kanál je v případě binárních modulačních formátu modulační rychlost již 100 Gbaud/s a je nutné použít rozestup 200 GHz. Nejlépe z těchto modulací vychází RZ-OOK (14,605 dB) následovaná NRZ-OOK (12,620 dB).

Čtyřstavové modulace DQPSK a QPSK s modulační rychlostí 50 Gbaud/s dovolují grid 100 GHz a jejich Q-faktor je > 18 dB s BER lepší než hraniční.

Polarizační modulace mají díky nejnižší modulační rychlosti (25 Gbaud/s) z uvedených modulačních formátů nejlepší využití frekvenčního spektra s gridem 50 GHz, avšak chybovost se zvyšující se modulační i přenosovou rychlostí roste. Modulace PM-DQPSK s Q-faktorem 11,291 dB již nesplňuje povolenou hranici chybovosti. Nicméně modulace PM-QPSK s koherentní detekcí má Q-faktor 18,126 dB s BER = 3,064e⁻¹⁵.

Modulace splňující předepsanou hranici BER tedy jsou: DQPSK a QPSK s rozestupy mezi kanály (100 GHz) a PM-QPSK s gridem 50 GHz.

100 Gb.s⁻¹ na kanál, rozestupy 200 GHz, 80 km délka vlákna (SMF+DCF)		
Modulace	Q-faktor [dB]	BER [-]
DQPSK*	32,004	1e ⁻⁴⁰
QPSK*	18,035	9,715e ⁻¹⁶
PM-QPSK*	18,126	3,064e ⁻¹⁵
RZ	14,605	4,447e ⁻⁰⁸
NRZ	12,620	1,164e ⁻⁰⁵
BPSK	12,000	3,914e ⁻⁰⁵
PM-DQPSK*	11,291	1,394e ⁻⁰⁴
CRZ	Nelze	Nelze
CSRZ	Nelze	Nelze

Tabulka 5.5: 100 Gb.s⁻¹ na kanál, rozestupy 200 GHz, 80 km délka vlákna (SMF+DCF)

*U modulace DQPSK a QPSK je použit rozestup 100 GHz, u PM-DQPSK a PM-QPSK 50 GHz.

5.1.5 Shrnutí

Z výsledků uvedených v kapitolách 5.1.1 až 5.1.4 je patrné, že nejlepšího využití frekvenčního spektra dosáhneme u vícecestavových modulačních formátů s tím, že čím více těchto stavů je, tím lepší využití se předpokládá. Počet stavů lze zvýšit i využitím polarizační multiplexace. Obecně lze tedy říci, že čím více fyzikálních atributů je využito k přenosu informace, tím lepší se dá očekávat spektrální účinnost, která je u zkoumaných PM modulací 4 x vyšší než u modulací binárních.

V rozboru výsledků jsem se zaměřil na porovnání výsledků pro 80 km dlouhou optickou trasu. Modulační formáty, které na této vzdálenosti splňovaly předepsané meze chybovosti, jsou uvedeny v tabulce 5.6.

Přenosová rychlost na kanál	Použití DCF vlákna na trase	Modulace s BER = max. 10⁻¹²
10	ne	PM-QPSK QPSK PM-DQPSK NRZ
10	ano	DQPSK PM-DQPSK NRZ
40	ano	DQPSK PM-DQPSK PM-QPSK QPSK NRZ
100	ano	DQPSK QPSK PM-QPSK

Tabulka 5.6: Modulace splňující požadavek pro BER = max. 10⁻¹²

Z obrázku 5.1 znázorňujícím výsledné hodnoty Q-faktoru jednotlivých modulačních formátů na přenosové rychlosti 10 Gb.s^{-1} lze usoudit, že potřebujeme-li prodloužit dosah stávajícího optického systému bez použití zesilovačů a zásahu do infrastruktury, nabízí se jako dobrá možnost změnit modulační formát na formát vícestavový. Modulace PM-QPSK a QPSK mají na této rychlosti nepatrně lepší hodnoty Q-faktoru než modulace PM-DQPSK a DQPSK. Nicméně zde je třeba si položit otázku, zda použít modulace založené na QPSK na místo těch, založených na DQPSK z důvodu nepatrně lepších dosažených výsledků nebo zda dát přednost menší složitosti v konfiguraci DQPSK a PM-DQPSK. Ty mají výhodu v tom, že zatímco u QPSK (PM-QPSK) jsou informační bity kódovány do jedné ze čtyř možných hodnot fáze optické nosné, u DQPSK jsou kódovány jako změna fáze během jedné symbolové periody. Tedy ne jako fáze absolutní [41]. Přijímač DQPSK tedy detekuje pouze tyto fázové změny. Díky tomu není u DQPSK potřeba synchronizovat lokální nosnou frekvenci a je možné využít nekoherentního přijímače [41].

Pro hraniční hodnotu $\text{BER} = \text{max. } 10^{-12}$ je dosah těchto vícestavových modulací pro rychlost 10 Gb.s^{-1} na kanál bez použití kompenzace disperze DCF uveden v tabulce 5.7.

10 Gb.s^{-1} na kanál, 50 GHz rozestupy, $\text{BER} = \text{max. } 10^{-12}$, bez DCF	
Název modulace	Dosah [km]
DQPSK	40
PM-DQPSK	80
QPSK	120
PM-QPSK	140

Tabulka 5.7: Dosah vícestavových modulačních formátů pro rychlost 10 Gb.s^{-1} na kanál, rozestupy 50 GHz, bez kompenzace DCF

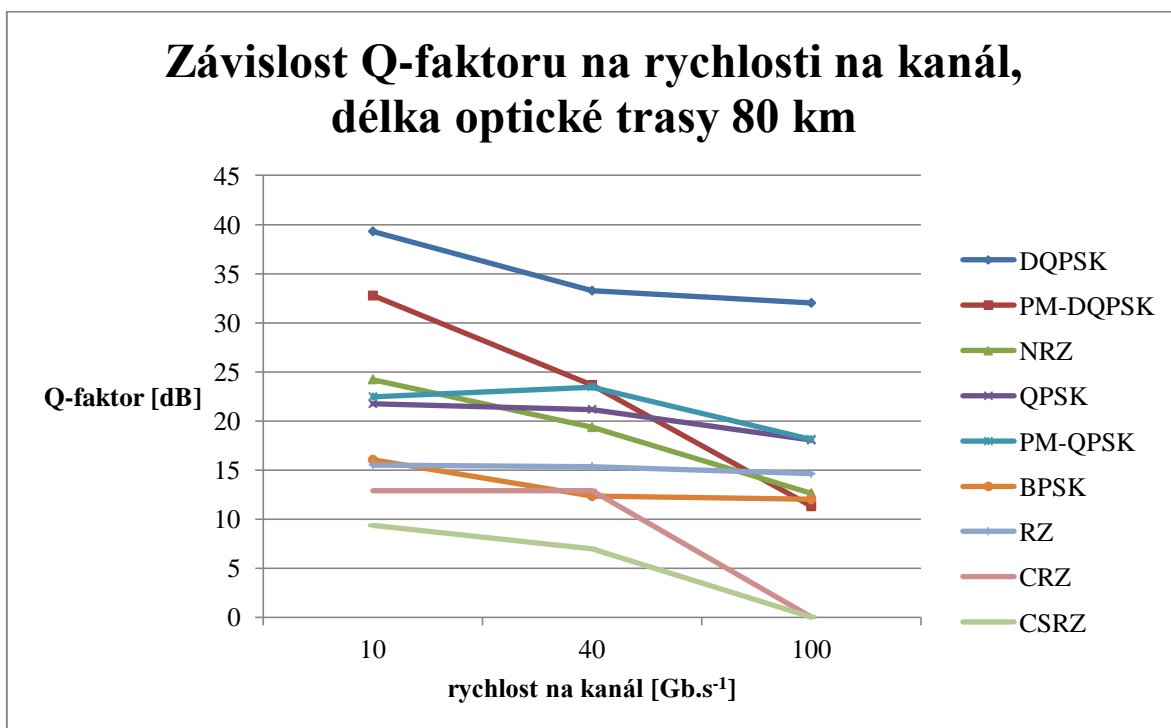
Pro přenosovou rychlost 40 Gb.s^{-1} je dosažena chybovost $\text{BER} = \text{max. } 10^{-12}$ na 80 km dlouhé optické trase složené z vláken SMF a DCF u modulačních formátů DQPSK, PM-DQPSK, PM-QPSK, QPSK a NRZ. Modulace PM-DQPSK a PM-QPSK mají ale grid 50 GHz, tudíž na rozdíl od ostatních použitelných formátů na této rychlosti dosahují 2x vyšší spektrální účinnosti. O výhodě PM-DQPSK (DQPSK) oproti PM-QPSK (QPSK) v jednodušší konstrukci přijímače bylo již hovořeno.

Na poslední simulované rychlosti 100 Gb.s^{-1} na kanál kritérium pro $\text{BER} = \text{max. } 10^{-12}$ na 80 km (SMF+DCF) splňuje DQPSK a QPSK modulace s gridem 100 GHz a spektrální účinností 1 bit/s/Hz a také polarizační modulace PM-QPSK, která navíc umožňuje udržet 50 GHz grid a její spektrální účinnost je tak 2 bit/s/Hz.

Z uvedeného tedy vyplývá, že pro přenosové rychlosti nad 40 Gb.s^{-1} na kanál je potřeba rozhodně použít vícestavové modulační formáty u kterých je navíc možné přidat ještě polarizační multiplexaci, protože žádný ze zkoumaných binárních modulačních formátů není možné při dodržení daného maximální prahu chybovosti na těchto

rychlostech použít. Na nižších rychlostech z nich nejlépe vychází formát NRZ-OOK. Navíc pomineme-li velkou chybovost těchto formátů, díky nutnosti použití vysoké modulačních rychlosti u přenosové rychlosti nad 10 Gb.s^{-1} na kanál, využívají poměrně neefektivně frekvenční spektrum. Spektrální účinnost těchto formátů se na 100 Gb.s^{-1} rychlosti pohybuje na $0,5 \text{ bit/s/Hz}$. Toto zjištění tedy potvrzuje informace uvedené v kapitole 3.1, kde se věnují teoretickému rozboru zkoumaného problému.

Bylo zjištěno, že přenos signálu na 100 Gb.s^{-1} přenosové rychlosti je možný i bez využití koherentního přijímače, nicméně pouze v případě využití alespoň čtyřstavové modulace na vysílací straně – v tomto případě s využitím modulace DQPSK. Tedy je nutné pro tuto rychlost pravděpodobně použít formáty, o spektrální účinnosti přinejmenším 1 bit/s/Hz . Vyšší spektrální účinnosti pak budou snižovat možné rozestupy kanálů s tím, že požadovaného 50 GHz lze dosáhnout se spektrální účinností 2 bit/s/Hz . Formáty s vyšší spektrální účinností pak celý DWDM dělají složitější a zřejmě i dražší.



Obrázek 5.3: Závislost Q-faktoru na rychlosti na kanál, délka optické trasy 80 km

Obrázek 5.3 znázorňuje závislost Q-faktoru na rychlosti na kanál pro jednotlivé modulace. Pro rychlost 10 Gb.s^{-1} jsou uvedeny hodnoty s kompenzací disperze DCF, kromě modulací QPSK a PM-QPSK, kde lepších výsledků bylo dosaženo bez kompenzace DCF. Na rychlosti 40 Gb.s^{-1} jsou pro modulace DQPSK a QPSK vybrány hodnoty pro 100 GHz grid, které jsou také lepší. Z obrázku je patrné, že s rychlostí klesá hodnota Q-faktoru, zvyšuje se tedy BER. Pouze u modulace PM-QPSK, kde hodnota na 40 Gb.s^{-1} je vyšší než na 10 Gb.s^{-1} , nicméně jen nepatrně, přesně o $0,992 \text{ dB}$.

Tento obrázek jsem zde uvedl z toho důvodu, protože ho lze dobře využít k popisu, jakým směrem se bude v budoucích letech pravděpodobně ubírat použití modulačních formátů při neustálém zvyšování požadavků na přenosové kapacity systému a zvyšujících se přenosových rychlostí na kanál. Při zvýšení přenosových rychlostí neustále klesá Q-faktor jednotlivých modulací, strmost tohoto poklesu lze snížit zvýšením použitého gridu a nebo použitím stále kvalitnějších komponent na trase. Modulace, které v tomto porovnání jsou přes všechny tři zkoumané přenosové rychlosti v grafu výše, mají předpoklad použití i pro budoucí 400 Gb.s⁻¹ či Tb.s⁻¹ sítě. Naopak ty níže se postupně stávají zastaralými.

5.2 Simulace terabitových přenosových kapacit

Zde navazuji na výsledky uvedené v kapitole 5.1. S cílem dosáhnout přenosové kapacity systému vyšší jak 1 Tb.s⁻¹. Jako výběrová modulace pro tyto simulace byla vybrána modulace PM-QPSK, která vykazuje na jednodušších systémech nejlepších výsledků a je u ní předpoklad nejsnazšího dosažení uvedené přenosové kapacity, jelikož na přenosové rychlosti 100 Gb.s⁻¹ dosahuje 50 GHz gridu. Navíc obsahuje zmíněné výhody pro dosažení vysokokapacitních přenosů a to jak výhody na vysílači ve vícestavovém modulačním formátu a polarizační multiplexaci, tak tu na přijímači a tedy koherentní detekci.

5.2.1 Simulace terabitových přenosových kapacit, modulace PM-QPSK

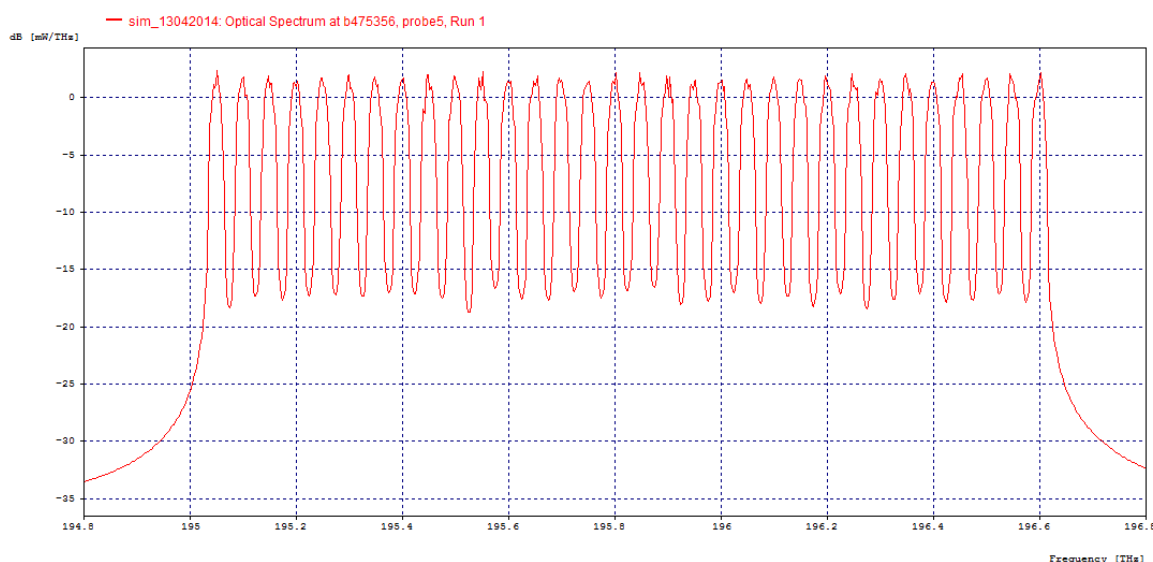
Simulace v této části práce probíhala na optickém systému DWDM se stejným nastavením dílčích komponent jako v předešlých simulacích se čtyřmi kanály. Rozdíl je v počtu kanálů, kterých je zde 32 (s rozestupy 50 GHz) a v nastavení útlumu multiplexoru a demultiplexoru, které vychází z tabulky 4.2. Všechny parametry systému s dosaženými výsledky jsou uvedené pro přehled v tabulce 5.8. Vyhodnocení výsledků probíhalo na šestnáctém kanále – tedy opět na kanále, který se stejně jako u čtyřkanálového systému nachází zhruba uprostřed.

Počet kanálů [-]	32
Délka vlákna [km]	80 (SMF+DCF)
Rychlost na kanál [Gb.s⁻¹]	100
Přenosová kapacita [Tb.s⁻¹]	3,2
Q-faktor [dB]	17,684
BER [-]	2,333e ⁻¹⁴

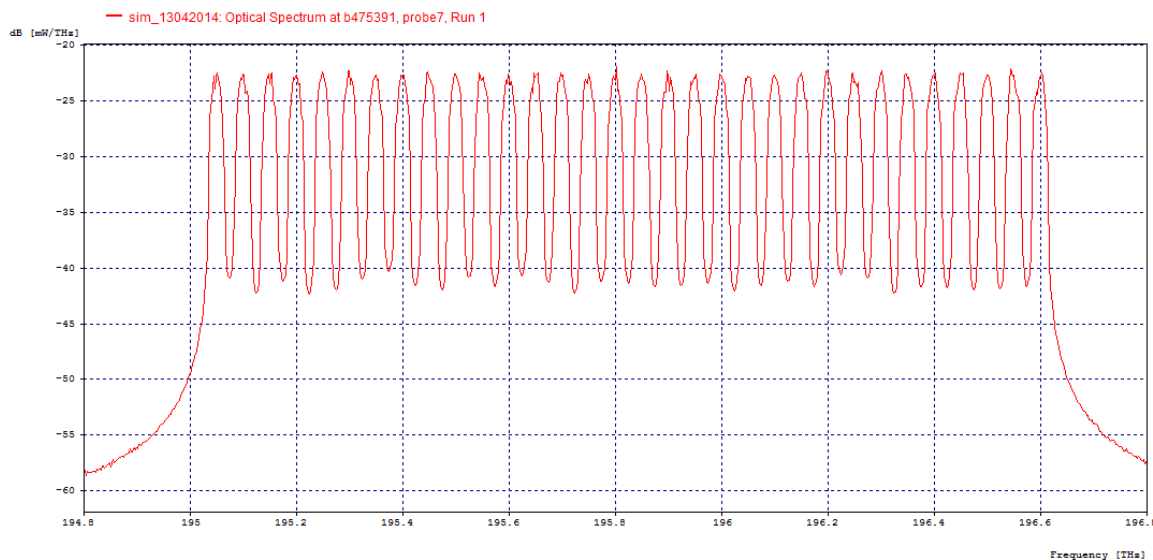
Tabulka 5.8: Parametry a dosažené výsledky u optického systému přesahujícího terabitové přenosové kapacity

Z tabulky 5.8 je patrné, že bylo dosaženo přenosové kapacity $3,2 \text{ Tb}\cdot\text{s}^{-1}$, čili byl překonán požadavek dosáhnout alespoň $1 \text{ Tb}\cdot\text{s}^{-1}$. Chybovost BER splňuje předepsané meze s rezervou zhruba dvou řádů. Hodnota Q-faktoru je o něco nižší než u systému se čtyřmi kanály. Je tedy zřejmé, že s využitím této modulace je možné stávající DWDM systémy pracující na menší přenosové rychlosti na kanál nejenom vylepšit a zvýšit tuto rychlost, ale též dosáhnout přenosových kapacit nad $1 \text{ Tb}\cdot\text{s}^{-1}$, efektivně využít frekvenční spektrum (50 GHz grid) to vše bez použití optických zesilovačů. Avšak reálně je pak takovéto systémy možné použít zhruba pro vzdálenosti do 80 km a to zejména díky drahé kompenzaci či velkým útlumům na delší vzdálenosti.

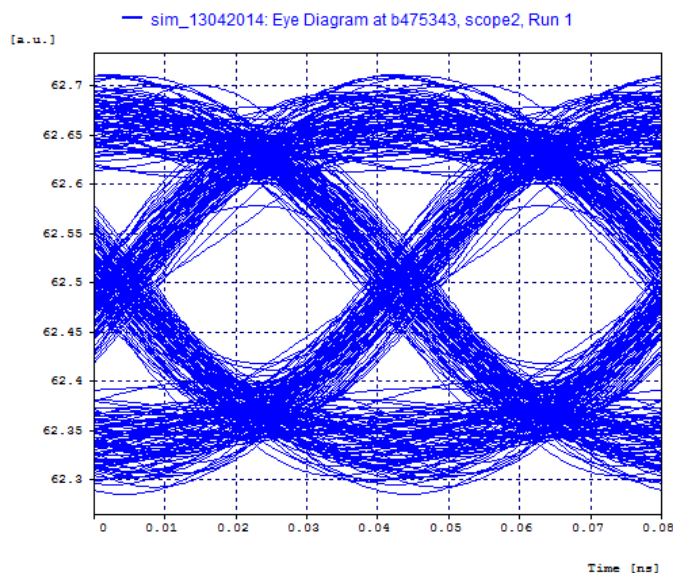
Optické spektrum na výstupu multiplexoru a před demultiplexací je zobrazeno na obrázcích 5.4 a 5.5. Na obrázku 5.6 je pak výsledný diagram oka šestnáctého kanálu, z kterého byly odečteny výsledky.



Obrázek 5.4: Optické spektrum po multiplexaci



Obrázek 5.5: Optické spektrum před demultiplexací



Obrázek 5.6: Diagram oka 16. kanálu systému DWDM s 32 kanály

5.2.2 Simulace terabitových přenosových kapacit, modulace PM-QPSK, vlákno s nižším útlumem ITU-T G. 654

Zatímco v kapitole 5.2.1, a jí předcházejícím kapitolám, jsem se věnoval zvýšení přenosové kapacity vylepšením použitým na vysílací a přijímací straně optického systému, zde se věnuji možnosti výsledky zlepšit také pomocí nových komponent na přenosové cestě, konkrétně za pomoci nových vláken s nižším útlumem či disperzí. Pro tuto simulaci bylo využito optické vlákno dle doporučení ITU-T G. 654 viz [27], které má ze všech vláken uvedených v kapitole 3.6, nejnižší útlum. Konkrétně byla použita jeho verze ITU-T G. 654. D s parametry:

- útlum – 0,2 dB/km
- koeficient chromatické disperze – 23 ps / nm x km
- disperzní sklon – 0,07 ps / nm² x km
- efektivní oblast jádra – 80 μm²

Aby byla zachována totožná kompenzace stejně jako v předešlých simulacích, bylo potřeba též změnit nastavení vlákna DCF:

- koeficient chromatické disperze – - 115 ps / nm x km
- disperzní sklon – - 0,07 ps / nm² x km

A to z důvodu jiného koeficientu chromatické disperze a sklonu disperzní křivky vlákna ITU-T G. 654 v porovnání s vláknem ITU-T G. 652.

Ostatní parametry i schéma simulace zůstávají beze změny. V tabulce 5.9 jsou znázorněny získané hodnoty.

Počet kanálů [-]	32
Délka vlákna [km]	80 (SMF+DCF)
Rychlost na kanál [Gb.s⁻¹]	100
Přenosová kapacita [Tb.s⁻¹]	3,2
Q-faktor [dB]	17,794
BER [-]	1,434e ⁻¹⁴

Tabulka 5.9: Parametry a dosažené výsledky u optického systému přesahujícího terabitové přenosové kapacity s vláknem ITU-T G. 654. D.

Lze vidět, že díky novějšímu vláknem s nižším útlumem se Q-faktor zvýšil o 0,11 dB. Vylepšení je lépe vidět při porovnání chybovostí obou simulací. Zatímco při použití standardního vlákna ITU-T G. 652 byla simulovaná chybovost BER = 2,333e⁻¹⁴ v tomto případě je dosažená chybovost pouze 1,434e⁻¹⁴, což je hodnota o 38,534 % nižší. Otázkou je efektivnost uvedeného vylepšení na tomto systému v porovnání s náklady na pořízení nového vlákna, jeho pokládkou po celé délce optické trasy a podobně. Využití nových vláken má pravděpodobně větší potenciál u optických systémů pracujících na větší vzdálenosti.

6. Závěr

Výsledkem práce je řada simulací jednotlivých optických modulačních formátů na daném optickém systému s různými přenosovými rychlostmi na kanál, za účelem získání výběrového modulačního formátu s nejlepšími hodnotami BER a Q-faktoru. Ve výsledné simulaci bylo s pomocí tohoto výběrového modulačního formátu ověřeno, že je možné ho použít u systému vysokokapacitního s přenosovou kapacitou nad 1 Tb.s⁻¹ a to s využitím vlákna ITU-T G. 652.

Bylo zjištěno, že minimální kritérium, které je potřeba použít, pokud chceme přejít na vyšší přenosové rychlosti, je použití vícecestavových modulačních formátů. Navíc, čím více těchto stavů modulační formát obsahuje, tím lepší je předpoklad pro využití frekvenčního spektra (na druhou stranu však vzniká složitější a pravděpodobně i dražší vysílač, případně přijímač). Na 100 Gb.s⁻¹ přenosové rychlosti na kanál bylo dosaženo dostatečných hodnot Q-faktoru a BER u DQPSK, QPSK a PM-QPSK. První dva jmenované formáty podporují grid 100 GHz, PM-QPSK pak 50 GHz. Bylo též ukázáno, že zvyšování počtu stavů daného modulačního formátu lze zefektivnit právě použitím polarizační multiplexace. Pro přenosy na rychlosti 100 Gb.s⁻¹ na kanál tedy postačí využití uvedených čtyřstavových modulačních formátů, či u modulace QPSK použití polarizační multiplexace s tím, že tam kde není potřeba zvýšení přenosové kapacity tak velká,

postačují modulační formáty QPSK a DQPSK s poloviční (1 bit/s/Hz) spektrální účinností vůči PM-QPSK. Dále popisují rozdíly v konfiguraci QPSK a DQPSK a uvádím, že v případě, kdy dosahují obě modulační formáty podobných výsledků, je díky jednodušší konfiguraci a snazší synchronizaci DQPSK lepší použít ji. Byly simulovány optické systémy s koherentním přijímačem i ty s přímou detekcí.

Byla provedena simulace výběrového modulačního formátu, který ze zkoumaných dosahoval nejlepších výsledků, aby bylo ověřeno, že je možné ho použít u systému vysokokapacitního, který dosahuje celkové přenášené kapacity větší jak $1 \text{ Tb}\cdot\text{s}^{-1}$. Nakonec bylo dosaženo dokonce přenosové kapacity $3,2 \text{ Tb}\cdot\text{s}^{-1}$, tedy požadavek byl splněn. Při simulaci na klasickém vlákně ITU-T G. 652 tak bylo zjištěno, že není potřeba u systému DWDM s krátkým dosahem do 80 km toto vlákno nahrazovat novějšími typy, protože i ono je schopné dovolit uvedené vysokokapacitní přenosy, je však nutné využít lepších modulačních formátů. Nicméně zejména fakt, že není potřeba za každou cenu překopávat optické trasy, je jistě minimálně z hlediska finančních nákladů, dobrá zpráva. Druhá simulace v této podkapitole pak ukazuje zlepšení výsledků při použití vlákna ITU-T G. 654, bylo zjištěno, že chybovost BER poklesne o 38,534 %. Otázkou je efektivnost uvedeného vylepšení na zkoumaném systému v porovnání s náklady na pořízení nového vlákna, či jeho pokládkou po celé délce optické trasy a podobně. Využití nových vláken má pravděpodobně větší potenciál u optických systémů pracujících na větší vzdálenosti.

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Optický signál NRZ.....	3
Obr. 2.2 Optický signál RZ	3
Obr. 2.3 Diferenční binární fázová modulace	6
Obr. 3.1 Schéma PM-QPSK vysílače.....	9
Obr. 3.2 Topologie sítě CESNET2 k lednu 2014.....	17
Obr. 3.3 Princip vlnového sdružování	18
Obr. 3.4 DWDM point-to-point topologie s OADM a optickými zesilovači.....	20
Obr. 3.5 DWDM kruhová topologie s OADM a optickými zesilovači.....	21
Obr. 3.6 Jevy způsobující útlum optického záření	22
Obr. 3.7 Výkonový zesilovač, linkový zesilovač a předzesilovač a jejich umístění na optické trase	22
Obr. 4.1 Diagram oka	24
Obr. 4.2 DWDM systém s kompenzací DCF a přijímačem s přímou detekcí	28
Obr. 4.3 Koherentní přijímač v prostředí OptSim	29
Obr. 4.4 Koherentní přijímač s ADC a DSP.....	30
Obr. 4.5 Přijímač DQPSK	31
Obr. 5.1 Závislost Q-faktoru na délce vlákna, 10 Gb.s^{-1} na kanál, rozsetupy 50 GHz	32
Obr. 5.2 Závislost BER na délce vlákna, 10 Gb.s^{-1} na kanál, rozestupy 50 GHz	33
Obr. 5.3 Závislost Q-faktoru na rychlosti na kanál, délka optické trasy 80 km	39
Obr. 5.4 Optické spektrum po multiplexaci	41
Obr. 5.5 Optické spektrum před demultiplexací.....	41
Obr. 5.6 Diagram oka 16. kanálu systému DWDM s 32 kanály	42

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Přehled nejdůležitějších intenzitních a fázových modulačních formátů	2
Tab. 2.2 Příklady pro symbolové kódování	5
Tab. 3.1 OSNR požadavky vybraných modulačních formátů	11
Tab. 3.2 Vybrané vlastnosti modulačních formátů zjištěné v různých experimentech	11
Tab. 3.3 Modulační formáty pro systémy 100 Gb.s ⁻¹	12
Tab. 3.4 Porovnání modulačních formátů pro systémy nad 100 Gb.s ⁻¹ (Penalty OSNR jsou vztažené k stejným bitovým rychlostem – PM-BPSK slouží jako reference)	14
Tab. 3.5 Přehled M-QAM možností pro 400 a 1000 Gb.s ⁻¹ využívající 100 Gb.s ⁻¹ (PM-QPSK) a 200 Gb.s ⁻¹ (PM-16QAM) jako referenci	15
Tab. 4.1 Rozdělení celkové délky optické trasy mezi vlákna SMF a DCF	27
Tab. 4.2 Teoretické hodnoty vložného útlumu rozbočovačů	27
Tab. 4.3 Frekvence jednotlivých kanálů pro různé gridy použité v simulacích	28
Tab. 5.1 10 Gb.s ⁻¹ na kanál, rozestupy 50 GHz, 80 km délka vlákna (SMF).....	33
Tab. 5.2 10 Gb.s ⁻¹ na kanál, rozestupy 50 GHz, 80 km délka vlákna (SMF+DCF).....	34
Tab. 5.3 Změna Q-faktoru při rychlosti 10 Gb.s ⁻¹ na kanál po přidání DCF vlákna na optickou trasu dlouhou celkem 80 km	35
Tab. 5.4 40 Gb.s ⁻¹ na kanál, rozestupy 100 GHz, 80 km délka vlákna (SMF+DCF).....	36
Tab. 5.5 100 Gb.s ⁻¹ na kanál, rozestupy 200 GHz, 80 km délka vlákna (SMF+DCF).....	37
Tab. 5.6 Modulace splňující požadavek pro BER = max. 10 ⁻¹²	37
Tab. 5.7 Dosah vícecestavových modulačních formátů pro rychlost 10 Gb.s ⁻¹ na kanál, rozestupy 50 GHz, bez kompenzace DCF	38
Tab. 5.8 Parametry a dosažené výsledky u optického systému přesahujícího terabitové přenosové kapacity	40
Tab. 5.9 Parametry a dosažené výsledky u optického systému přesahujícího terabitové přenosové kapacity s vláknem ITU-T G. 654. D.....	43

Seznam použitých zkratek

ACRZ	<i>Alternate-Chirp Return-to-Zero</i>
AD	<i>Analog-to-Digital</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AMI	<i>Alternate-Mark Inversion</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CRZ	<i>Chirped Return-to-Zero</i>
CSRZ	<i>Carrier-Suppressed Return-to-Zero</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength-Division Multiplexing</i>
DA	<i>Digital-to-Analog</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DB	<i>Duobinary</i>
DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DCF	<i>Dispersion Compensated Fiber</i>
DP	<i>Dual Polarization</i>
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength-Division Multiplexing</i>
ECOC	<i>European Conference and Exhibition on Optical Communication</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fibre Amplifier</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector</i>
M-QAM	<i>Multilevel-Quadrature Amplitude Modulation</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
NRZ	<i>Non Return-to-Zero</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
OFC	<i>Optical Fiber Communication Conference and Exposition</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OOK	<i>On/Off Keying</i>
OP	<i>Orthogonal Polarization</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
PASS	<i>Phased Amplitude-Shift Signaling</i>
PM	<i>Polarization Multiplexing</i>
PMD	<i>Polarization Division Multiplexing</i>
PSBT	<i>Phase-Shaped Binary Transmission</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>

QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RA	<i>Raman Amplifier</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer</i>
RZ	<i>Return-to-Zero</i>
SMF	<i>Single-Mode Optical Fiber</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
SSB	<i>Single Sideband</i>
VBS	<i>Variable Bandwidth Simulation</i>
VSF	<i>Vestigial Sideband</i>
WDM	<i>Wavelength-Division Multiplexing</i>

Příloha - CD

NRZ_10Gbps_50Gspacing.moml
RZ_10Gbps_50Gspacing.moml
DQPSK_10Gbps_50Gspacing.moml
CRZ_10Gbps_50Gspacing.moml
CSRZ_10Gbps_50Gspacing.moml
BPSK_10Gbps_50Gspacing.moml
PM_DQPSK_10Gbps_50Gspacing.moml
PM_QPSK_10Gbps_50Gspacing.moml
QPSK_10Gbps_50Gspacing.moml
NRZ_40Gbps_100Gspacing.moml
RZ_40Gbps_100Gspacing.moml
DQPSK_40Gbps_50Gspacing.moml
DQPSK_40Gbps_100Gspacing.moml
CRZ_40Gbps_100Gspacing.moml
CSRZ_40Gbps_100Gspacing.moml
BPSK_40Gbps_100Gspacing.moml
PM_DQPSK_40Gbps_50Gspacing.moml
PM_QPSK_40Gbps_50Gspacing.moml
QPSK_40Gbps_50Gspacing.moml
QPSK_40Gbps_100Gspacing.moml
NRZ_100Gbps_200Gspacing.moml
RZ_100Gbps_200Gspacing.moml
DQPSK_100Gbps_100Gspacing.moml
CRZ_100Gbps_200Gspacing.moml
CSRZ_100Gbps_200Gspacing.moml
BPSK_100Gbps_200Gspacing.moml
PM_DQPSK_100Gbps_50Gspacing.moml
PM_QPSK_100Gbps_50Gspacing.moml
QPSK_100Gbps_100Gspacing.moml
3_2Tbps_PMQPSK_50Gspacing_32channels.moml
3_2Tbps_PMQPSK_G654.moml

Seznam použité literatury

- [1] WINZER, Peter J., ESSIAMBRE, René-Jean. *Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks* [online]. Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 12., December 2006 [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4063443>>
- [2] ZHANG, Sen. *Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System* [online]. Kansas, 2004 [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <http://www.ittc.ku.edu/research/thesis/documents/sen_zhang_thesis.pdf>
- [3] BOHÁČ, Leoš, LUCKI, Michal. *Optické komunikační systémy*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2010. 165s. ISBN 978-80-01-04484-1
- [4] DOROCIÁK, Petr. *Vliv polarizační disperze na chybovost optického kanálu* [online]. Brno, 2008 [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/18751/Vliv%20polariza%C4%8Dn%C3%AD%20disperze%20na%20chybovost%20optick%C3%A9ho%20kan%C3%A1lu.pdf?sequence=1>>. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Martin Kyselák.
- [5] GNAUCK, H., TKACH, R.W., CHRAPLYVY, A. R., LI, T. *High-Capacity Optical Transmission Systems* [online]. Journal of Lightwave Technology, vol. 26, no. 9., May 1 2008 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog.cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4542886>>
- [6] YU, Jianjun, ZHOU, Xiang. *Ultra-High-Capacity DWDM Transmission System for 100G and Beyond* [online]. IEEE Communications Magazine, March 2010 [cit. 2013-10-25]. Dostupné z: <<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog.cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5434379>>
- [7] INFINERA CORPORATION. *Coherent DWDM Technologies* [online]. © 2012 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.infinera.com/pdfs/whitepapers/Infinera_Coherent_Tech.pdf>
- [8] MOHAPATRA, S. K., BHOJRAY, R., MANDAL, S. K. *Analog and Digital modulation formats of optical fiber communication within and beyond 100Gb/s: A comparative overview* [online]. International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology, vol.4, Issue 2, March – April 2013 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <<http://www.slideshare.net/iaeme/analog-and-digital-modulation-formats-of-optical-fiber-communication-within-and-beyond>>
- [9] LACH, Eugen, IDLER, Wilfried. *Modulation formats for 100G and beyond* [online]. Stuttgart, Germany, 26 August 2011 [cit. 2013-11-01]. Dostupné z: <http://www.ece.queensu.ca/Current-Students/Graduate/Course-Homepages/ELEC863_Winter2011/files/Lach_OFT_2011a.pdf>

- [10] HUAWEI TECHNOLOGIES CO. *Key Technologies and Trends for 100G WDM Transmission* [online]. © 1998-2014 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <[http://www.huawei.com/ilink/en/solutions/broader-smarter/morematerial-b/HW_104781?Addr=>](http://www.huawei.com/ilink/en/solutions/broader-smarter/morematerial-b/HW_104781?Addr=)
- [11] LIZE, Y. K. *DPSK, DQPSK and Coherent Receivers for 40G and 100G Systems* [online]. Optical Society of America © 2008 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <<http://80.ieeexplore.ieee.org/dialog/cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5348591>>
- [12] CESNET. *CESNET* [online]. 27. 04. 2013 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <<http://www.cesnet.cz/sdruzeni/>>
- [13] CESNET. *Topologie sítě CESNET2* [online]. 16. 01. 2014 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <<http://www.cesnet.cz/sluzby/pripojeni/topologie/>>
- [14] SÝKORA, J. *Princip WDM* [online]. 28. 7. 2004 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072805>>
- [15] BISCHOFF, D. *Wavelength multiplexing: WDM and DWDM systems* [online]. 4. 2. 2009 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <<http://www.n.ethz.ch/~dominikb/Texte/WDMFibreoptics.pdf>>
- [16] NĚMEČEK, I. *Architektury a technologie v moderních optických DWDM sítích 1/2* [online]. © 2010 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <<http://www.netguru.cz/odborne-clanky/architektury-a-technologie-v-modernich-optickych-dwdm-sitich-12.html>>
- [17] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G. 694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid* [online]. Prosinec 2003 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2/en>>
- [18] BOHÁČ, L. *Optické sítě* [online]. 16. 9. 2013 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/161.pdf>
- [19] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid* [online]. Únor 2012 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/>>
- [20] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.698.1. Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces* [online]. Listopad 2009 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.1-200911-I/en>>
- [21] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.698.2. Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications with single channel optical interfaces* [online]. Listopad 2009 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.2/en>>

- [22] KARTALOPOULOS, S. *DWDM topologies* [online]. ©2000 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://ftp.utcluj.ro/pub/users/cemil/dwdm/dwdm_Intro/16_5311757.pdf>
- [23] BOHÁČ, L. *Optické systémy a sítě. Teorie přenosu optickými vlákny, vlastnosti optických vláken (útlum, disperze, nelinearity), prakticky používané typy optických vláken dle ITU*. 2013
- [24] BOHÁČ, L. *Měření optických vláken* [online]. 16. 9. 2013 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/160.pdf>
- [25] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [online]. Listopad 2009 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/en>>
- [26] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.653. Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable* [online]. Červenec 2010 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.653/en>>
- [27] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.654. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable* [online]. Říjen 2012 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.654-201210-I/en>>
- [28] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.655. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable* [online]. Listopad 2009 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200911-I/en>>
- [29] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.656. Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport* [online]. Červenec 2010 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.656-201007-I/en>>
- [30] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.657. Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network* [online]. Říjen 2012 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-201210-I/en>>
- [31] Telecommunication standardization sector of ITU. *ITU-T G.662. Generic characteristics of optical amplifier devices and subsystems* [online]. Červenec 2005 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.662/en>>
- [32] LUCKI, M. *Optické zesilovače* [online]. 16. 9. 2013 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/162.pdf>
- [33] RSoft Design Group, Inc. *OptSim User Guide*. ©1989-2010.

- [34] VODRÁŽKA, J. *Chybovost při přenosu digitálního signálu* [online]. Praha, 16. 9. 2013 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/059.pdf>
- [35] WENXING, W. *Paving the way for the future 40G* [online]. Listopad 2008 [cit.2014-04-24]. Dostupné z: <<http://www.huawei.com/en/static/HW-082160.pdf>>
- [36] ČEPA, L., LUCKI, M., HÁJEK, J. *Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u klasického optického jednovodového vlákna* [online]. Praha, 3. 2. 2010 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <<http://access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2010020001>>
- [37] BOHÁČ, L. *Optické telekomunikace. Disperze optických vláken* [online]. 3. 2. 2009 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://students.math.slu.cz/jakubchovanec/skola/PCsit/Dalsi/5_prednaska.pdf>
- [38] RATAJCZAK, CH., DAVIS, M., ERAKLIDIS, J. *Systems, methods and apparatuses for providing data communication over ethernet passive optical networks* [online]. 25. 4. 2013 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <<http://www.freepatentsonline.com/WO2013059486A2.pdf>>
- [39] RSoft Design Group, Inc. *OptSim Models Reference. Volume I Sample Mode* ©1989-2010
- [40] SAVORY S. J., GAVIOLI G., KILLEY R. I., BAYVEL P. *Electronic compensation of chromatic dispersion using digital coherent receiver* [online]. London 5. 3. 2007 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww%2Eopticsinfobase%2Eorg%2FDirectPDFAccess%2F8EEB2543-DDC3-F935-67AB2DD67F9F0117_130567%2Foe-15-5-2120%2Epdf%3Fda%3D1%26id%3D130567%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=>
- [41] ZHAO, L., SHANKAR, H., NACHUM, A. *40G QPSK and DQPSK Modulation* [online]. © 2001 – 2014 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <<http://www.inphi.com/technology-overview/40G-QPSK-and-DQPSK-Modulation.pdf>>