

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Simulace vlivů disperzních jevů v optických sítích
Simulation of Dispersion Effects Influences in Optical
Networks**

2015

Bc. Daniel Židek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Daniel Židek**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Simulace vlivů disperzních jevů v optických sítích**
Simulation of Dispersion Effects Influences in Optical Networks

Zásady pro vypracování:

Cílem diplomové práce je se důkladně seznámit s možností řešení disperzí ve fotonických komunikacích. Student bude v rámci softwarové aplikace Optiwave OptiSystem simulovat na WDM-PON topologii různé typy modulačních formátů, které budou oddolné vůči vlivům disperzí. V rámci simulace navíc bude student měnit parametry optické topologie a hledat způsoby kompenzace disperze i za pomoci různých komponent, které jsou dostupné v rámci aplikace Optiwave OptiSystem.

1. Popište disperzní jevy v optických komunikačních sítích.
2. Popište metody kompenzace disperzních jevů v optických sítích.
3. Studium modulačních formátů pro snížení vlivu disperzí v optických sítích.
4. Simulace WDM-PON topologie s parametry nastavení disperzních jevů a jejich kompenzace.
5. Zhodnocení a porovnání simulovaných výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. 283 p.. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [2] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [3] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0
- [4] DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062

Další literatura dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

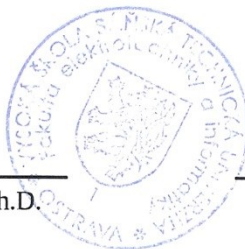
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem , že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: *5. mája 2015*



.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Jánovi Látalovi za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto diplomovej práce. Ďalej by som chcel poďakovať Bc. Zdeňkovi Wilčekovi. V neposlednej rade by som rád poďakoval i pánovi Marcovy Verreaultovi z Optiwave Inc. za cenné rady pri vytváraní a ladení simulácií.

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá riešením problematiky disperzií v optických komunikačných sieťach. V práci je uvedený teoretický popis optických sietí ich zloženie a rozdelenie. Práca je najmä zameraná na popis disperzných javov v optických komunikáciách a na spôsobe ich potlačenia a kompenzácie. Ďalej sa tu nachádza prehľad modulačných formátov a ich porovnanie na základe disperznej tolerancie. Praktická časť sa zaoberá simuláciami modulačných formátov na DWDM-PON sieti v software Optiwave OptiSystem. V simuláciách sa skúma odolnosť základných aj pokročilých modulačných formátov na disperzné javy v závislosti na prenosovej rýchlosti a dĺžke optickej trasy. Jednotlivé simulácie sa vykonávali pre rôzne optické vlákna a spôsoby kompenzácie chromatickej disperzie. V poslednej časti sa nachádza zhrnutie a porovnanie nasimulovaných výsledkov z hľadiska použitého optického vlákna.

Kľúčové slova

Optické siete; DWDM; PON; disperzia; CD; PMD; kompenzácia; DCF; FBG; optická kompenzácia; elektronická kompenzácia; modulácia; modulačný formát; BER; diagram oka; konšteláčny diagram; Optiwave OptiSystem.

Abstract

Diploma thesis deals with solution of the issue dispersions in optical communication networks. In the thesis is presented a theoretical description of the optical network their structure and division. The work is mainly focused on the description of dispersion phenomena in optical communications and the method of their suppression and compensation. Furthermore, there is an overview of modulation formats and their comparison based on dispersion tolerance. The practical part deals with simulations of modulation formats for DWDM-PON network in software Optiwave OptiSystem. The simulations examines the robustness of basic and advanced modulation formats for dispersion phenomena depending on the transmission speed and optical path length. Individual simulations are implemented for different optical fibers and methods for chromatic dispersion compensation. The last part is a summary and comparison of simulated results in terms of the optical fiber.

Key words

Optical networks; DWDM; PON; dispersion; CD; PMD; compensation; DCF; FBG; optical compensation; electronic compensation; modulation; modulation format; BER; eye diagram; constellation diagram; Optiwave OptiSystem.

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	U	Amplitúda vlny
ω	rad.s ⁻¹	Radiálna frekvencia
t	s	Čas
β	l.m ⁻¹	Konštanta šírenia
v_p	m.s ⁻¹	Fázová rýchlosť
dz	-	Derivácia v smere z
dt	s	Derivácia podľa času
v_g	m.s ⁻¹	Skupinová rýchlosť
dω	rad.s ⁻¹	Derivácia radiálnej frekvencie
dβ	l.m ⁻¹	Derivácia konštanty šírenia
t_g	s	Skupinové oneskorenie
L	m	Dĺžka trasy
n_1	-	Index lomu jadra
c	m.s ⁻¹	Rýchlosť svetla vo vákuu
n_2	-	Index lomu plášťa
Δ	-	Relatívny index lomu
θ	rad	Uhol zo Snellovho zákona
λ	nm	Vlnová dĺžka
$D_{CH}(\lambda)$	ps.nm ⁻¹ .km ⁻¹	Chromatická disperzia
$D_{MAT}(\lambda)$	ps.nm ⁻¹ .km ⁻¹	Materiálová disperzia
$D_{WG}(\lambda)$	ps.nm ⁻¹ .km ⁻¹	Vlnododová disperzia
$D_P(\lambda)$	ps.nm ⁻¹ .km ⁻¹	Profilová disperzia
T_g	s	Skupinové oneskorenie
λ_0	nm	Nulová vlnová dĺžka
dΔ	-	Derivácia indexu lomu
dλ	nm	Derivácia vlnovej dĺžky

G_k	-	Sellmeierová konštanta
k	-	Celé číslo
dn_1	-	Derivácia indexu lomu jadra
τ_{MAT}	s	Oneskorenie impulzu materiálovou disperziou
M	$ps.nm^{-1}.km^{-1}$	Materiálová disperzia
V	-	Normalizovaná frekvencia
b	-	Normalizovaná konštanta šírenia
$\Delta\tau$	s	Doba oneskorenia
E	$V.m^{-1}$	Elektrické pole
α	rad	Uhol sklonu
ϕ	rad	Fázový rozdiel
S_0	$W.m^{-2}$	Výkon svetla
λ_B	nm	Braggovská vlnová dĺžka
n_{eff}	-	Efektívny index lomu
Λ	nm	Periódna mriežky
d	-	Rozhodovací symbol sekvencie
s	-	Vyslaný symbol
S	-	Množina vyslaných symbolov
ω_c	$rad.s^{-1}$	Radiálna frekvencia nosnej
S_c	V	Amplitúda nosného signálu
f_c	Hz	Frekvencia nosnej
m	-	Počet modulačných stavov
N	-	Počet bitov
T_S	s	Symbolová periódna
a_i	-	Celé číslo
b_i	-	Celé číslo

μ_0	-	Stredná hodnota logickej úrovne nula
μ_1	-	Stredná hodnota logickej úrovne jedna
σ_0	-	Štandardná odchýlka logickej úrovne nula
σ_1	-	Štandardná odchýlka logickej úrovne jedna
P_e	-	Pravdepodobnosť chyby v prenose bitu
Q	-	Faktor kvality
P_{error}	W	Výkon chybového vektora
$P_{reference}$	W	Výkon referenčného vektora

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
AON	Active Optical Network	Aktívna optická sieť
ASK	Amplitude Shift Keying	Kľúčovanie amplitúdovým posuvom
AMI	Alternate Mark Inversion	Modulácia s čiastočnou odozvou
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Asynchrónny prenosový mód
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Smerová odbočnica
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovosť
CD	Chromatic Dispersion	Chromatická disperzia
CSRZ	Carrier Suppressed Return to Zero	Modulácia RZ s potlačenou nosnou
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex	Hrubý vlnový multiplex
DB	Duobinary Modulation	Duobinárna modulácia
DCF	Dispersion Compensating Fiber	Disperziu kompenzujúce vlákno
DFB	Distributed Feed Back	Rozložená spätná väzba
DFE	Decision Feedback Equalizer	Ekvalizér so spätnou väzbou
DGD	Differential Group Delay	Diferenciálna skupinová doba
DP	Dual Polarization	Duálne polarizovaný
DPSK	Differential Phase Shift Keying	Diferenciálna fázová modulácia
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying	Diferenciálna kvadrátúrna fázová modulácia
DSF	Dispersion Shifted Fiber	Vlákno s posunutou disperznou charakteristikou
DSP	Digital Signal Processing	Digitálne spracovanie signálov
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex	Hustý vlnový multiplex
EAM	Electro Absorption Modulator	Elektro-absorpčný modulátor
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Erbiom dotovaný vlákňový zosilňovač
ER	Extinction Ratio	Extinkčný pomer
EVM	Error Vector Magnitude	Amplitúda chybového vektora

FBG	Fiber Bragg Grating	Vlákno s braggovskou mriežkou
FDM	Frequency Division Multiplexing	Frekvenčný multiplex
FEC	Forward Error Correction	Dopredná korekcia chýb
FFE	Feed Forward Equalizer	Lineárny ekvalizér
FSK	Frequency Shift Keying	Kľúčovanie frekvenčným posuvom
FSO	Free Space Optics	Optické bezvláknové spoje
FWM	Four Wave mixing	Štvorvlnové zmiešavanie
GVD	Group Velocity Dispersion	Skupinová rýchlosť disperzie
HOM	Higher Order Mode	Vyšší mód
ISI	Inter Symbol Interference	Medzisymbolová interferencia
LMS	Least Mean Square	Metóda najmenších štvorcov
MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation	Najpravdepodobnejší odhad postupnosti symbolov
MZM	Mach-Zehnder Modulator	Mach-Zehnder modulátor
NRZ	Non Return to Zero	Bez návratu k nule
ODN	Optical Distribution Network	Optická distribučná sieť
OLT	Optical Line Terminal	Optické linkové zakončenie
ONT	Optical Network Terminal	Optické sieťové zakončenie
ONU	Optical Network Unit	Optická sieťová jednotka
OOK	On Off Keying	Modulácia s obdĺžnikovými pulzmi
OPC	Optical Phase Conjugation	Optická fázová konjugácia
PM	Polarization Multiplexing	Polarizačne multiplexovaný
PMD	Polarization Mode Dispersion	Polarizačne módová disperzia
PMF	Polarization Maintaining Fiber	Polarizáciu zachovávajúce vlákno
PolSK	Polarization Shift Keying	Kľúčovanie polarizačným posuvom
PON	Passive Optical Network	Pasívna optická sieť
PSK	Phase Shift Keying	Kľúčovanie frekvenčnými posuvom
P2P	Point To Point	Bod-bod

P2MP	Point To Multipoint	Bod-viac bodov
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Kvadrátúrna amplitúdová modulácia
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Kvadrátúrna fázová modulácia
RZ	Return To Zero	S návratom k nule
SPM	Self Phase Modulation	Vlastná modulácia fáze
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Synchrónna digitálna hierarchia
SOP	State Of Polarization	Stav polarizácie
SSB	Single SideBand modulation	Modulácia s úplne potlačeným spektrom
SSMF	Standard Single Mode Fiber	Štandardné jednomódové vlákno
TDM	Time Division Multiplexing	Časový multiplex
VIPA	Virtual Imaged Phased Array	Virtuálne zobrazovacie fázové pole
VSB	Vestigial SideBand modulation	Modulácia s čiastočne potlačeným spektrom
WDM	Wavelength Division Multiplex	Vlnový multiplex
WWDM	Wide Wavelength Division Multiplex	Široký vlnový multiplex
XPM	Cross Phase Modulation	Krížová fázová modulácia

Obsah

Úvod.....	- 18 -
1 Optické siete.....	- 19 -
1.1 Geografická hierarchia optických sietí.....	- 19 -
1.2 Optické prístupové siete.....	- 21 -
1.3 Rozdelenie optických prístupových sietí.....	- 22 -
1.4 Topológie P2P a P2MP.....	- 23 -
1.4.1 Topológia P2P.....	- 23 -
1.4.2 Topológia P2MP.....	- 23 -
1.5 Aktívne a pasívne optické siete.....	- 24 -
1.5.1 Aktívne optické siete.....	- 24 -
1.5.2 Pasívne optické siete.....	- 24 -
1.6 WDM PON siete.....	- 25 -
1.6.1 CWDM.....	- 26 -
1.6.2 DWDM.....	- 26 -
1.6.3 WWDM.....	- 26 -
2 Disperzné javy v optických komunikačných sieťach.....	- 27 -
2.1 Módová disperzia.....	- 29 -
2.2 Chromatická disperzia.....	- 31 -
2.2.1 Profilová disperzia.....	- 33 -
2.2.2 Materiálová disperzia.....	- 33 -
2.2.3 Vlnovodová disperzia.....	- 34 -
2.2.4 Typické hodnoty chromatickej disperzie.....	- 35 -
2.3 Polarizačná módová disperzia.....	- 37 -
2.3.1 Popis PMD pomocou Jonesovho a Stokesovho priestoru.....	- 41 -
2.3.2 Limitné hodnoty PMD.....	- 44 -
3 Metódy kompenzácie disperzných javoch v optických sieťach.....	- 45 -
3.1 Metódy kompenzácie chromatickej disperzie.....	- 45 -
3.1.1 Kompenzácia pomocou DSF vlákien.....	- 46 -
3.1.2 Kompenzačné vlákna DCF.....	- 46 -

3.1.3	Kompenzácia s využitím FBG.....	- 49 -
3.1.4	Kompenzácia HOM.....	- 51 -
3.1.5	Kompenzácia pomocou optickej fázovej konjugácie.....	- 52 -
3.1.6	Kompenzácia virtuálnym zobrazovacím fázovým poľom VIPA	- 53 -
3.2	Metódy kompenzácie polarizačne módovej disperzie.....	- 53 -
3.2.1	Optická kompenzácia PMD.....	- 54 -
3.2.2	Optoelektronická kompenzácia PMD.....	- 55 -
3.3	Elektronická kompenzácia CD a PMD	- 56 -
3.3.1	Elektronické ekvalizovanie	- 56 -
3.3.2	MLSE	- 58 -
4	Modulačné formáty	- 60 -
4.1	Modulačné techniky	- 60 -
4.1.1	Kľúčovanie amplitúdovým posuvom ASK	- 60 -
4.1.2	Kľúčovanie frekvenčným posuvom FSK	- 61 -
4.1.3	Kľúčovanie fázovým posuvom PSK	- 61 -
4.1.4	Kľúčovanie polarizačným posuvom PolSK	- 61 -
4.2	Intenzitné modulačné formáty.....	- 62 -
4.2.1	Modulačný formát bez návratu k nule NRZ.....	- 62 -
4.2.2	Modulačný formát s návratom k nule RZ.....	- 63 -
4.2.3	Modulačný formát RZ s potlačenou nosnou CSRZ.....	- 64 -
4.2.4	Duobinárny modulačný formát.....	- 65 -
4.2.5	Modulačný formát AMI	- 67 -
4.2.6	Modulačný formát VSB a SSB.....	- 68 -
4.3	Diferenčné fázové modulačné formáty	- 69 -
4.3.1	DPSK.....	- 69 -
4.3.2	OQPSK.....	- 72 -
4.3.3	DQPSK.....	- 72 -
4.3.4	PM-DQPSK.....	- 74 -
4.3.5	DP-QPSK	- 75 -
4.3.6	QAM.....	- 76 -
4.3.7	D8PSK a Star 16-QAM	- 78 -

5	Simulácie modulačných formátov na DWDM-PON topológii	- 81 -
5.1	Nastavené parametre simulácií.....	- 81 -
5.1.1	Použité optické vlákna pre simuláciu.....	- 84 -
5.1.2	Nastavenia simulácie pre kompenzáciu vplyvu chromatickej disperzie	- 85 -
5.2	Merané parametre modulácií.....	- 86 -
5.2.1	Bitová chybovosť BER.....	- 86 -
5.2.2	Q faktor.....	- 86 -
5.2.3	Diagram oka	- 87 -
5.2.4	Konštelačný diagram.....	- 88 -
5.2.5	EVM.....	- 88 -
5.3	Výsledky simulácií pre optické vlákno G.652.D v zostupnom smere.....	- 89 -
5.3.1	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s.....	- 89 -
5.3.2	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 92 -
5.3.3	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 94 -
5.3.4	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s.....	- 96 -
5.3.5	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 97 -
5.3.6	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 99 -
5.3.7	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s	- 100 -
5.3.8	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 102 -
5.3.9	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 104 -
5.3.10	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s	- 106 -
5.3.11	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 107 -
5.3.12	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 109 -
5.4	Výsledky simulácií pre optické vlákno G.654.B v zostupnom smere.....	- 110 -
5.4.1	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s.....	- 111 -

5.4.2	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 112 -
5.4.3	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 114 -
5.4.4	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s.....	- 115 -
5.4.5	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 117 -
5.4.6	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 118 -
5.4.7	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s	- 120 -
5.4.8	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 122 -
5.4.9	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 123 -
5.4.10	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s	- 125 -
5.4.11	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 126 -
5.4.12	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 128 -
5.5	Výsledky simulácií pre optické vlákno G.656 v zostupnom smere	- 130 -
5.5.1	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s.....	- 130 -
5.5.2	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 131 -
5.5.3	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 133 -
5.5.4	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s.....	- 134 -
5.5.5	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 136 -
5.5.6	Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 137 -
5.5.7	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s	- 139 -
5.5.8	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 141 -
5.5.9	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 142 -

5.5.10	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s	- 144 -
5.5.11	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií	- 145 -
5.5.12	Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií	- 147 -
6	Zhrnutie a porovnanie nasimulovaných výsledkov	- 149 -
6.1	Zhrnutie výsledkov intenzitných modulácií	- 149 -
6.1.1	Zhrnutie intenzitných modulácií bez kompenzácie CD	- 149 -
6.1.2	Zhrnutie intenzitných modulácií s DCF kompenzáciou	- 150 -
6.1.3	Zhrnutie intenzitných modulácií s FBG kompenzáciou	- 151 -
6.2	Zhrnutie výsledkov pokročilých modulácií	- 152 -
6.2.1	Zhrnutie pokročilých modulácií bez kompenzácie CD	- 152 -
6.2.2	Zhrnutie pokročilých modulácií s DCF kompenzáciou	- 153 -
6.2.3	Zhrnutie pokročilých modulácií s FBG kompenzáciou	- 154 -
6.2.4	Zhrnutie pokročilých modulácií s DSP kompenzáciou	- 154 -
	Záver	- 156 -
	Použitá literatúra	- 158 -
	Zoznam príloh	I

Úvod

V neustále vyvíjajúcich sa informačných technológiách je kladený dôraz na čo najrýchlejšiu komunikáciu medzi jednotlivými sieťami a koncovými užívateľmi. Práve prenos informácií cez optické vlákna značne urýchľuje komunikáciu a náklady spojené s výstavbou takýchto sietí. V porovnaní s metalickými sieťami prinášajú optické siete radu výhod, ale tiež sú limitované určitými faktormi. Týmito faktormi sú napríklad nelineárne efekty vo vlákne, jeho útlm ale predovšetkým disperzný jav. Diplomová práca ma za úlohu popísať jednotlivé typy disperzií, ich kompenzácie a zároveň skúmať odolnosť jednotlivých modulačných formátov na vplyv disperzie čo bude vykonávané simuláciami na DWDM-PON topológii.

Prvá kapitola obsahuje popis optických sietí. Nachádza sa tu bližší popis optických prístupových sietí a ich zloženie a rozdelenie na základe použitia aktívnych a pasívnych prvkov.

Druhá kapitola sa zaoberá disperziami, ktoré predstavujú hlavný limitujúci faktor pri optických prenosoch. Bližšie je tu uvedené vysvetlenie disperzie a rozdelenie na základe príčiny vzniku. Detailne sa kapitola zaoberá popisom módovej, chromatickej a polarizačne módovej disperzie a ich limitnými hodnotami pre jednotlivé štandardy optických vlákien.

Ďalšia kapitola popisuje možnosti kompenzácie jednotlivých disperzných javov. Kompenzácie sú rozdelené na základe typu kompenzovanej disperzie a pre každú je uvedených niekoľko metód. Navyše je v kapitole uvedená aj elektronická metóda kompenzovania, ktorá sa v poslednom čase čo raz viac dostáva do popredia.

Štvrtá kapitola obsahuje prehľad modulačných techník a formátov. Nachádza sa tu popis základných aj pokročilých modulácií. Každá modulácia je zhodnotená na základe odolnosti na disperzie. V kapitole sú uvedené aj modulačné formáty pre vysokorýchlostné prenosy na dlhšie trasy.

Piata kapitola obsahuje jednotlivé nastavenia pre softwarové simulácie modulačných formátov na DWDM-PON topológii. Ďalej sa v kapitole nachádzajú jednotlivé vybrané výsledky modulačných formátov bez kompenzácie ale aj s kompenzáciou chromatickej disperzie pre rôzne typy štandardov optických vlákien.

Šiestou kapitolou je porovnanie a zhrnutie výsledkov simulácií jednotlivých modulácií. Porovnanie je zvlášť pre intenzitné a zvlášť pre pokročilé modulácie. Výsledky simulácií sú zhodnotené na základe použitého typu optických vlákien a pre každú prenosovú rýchlosť a trasu.

1 Optické siete

V osemdesiatich rokoch minulého storočia začal telekomunikačný priemysel v medzimestských sieťach čoraz viac využívať prenos informácií po fyzickej vrstve prostredníctvom optických káblov. Optické káble umožňujú prenos s nízkymi stratami a ich veľkou výhodou je potenciál v podobe veľkej kapacity siete. To umožnilo vzniku optických sietí a oblasti s týmito sieťami.

Optické siete sú založené na fyzikálnom princípe vedenia svetla a jeho manipulácií v optických vláknach. Jedným z prvých technologických pokrokov bola schopnosť viesť optickým vláknom viac kanálov svetla. To bolo dosiahnuté použitím rôznych vlnových dĺžok multiplexovaných do jedného optického vlákna technológiu známou ako vlnový multiplex WDM (Wavelength Division Multiplexing). Najskôr WDM systémy podporovali len pár vlnových dĺžok na jednom optickom vlákne. Od roku 2000 sa však tento počet rýchlo rozrástol na viac ako sto vlnových dĺžok pre vlákno, čo umožňuje obrovsky nárast kapacity siete. Maximálna kapacita pre jednu vlnovú dĺžku bola v roku 1995 zhruba 2,5 Gbit/s. Následne v ďalších rokoch táto kapacita narástla na 10 Gbit/s až 40 Gbit/s a v súčasnosti na viac ako 100 Gbit/s.

Prenosová kapacita bola iba jedným z viacerých dôležitých faktorov pri vyvíjaní optických sietí. Rozrastanie optických sietí vyžadovalo použitie elektronických zariadení, ktoré znamenali výzvy z hľadiska fyzického priestoru, ceny a spotreby energie, dostatočného odvodu tepla a údržby. Zníženie týchto problémov bolo dosiahnuté vývojom optických technológií. Optické technológie môžu pracovať na spektre vlnových dĺžok naraz a do značnej miery nezávisle na ich prenosovej rýchlosti. Tieto technológie teda eliminovali väčšinu elektronických spracovaní signálu a umožnili zostať v oblasti optiky po celej trase prenosového systému.

Aby boli optické siete využívané čo najefektívnejšie a reagovali na požiadavky súčasnej doby je kladený dôraz na ich ďalší vývoj. V tomto vývoji sú dôležitými faktormi pri návrhoch optických sietí najmä použitie nových algoritmov pri prevádzke siete, vhodné modulovaný signál, odstránenie alebo potlačenie disperzií a spracovanie optického signálu.

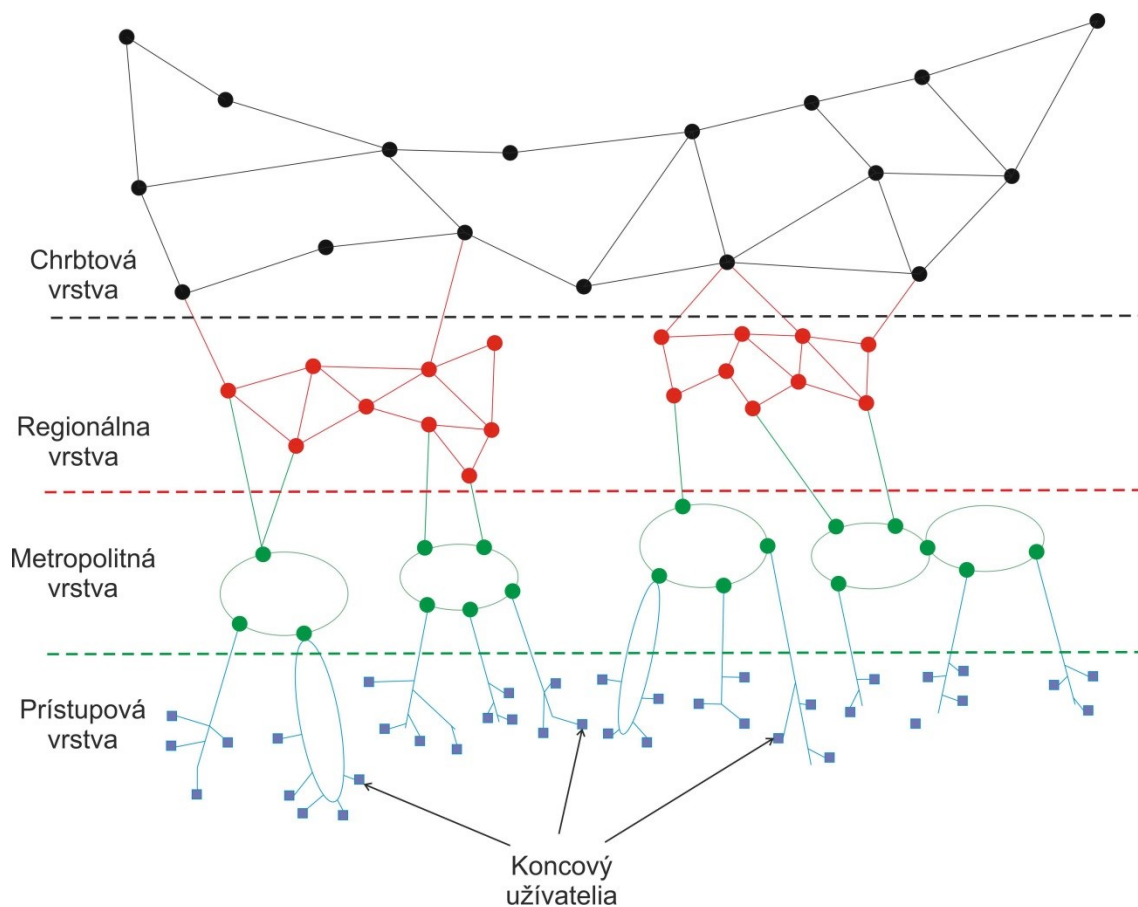
Ako už bolo spomenuté vznik nových optických technológií dal priestor k vybudovaniu optických sietí, ktoré v súčasnosti rozľahlé geografické oblasti. Geografická hierarchia optických sietí je priblížená v nasledujúcej podkapitole [1].

1.1 Geografická hierarchia optických sietí

Pri zavádzaní novej sieťovej technológie je užitočné ju rozdeliť do viacerých geografických vrstiev vzhľadom na počet zákazníkov, požadovanú kapacitu a rozlohu siete. Na Obrázku 1.1 je zobrazené takéto geografické rozdelenie na jednotlivé vrstvy.

Na okraji celej siete a najbližšie ku koncovým užívateľom je umiestnená prístupová vrstva optickej siete. Prístupové siete distribuujú komunikáciu z vyššej vrstvy smerom k užívateľom a od užívateľov zas naopak. Obsluhujú desiatky až stovky užívateľov a pokrývajú

územie pár kilometrov. Ďalej sa môže táto vrstva rozdeliť na lokálne obchodné, mestské a vidiecke prístupové siete.



Obrázok 1.1: Geografické vrstvy optických sietí [1]

Metropolitná vrstva je zodpovedná za agregáciu prevádzky z prístupových sietí a prepája celý rad telekomunikačných centier a koncových staníc. Siete v tejto vrstve zoskupujú prevádzku od tisícov užívateľov a ich rozsah je desiatky až stovky kilometrov.

Pri pohybe nahor geografickými vrstvami siete narážame na regionálnu vrstvu, pomocou ktorej sú prepojené metropolitné siete. Siete v regionálnej vrstve nesú časť prevádzky, ktorá zasahuje na viaceré územia metropolitných oblastí. Tieto siete sú rozľahlé niekoľko sto až tisíc kilometrov a obsluhujú prevádzku tisícov užívateľov.

Prevádzka medzi regionálnymi sieťami je zabezpečená pomocou sietí, ktoré sa nachádzajú v chrbtovej vrstve. Chrbtové siete sú zodpovedné za prevádzku komunikácie miliónov užívateľov a ich rozloha je rozprestretá na tisícky kilometrov.

Každá vrstva má rozdielnu charakteristiku a preto je dôležitý výber správnej optickej technológie. Keď uvažujeme o technológiách nasadených na chrbtovej sieti kde je potrebný

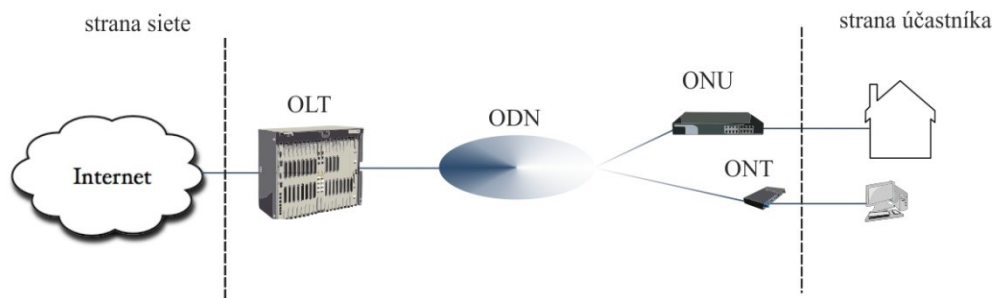
prenos informácií na dlhé vzdialenosti a veľká kapacita siete, na prístupových sieťach by bola táto technológia neefektívna z hľadiska ceny. Práve cena zohráva úlohu aj pri nasadzovaní nových technológií. Nové technológie sa prevažne nasadzujú najprv na vyššie vrstvy. Postupom času keď cena klesá sa ďalšie implementácie týchto technológií dostávajú aj na nižšie vrstvy [1].

Zatiaľ čo optické siete sú podporované v rôznych pozmenených architektúrach v jednotlivých geografických vrstvách, architektúra optických prístupových sietí je veľmi odlišná od ostatných častí sietí. Ako príklad možno uviesť že tieto siete sú prevažne založené na pasívnych zariadeniach, ktoré nevyžadujú na trase napájanie a označujú sa ako pasívne optické siete PON. Tieto optické prístupové siete sú popísane v nasledujúcej podkapitole.

1.2 Optické prístupové siete

Prístupové siete tvoria posledný úsek telekomunikačných sietí vedúcich od poskytovateľov služieb k domácnostiam a firmám. Budovaním optických prístupových sietí AON s novými technológiami dochádza u súčasných náročných koncových užívateľov k nárastu šírky pásma a prenosových rýchlostí na stovky až tisíce Mbit/s [1]. Architektúra optických prístupových sietí (Obrázok 1.2) obsahuje štyri hlavné časti:

- optické linkové zakončenie OLT,
- optickú distribučnú sieť ODN,
- optické sieťové zakončenie ONT,
- optickú sieťovú jednotku ONU.



Obrázok 1.2: Architektúra optickej prístupovej siete

Optické linkové zakončenie OLT (Optical Line Terminal) slúži ako sieťové rozhranie medzi vonkajšími sieťami telekomunikačných služieb a prístupovou sieťou. Nachádza sa centrálnej ústredni a riadi obojsmerný tok informácií naprieč optickou distribučnou sieťou ODN. V zostupnom smere OLT riadi prevádzku hlasu, videa a dát z vyššej vrstvy do jednotlivých modulov ONU a ONT. V opačnom smere OLT prijíma a distribuuje rôzne typy prevádzky od koncových užívateľov siete.

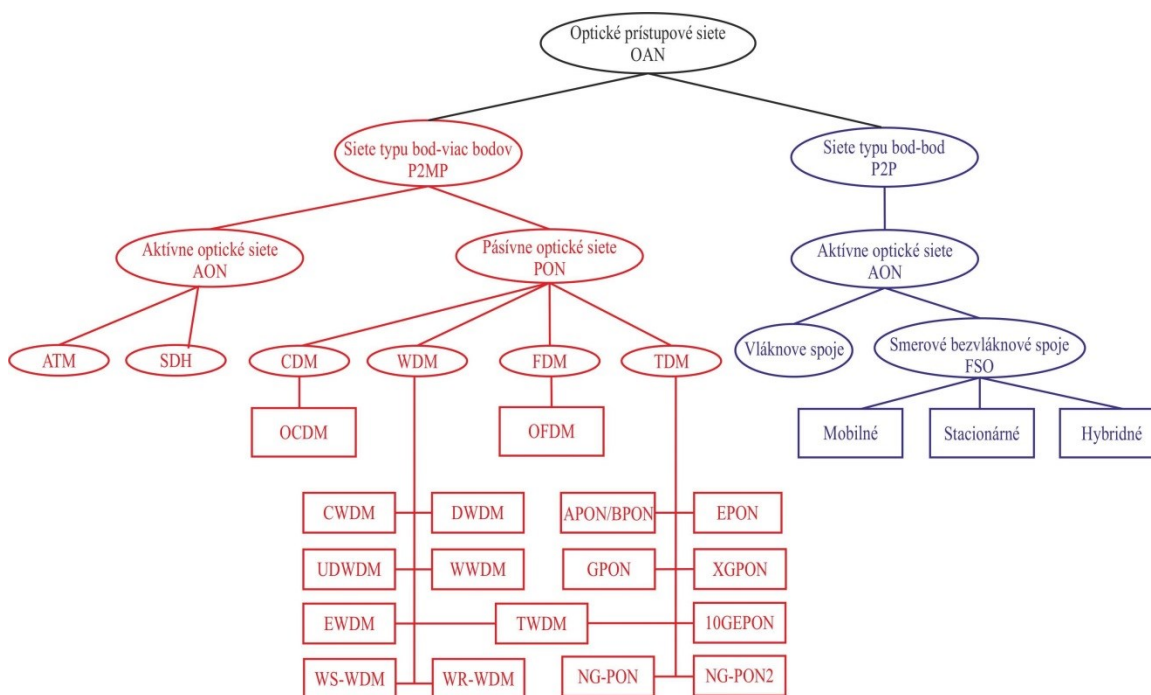
Optická distribučná sieť ODN (Optical Distribution Network) predstavuje optické prenosové médiá slúžiace na prenos medzi modulmi OLT a ONU/ONT. Po týmto pojmom sa nachádzajú optické vlákna so spojkami prípadne zvarmi vedúce do rozbočovačov a optických filtrov na úpravu signálu.

Optické sieťové jednotky ONU (Optical Network Unit) slúžia ako účastnícke rozhrania medzi prístupovou sieťou a koncovými užívateľmi. Tieto jednotky konvertujú optický signál na elektrický, ktorý je následne posielaný k jednotlivým účastníkom. Umiestňujú sa mimo domu alebo ako zakončenie na chodníku. Podobne aj optické sieťové zakončenie ONT (Optical Network Terminal) slúži ako rozhranie medzi optickou a metalickou časťou. Na rozdiel od ONU sa nachádza priamo v priestoroch zákazníka, čiže v budovách, bytových domoch, kanceláriách. Tieto moduly poskytujú zákazníkovi využívať telekomunikačné služby ako prenos videa, dát a hlasu [3], [4], [5].

Optické prístupové siete možno rozdeliť na základe viacerých kritérií a vlastností. V nasledujúcej podkapitole sú zobrazené jednotlivé delenia optických prístupových sietí.

1.3 Rozdelenie optických prístupových sietí

Vývoj nových technológií v optických prístupových sieťach umožnil vzniku viacerých delení týchto typov sietí. Ako možno vidieť na Obrázku 1.3 najčastejšie delenie je na základe typu použitej topológie alebo podľa použitia aktívnych a pasívnych prvkov [6].

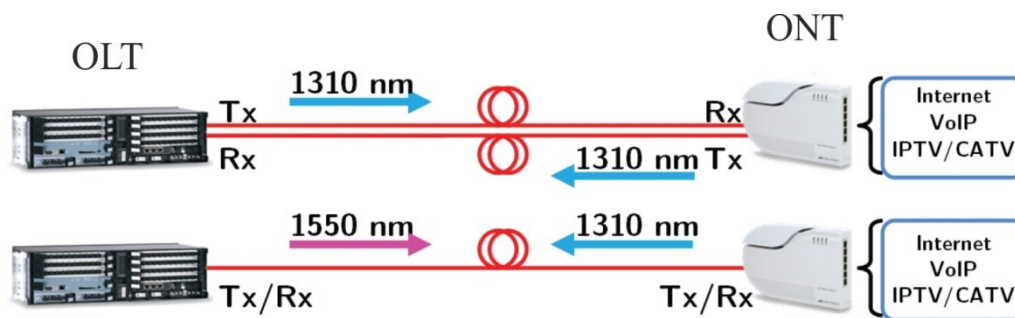


Obrázok 1.3: Rozdelenie optických prístupových sietí [4]

1.4 Topológie P2P a P2MP

1.4.1 Topológia P2P

Prístupové optické siete možno rozdeliť na dve veľké skupiny v závislosti na použitej topológii. Topológia typu bod-bod P2P poskytuje pripojenie prostredníctvom vyhradeného optického vlákna použitím vlnového multiplexu alebo dvoma vláknami zvlášť pre prenos vzostupne a zostupne pre koncového užívateľa.



Obrázok 1.4: Topológia typu bod - bod P2P [7]

Pre prenos dvoma vláknami je vlnová dĺžka 1310 nm rovnaká pre vzostupný aj zostupný smer. Pri prenose jedným vláknom sa využíva pre zostupný smer vlnová dĺžka 1550 nm alebo 1490 nm a pre vzostupný smer 1310 nm.

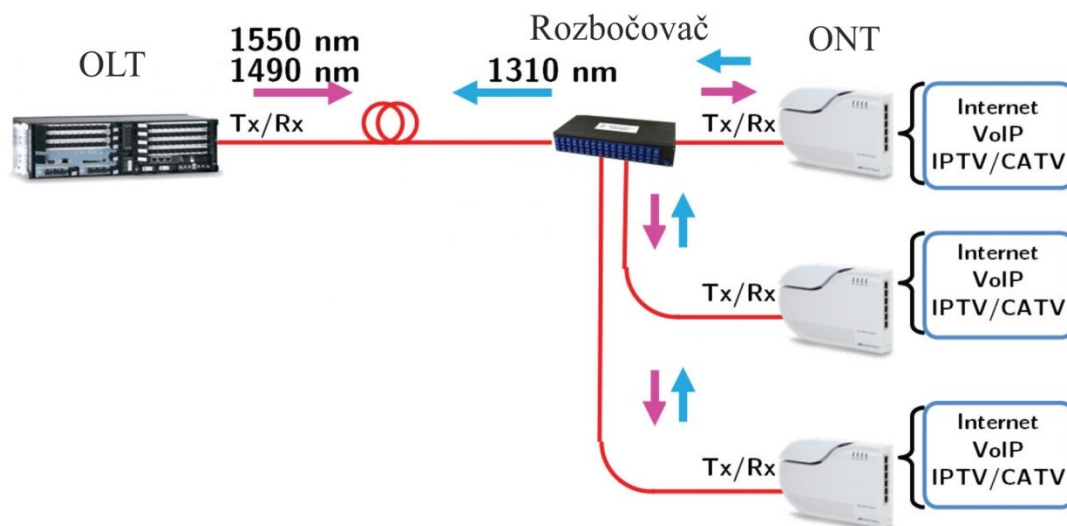
Táto topológia poskytuje výhody v podobe vyššej bezpečnosti siete, jednoduchej konfigurácii a nezdieľanej šírky prenosového pásma pre koncového účastníka. Hlavnou nevýhodou tejto topológie je nákladnejšia výstavba siete.

Ďalším typom siete s využitím topológie P2P sú optické bezvláknové spoje FSO (Free Space Optics). Komunikácia prebieha medzi vysielateľom a prijímačom s priamou viditeľnosťou na seba. Tieto siete využívajú ako prenosové médium voľný priestor (atmosféru) medzi vysielateľom a prijímačom či už vo vnútorných alebo vonkajších priestoroch. Výhodou je že nevyžadujú fyzické optické prenosové médium [7], [8].

1.4.2 Topológia P2MP

V topológií typu bod - viac bodov P2MP (Obrázok 1.5) sa využíva zdieľané vlákno s využitím časového alebo vlnového multiplexu pre koncového užívateľa. Pre každú vetvu siete je jedno zdieľané optické vlákno zapojené do jednotky OLT. Na druhom konci tohto vlákna je pripojený optický rozbočovač a z neho pre každého užívateľa vyvedené zdieľané optické vlákna. Podobne ako pri predchádzajúcej topológii sa tu môžu využívať na zostupný smer vlnové dĺžky 1490nm a 1550 nm a vzostupný smer vlnová dĺžka 1310 nm. Nasadenie tejto topológie je možné na pasívne aj aktívne siete. Na Obrázku 1.5 je zobrazená pasívna sieť s využitím tejto topológie [7], [8].

Výhodou tejto topológie P2MP naproti P2P je výrazná úspora nákladov pri výstavbe infraštruktúry, keďže jednotliví užívatelia zdieľajú optické vlákno. Nevýhodou je potreba zavedenia riadenia kvality služieb QoS z dôvodu zdieľaného prenosového média a zmenšenie šírky prenosového pásma pre koncového užívateľa.



Obrázok 1.5: Topológia typu bod - viac bodov P2MP [7]

1.5 Aktívne a pasívne optické siete

1.5.1 Aktívne optické siete

Ďalším možným delením prístupových optických sietí je na základe použitých sieťových prvkov. Aktívna optická sieť AON (Active Optical Network) obsahuje aktívne sieťové prvky ako elektronické prepínače, opakovače. Tieto siete zvyčajne využívajú P2P topológiu kde je pre každého užívateľa vyhradená celá šírka prenosového kanálu. AON môžu využívať aj technológie SDH a ATM pri topológiách typu P2MP s využitím aktívneho prepínača. Aktívne siete môžu dosahovať až štvornásobne väčšie vzdialenosti medzi jednotkou OLT a koncovým užívateľom ako pasívne siete. V tejto vzdialenosti je počet obsluhovaných užívateľov obmedzený len počtom prepínačov v sieti [8], [9].

1.5.2 Pasívne optické siete

Pasívne optické siete PON (Passive Optical Network) nevyužívajú žiadne aktívne prvky na trase ktoré by vyžadovali napájanie. Tieto siete využívajú na rozdelenie signálu ku koncovým užívateľom ako aj na jeho zlučovanie v opačnom smere optické rozbočovače (splitter). PON siete využívajú topológiu P2MP kde medzi jednotkou OLT a rozbočovačom sa využívajú zdieľané vlákna. Z toho dôvodu je tu potrebná vyššia réžia kvality služieb, aby mal

každý koncový užívateľ garantovanú svoju kapacitu pripojenia. Pasívne siete síce dosahujú menších vzdialenosti ako aktívne ale náklady na výstavbu a prevádzku týchto sietí sú nižšie.

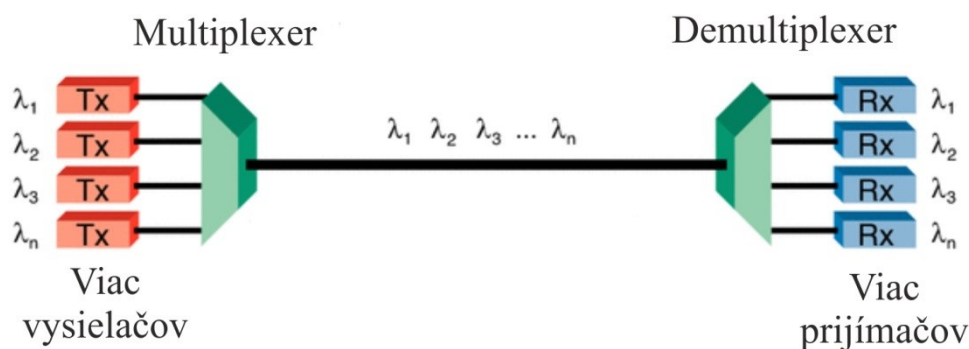
PON siete sa ďalej delia v závislosti na spôsobe multiplexovania na časovo multiplexované TDM, frekvenčne multiplexované FDM a vlnovo multiplexované WDM. PON siete využívajú prevažne WDM a TDM. Keďže sa táto práca bude zaoberať simuláciou disperzných javov na WDM PON sieťach, v ďalšej podkapitole sú tieto siete rozobrané podrobnejšie [8], [9].

1.6 WDM PON siete

WDM PON siete predstavujú technológiu využívajúcu vlnový multiplex na pasívnych optických sieťach. Tieto siete používajú vlnové oddelenie každého kanála pre účinné využitie šírky prenosového pásma daného optického vlákna. Jednotliví koncoví klienti majú v týchto sieťach vyhradený vlastný prenosový kanál na samostatnej vlnovej dĺžke. Z hľadiska fyzickej vrstvy je topológia u takýchto sietí typu bod - viac bodov. V prípade logickej vrstvy sa však jedná o spojenie medzi OLT a ONU alebo ONT prostredníctvom topológie typu bod - bod.

V súčasnosti existujú aj varianty s technológiou časového multiplexu teda WDM-TDM PON siete alebo tiež hybridné prístupové siete, ktoré ešte viac zefektívňujú využitie prenosového pásma kanálu.

Ako už bolo spomenuté WDM technológia združuje niekoľko optických kanálov do jedného optického vlákna z využitím vlnového oddelenia. Na každú nosnú vlnu vo vysielačoch je namodulovaná informácia ktorá sa má preniesť. Tieto vlny z optických kanálov sa ďalej v multiplexere zlúčia do jedného a sú prenášané jedným optickým vláknom. Na druhej strane v demultiplexere sa opäť rozdelia na jednotlivé vlny a kanály, ktoré prijímajú spracovávajú a vyhodnocujú jednotlivé prijímače. Tento princíp je zobrazený na Obrázku 1.6. Pri prenose viacerých kanálov je dôležité použiť okrem multiplexeru a demultiplexeru aj modulátory, demodulátory a zdroje svetla o vhodnom počte ako kanálov[8], [10].



Obrázok 1.6: Princíp vlnového delenia

Vlnový multiplex WDM sa ďalej rozdeľuje na tri základne multiplexy: WDM, DWDM a CWDM.

1.6.1 CWDM

Hrubý vlnový multiplex CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) poskytuje cenovo dostupnejšiu a na implementáciu jednoduchšiu alternatívu k DWDM technológií popísanej nižšie. V jednom optickom vlákne je možné prenášať až 18 nezávislých kanálov s rozdielnou vlnovou dĺžkou. Tieto vlnové dĺžky môžu pracovať na iných technológiách a formátoch. Jednotlivé vlnové dĺžky definuje štandard ITU-T G.694.2 kde prvá nosná vlnová dĺžka je na 1271 nm a posledná na 1611 nm. Odstup medzi každou nosnou je 20 nm. Širokopásmové filtre umožňujú toleranciu od ± 6 nm do ± 7 nm nominálnej prijatej vlnovej dĺžke. Použitie všetkých 18 kanálov nie je možné z dôvodu ceny sieťových jednotiek na trase alebo v závislosti na použítom optickom vlákne. Pre vlákno G.652.D sa využíva 16 kanálov, pri vlákne G.652 sa využíva 12 kanálov pre krátke vzdialenosti a 8 kanálov pre vzdialenosti nad 40 km je použiteľných 8 kanálov [8], [10].

1.6.2 DWDM

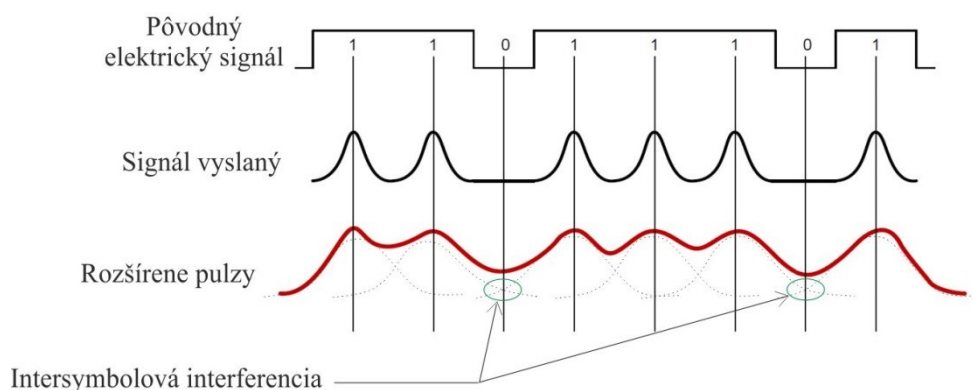
Hustý vlnový multiplex DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) vznikol postupným vývojom technológie WWDM. Počet prenášaných kanálov je teoreticky až 144 prakticky sa však pohybuje okolo 96 kanálov. Odstup jednotlivých kanálov je 0,8 nm a v prípade ultra DWDM sa jedná o 0,1 nm. Kanály sú prenášané paralelne a nezávisle na sebe s rýchlosťami 10 až 100 Gbit/s. Špecifikácia jednotlivých prenosových kanálov je zahrnutá v doporučení ITU-T G.694.1. Oblasti vlnových dĺžok sú v rozsahu od 1490 nm do 1620 nm. Táto technológia našla využitie na chrbtových sieťach a tiež na veľmi zaťažených sieťach kde je potreba dosiahnutia maximálnej šírky pásma. Jej výhodou je: viacnásobné využitie existujúcich optických vlákien, jednoducho rozšíriteľná o ďalšie dátové kanály, pripravenosť pre nastupujúce nové technológie a teoretický dosah 100 km bez nutnosti zosilnenia signálu. DWDM technológia využíva vysoko selektívne spektrálne filtre, DFB (Distributed FeedBack laser) lasery, ktoré majú veľmi úzku spektrálnu čiaru a ďalej zosilňovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Všetky tieto zariadenia sú veľmi citlivé na teplotnú a kmitočtovú stabilitu. Z toho dôvodu je táto technológia nákladnejšia a náročnejšia na správu [8], [10].

1.6.3 WWDM

Široký vlnový multiplex (Wide Wavelength Division Multiplex) je staršia technológia a teda aj cenovo dostupnejšia. V súčasnosti sa využíva len v niektorých prípadoch kde je dostačujúca na pokrytie vybraných prenosov. Využívajú sa štyri kanály s odstupom 20 nm. Pre jednomódové vlákna a vzostupný smer sú využívané vlnové dĺžky 1490 nm a 1550 nm a pre zostupný smer 1310 nm. Pri multimódových vláknach sú to vlnové dĺžky okolo 850 nm. Táto technológia sa využíva najmä na prenos typu Gigabit Ethernet a 10-Gigabit Ethernet [8], [10].

2 Disperzné javy v optických komunikačných sieťach

Disperzia je jedným z nežiaducich javov, ktoré pôsobia na prenos signálu optickým vláknom v optických sieťach. Jedná sa o jav ktorý najviac prispieva ku skresleniu prenášaného signálu. Disperzia nastáva keď vlna interaguje s prenosovým médiom alebo prechádza nehomogénnou geometriou optického vlákna [12]. Jednotlivé spektrálne zložky signálu sa šíria rôznou skupinovú rýchlosťou, teda dorazia na koniec vlákna v inom čase a týmto vzniká deformácia signálu - rozšírenie pulzu. Rozšírenie pulzu ma za následok ovplyvňovanie jednotlivých pulzov medzi sebou čo sa nazýva intersymbolová interferencia ISI (InterSymbol Interference) (Obrázok 2.1) [11].



Obrázok 2.1: Intersymbolová interferencia[11]

Dôležitým pojmom v disperziách je spomínaná skupinová rýchlosť šírenia zložiek signálu a aj fázová rýchlosť. Tieto rýchlosti sú závislé na zmenách indexu lomu a geometrie optického vlákna. Monochromatická vlna v optickom vlákne je daná vzťahom:

$$u(t, z) = A \times \cos(\omega \times t - \beta \times z), \quad (2.1)$$

kde A je amplitúda vlny, ω je radiálna frekvencia, t je čas a β je konštanta šírenia pozdĺž smeru z [13].

Ak sa monochromatická vlna šíri pozdĺž vlnovodu v smere z konštantnou fázou ($\omega \times t - \beta \times z$), potom fázová rýchlosť vlny je daná vzťahom:

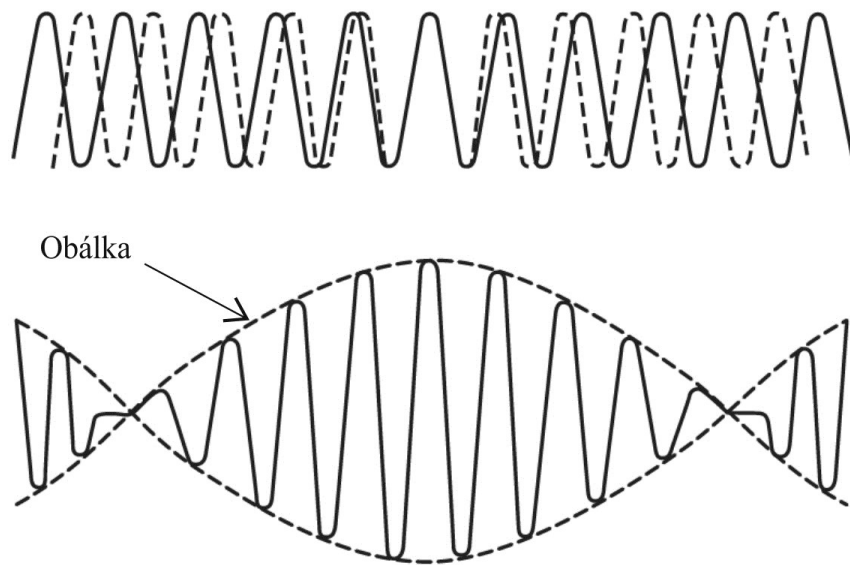
$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta}, \quad (2.2)$$

kde v_p je fázová rýchlosť, dz je derivácia podľa smeru z , dt je derivácia podľa času, ω je radiálna frekvencia a β je konštanta šírenia [13].

Dokonale monochromatickú svetelnú vlnu je však prakticky nemožné vyrobiť, pretože svetelná energia sa všeobecne skladá zo súčtu zložiek rôznych frekvencií rovinatej vlny. Ak sa šíria vlny s veľmi podobnými frekvenciami potom vytvárajú skupiny vln alebo tiež balík vln [15]. Na Obrázku 2.2 je znázornený vlnový balík tvorený kombináciou vln s mierne odlišnými frekvenciami šíriacimi sa spoločne. Obálka vlnového balíka sa pohybuje skupinovú rýchlosťou v_g , ktorá je daná vzťahom:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta}, \quad (2.3)$$

kde $d\omega$ je derivácia radiálnej frekvencie a $d\beta$ je derivácia konštanty šírenia [14].



Obrázok 2.2: Vlnový balík [14]

Pri skupinovej rýchlosti dôležitý aj pojem skupinové oneskorenie t_g na jednotku dĺžky (1 km) definované vzťahom:

$$t_g = \frac{L}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega}, \quad (2.4)$$

kde L je dĺžka a v_g skupinová rýchlosť [13].

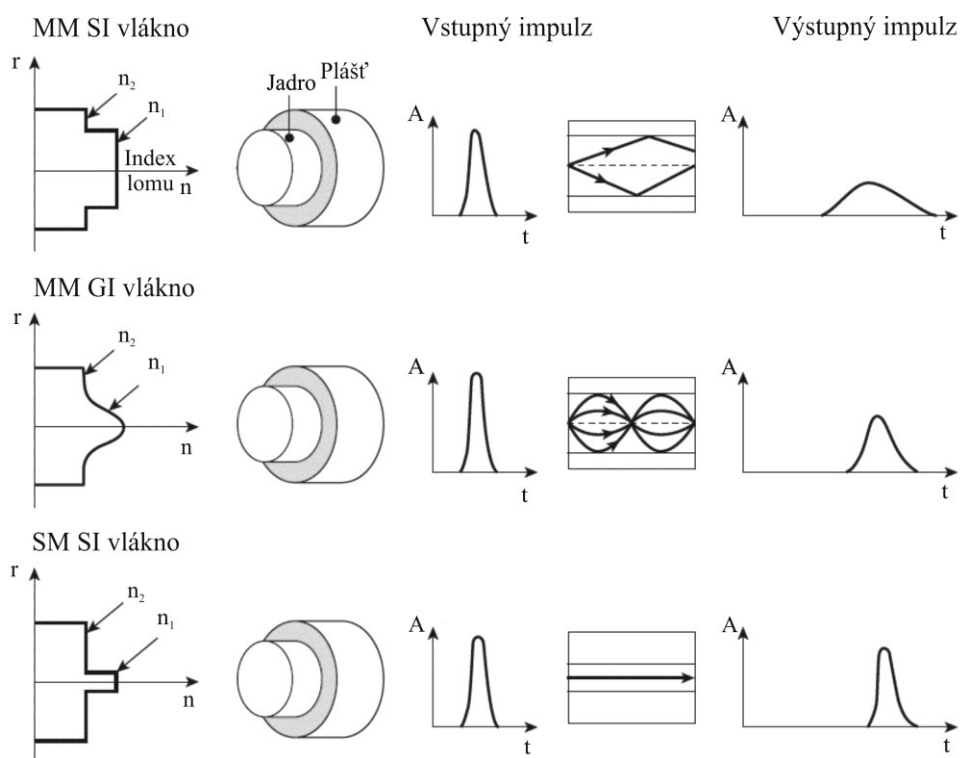
Disperzia môže mať rôzne príčiny ktoré rozširujú prenášané impulzy a podľa týchto príčin sa rozdeľuje na tri časti [16]:

- Módová disperzia.
- Chromatická disperzia.
- Polarizačná módová disperzia.

2.1 Módová disperzia

Nastáva v multimódových vláknach kde sa jednotlivé módy šíria v jadre rôznymi dráhami a na koniec vlákna dorazia s rôznym časovým oneskorením [17]. Každému módu odpovedá iná skupinová rýchlosť šírenia. Impulz zložený z veľkého počtu módov je na konci optického vlákna časovo rozťahnutý. Takýto rozťahnutý impulz presahuje rozhodovacie úrovne detektora, ktorý nedokáže rozlíšiť jednotlivé módy ale ich len sčítava, takže pri vyššej disperzii je pre detektor ťažké zrekonštruovať pôvodný signál [16].

Módová disperzia je závislá aj na typu použitého optického vlákna. Šírenie impulzu v troch základných typoch vlákien je zobrazené na Obrázku 2.3. Jedná sa o vlákna typu multimód so skokovou zmenou indexu lomu, multimódové gradientné vlákno a jednomódové vlákno so skokovou zmenou indexu lomu [14].



Obrázok 2.3: Šírenie impulzu vo vláknach pri módovej disperzii [14]

Optické vlákna so skokovou zmenou indexu lomu jadra sú charakteristické konštantným indexom lomu jadra n_1 a o mierne nižším indexom lomu plášťa n_2 . Jednomódové vlákna so skokovou zmenou indexu lomu majú výhodu nízkej módovej disperzie, pretože sa prenáša len jeden mód cez toto vlákno [14]. Pri využití multimódových vlákien rozlišujeme doby šírenia dvoch módov a to: osového a medzného. V prípade osového módu je doba šírenia minimálna. Svetlo sa v tomto móde šíri v ideálnom prípade po priamke alebo sa k nej aspoň približuje [16]. Doba oneskorenia je v tomto prípade daná vzťahom:

$$T_{Min} = \frac{\text{vzdialenosť}}{\text{rýchlosť}} = \frac{L}{(c/n_1)} = \frac{L \times n_1}{c}, \quad (2.5)$$

kde L je vzdialenosť, n_1 index lomu jadra a c rýchlosť svetla vo vákuu.

Pri medznom móde je doba šírenia vo vlákne najdlhšia a je popísaná vzťahom:

$$T_{Max} = \frac{L/\cos\theta}{(c/n_1)} = \frac{L/n_1}{(c/\cos\theta)} = \frac{L \times n_1^2}{c \times n_2}, \quad (2.6)$$

kde n_2 predstavuje index lomu plášťa a $\cos\theta$ je uhol vyjadrený zo Snellovho zákona lomu.

Rozdiel medzi najrýchlejším osovým módom a najpomalším medzným módom je daný vzťahom:

$$\Delta T_{SI} = T_{Max} - T_{Min} = \frac{L \times n_1^2}{c \times n_2} - \frac{L \times n_1}{c} = \frac{L \times n_1^2}{c \times n_2} \times \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) = \frac{L \times n_1^2}{c \times n_2} \times \Delta, \quad (2.7)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (2.8)$$

kde Δ je relatívny index lomu ktorého vzťah pre výpočet je vo vzorci 2.8 [16].

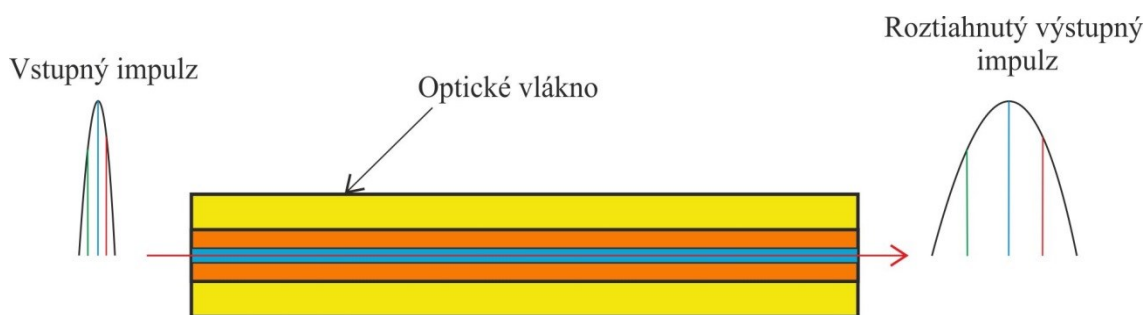
Gradientné vlákna nemajú konštantný index lomu jadra ale postupne znižujúci sa s radiálnou vzdialenosťou od maximálnej hodnoty n_1 v osy jadra až po hodnotu indexu lomu plášťa n_2 na rozhraní jadra a plášťa [14]. Pri týchto typoch vlákna sa rozdiel medzi najrýchlejším a najpomalším módom vypočíta podľa vzťahu:

$$\Delta T_{GI} = \frac{L \times n_1 \times \Delta^2}{8 \times c}, \quad (2.9)$$

kde L je vzdialenosť, n_1 index lomu jadra, Δ je relatívny index lomu a c rýchlosť svetla vo vákuu [14],[16].

2.2 Chromatická disperzia

Chromatická disperzia (CD) sa objavuje vo všetkých typoch optických vlákien a vyplýva z konečnej šírky spektrálnej čiary optického zdroja. Vzhľadom k tomu, že optické zdroje nevysielaajú len jednu spektrálnu zložku signálu o jednej vlnovej dĺžke ale balík takýchto zložiek s rozdielnymi vlnovými dĺžkami, môže medzi nimi dochádzať k oneskoreniu. Príčinou chromatickej disperzie je rozdielna rýchlosť jednotlivých spektrálnych zložiek ktoré sa šíria na odlišných vlnových dĺžkach [18]. Pri vyslaní impulzu do vlákna sa niektoré jeho spektrálne zložky budú šíriť pomalšie, impulz sa bude časovo rozťahovať a tým skresľovať prenášanú informáciu (Obrázok 2.4).



Obrázok 2.4: Rozšírenie impulzu vplyvom chromatickej disperzie

Chromatickú disperzia $D_{CH}(\lambda)$ je tvorená materiálou $D_{MAT}(\lambda)$, vlnovodovou $D_{WG}(\lambda)$ a profilovou disperziou $D_P(\lambda)$. Celková výsledná chromatická disperzia je teda daná súčtom týchto zložiek:

$$D_{CH}(\lambda) = D_{MAT}(\lambda) + D_{WG}(\lambda) + D_P(\lambda). \quad (2.10)$$

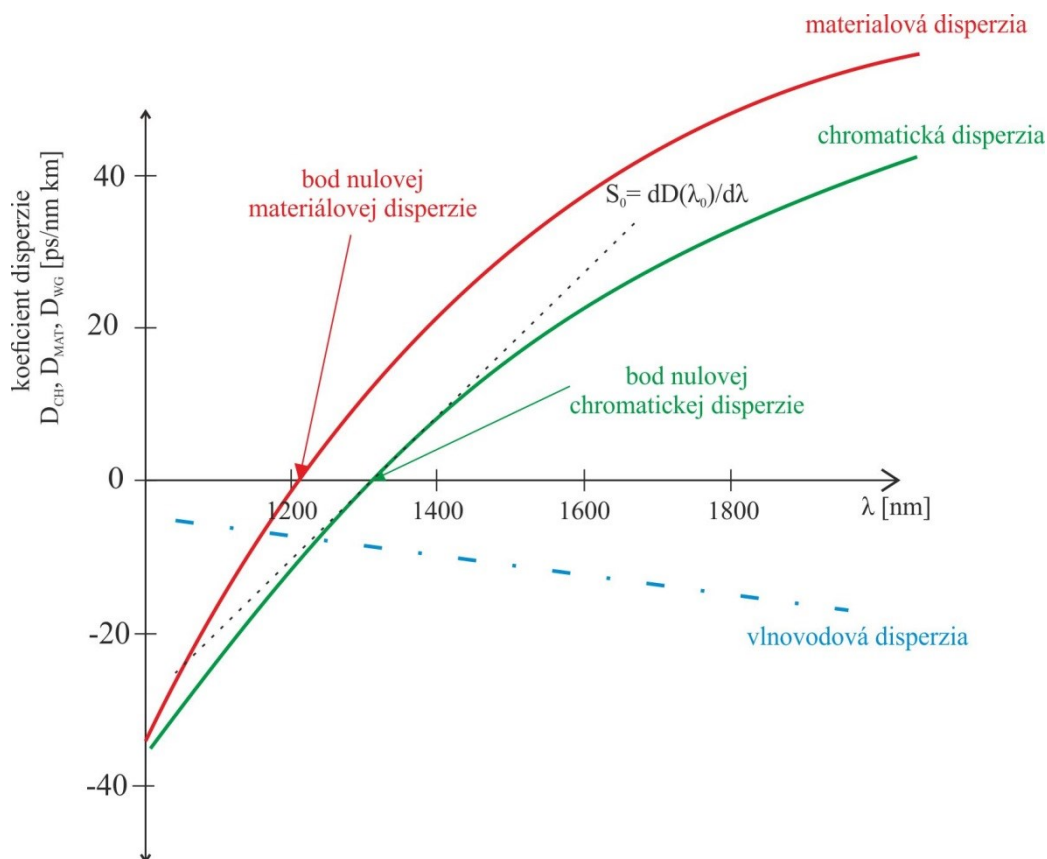
Veľkosť chromatickej disperzie optického vlákna vyjadruje koeficient chromatickej disperzie $D(\lambda)$ daný vzťahom:

$$D(\lambda) = \frac{dT_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad \left[\frac{ps}{nm \times km} \right]. \quad (2.11)$$

Hodnota tohto koeficientu udáva zmenu skupinového oneskorenia signálu T_g pri prechode vláknom v závislosti na vlnovej dĺžke λ . Výsledná hodnota koeficientu udáva rozšírenie Gaussovského impulzu v ps po priechode vláknom dĺžky $1 km$ a pri použití optického zdroja žiarenia so spektrálnou pološírkou $1 nm$ [16], [17].

Z predchádzajúcich viet možno konštatovať že veľkosť roztiahnutia impulzu rastie s veľkosťou koeficientu chromatickej disperzie vlákna, dĺžkou trasy a spektrálnou šírkou

optického zdroja. Veľkosť koeficientu chromatickej disperzie je daný výrobou vlákna a je praktický nezávislý na montáži trasy a vplyvoch okolitého prostredia.



Obrázok 2.5: Spektrálna závislosť koeficientu chromatickej disperzie

Na Obrázku 2.5 je zobrazená typická spektrálna závislosť koeficientu chromatickej disperzie a sú na ňom vyznačené aj body nulovej materiálovej a celkovej chromatickej disperzie. Hodnota vlnovej dĺžky nulovej chromatickej disperzie je pre konvenčné vlákna v oblasti 1300 až 1324 nm. Koeficient chromatickej disperzie je v spektrálnej oblasti nad vlnovou dĺžkou nulovej chromatickej disperzie kladný a naopak pod touto hodnotou vlnovej dĺžky je záporný. Z čoho vyplýva že pri zápornom koeficiente sa kratšie vlnové dĺžky oneskoriajú oproti dlhším a pri kladnom koeficiente sa zas dlhšie vlnové dĺžky oneskoriajú oproti kratším [16], [18].

Koeficient chromatickej disperzie sa dá u konvenčných vlákien vypočítať presnejšie pomocou nulovej vlnovej dĺžky označovanej ako λ_0 a sklonu na tejto vlnovej dĺžke (S_0) s využitím normalizovaného vzťahu [18]:

$$D(\lambda) = \frac{(S_0)}{4} \times \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \quad \left[\frac{ps}{nm \times km} \right]. \quad (2.12)$$

Časové rozšírenie impulzu vyslaného zdrojom žiarenia so spektrálnou pološírkou $\Delta\lambda$, prechodom optického vlákna o dĺžke L a koeficiente $D(\lambda)$ je dané vzťahom [18]:

$$\Delta t = D(\lambda) \times \Delta\lambda \times L \quad \left[ps; \frac{ps}{nm \times km}; nm; km \right]. \quad (2.13)$$

Všeobecne chromatická disperzia potom pri vyšších prenosových rýchlostiach s užšími impulzmi spôsobuje väčšie skreslenie práve rozširovaním impulzov.

Chromatická disperzia nevzniká náhodne a nezávisí na vplyvoch vonkajšieho prostredia takže je pomerne dobre kompenzovateľná.

2.2.1 Profilová disperzia

Je daná závislosťou profilu indexu lomu na vlnovej dĺžke a z nej vyplývajúcej závislosti rýchlosti šírenia vlny na kmitočte.

$$D_p = \frac{d\Delta}{d\lambda} \quad (2.14)$$

Ak sa disperzné vlastnosti prímеси líšia od základného materiálu skla aj medzi sebou navzájom, potom budú aj podmienky šírenia celkovej disperzie na každej vlnovej dĺžke iné a iné budú aj optimálne profily indexu lomu pre každú vlnovú dĺžku [16].

Profilová disperzia je malá a prejavuje sa až u vysokorýchlostných prenosoch kde dosahuje hodnoty 0,5 ps/(nm × km) [19].

2.2.2 Materiálová disperzia

Materiálovú disperziu spôsobuje závislosť indexu lomu jadra samotného materiálu z ktorého je optické vlákno vyrobené na vlnovej dĺžke žiarenia. Jednotlivé vlnové dĺžky spektrálnych zložiek v impulze sa teda materiálom šíria rôznymi rýchlosťami, čo ma za následok zníženie prenosovej kapacity a rozšírenie impulzu [16], [19]. Táto závislosť môže byť vyjadrená pomocou Sellmeierového disperzného vzťahu ako:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_k \frac{G_k \times \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_k^2)}, \quad (2.15)$$

kde G_k je Sellmeierová konštanta a k je celé číslo z rozsahu 1 až 3 [13].

Materiálová disperzia ovplyvňuje aj dobu šírenia jednotlivých módov čo ma čiastočný vplyv aj na módovú disperziu.

Oneskorenie impulzu vplyvom materiálovej disperzie je dané potom vzťahom:

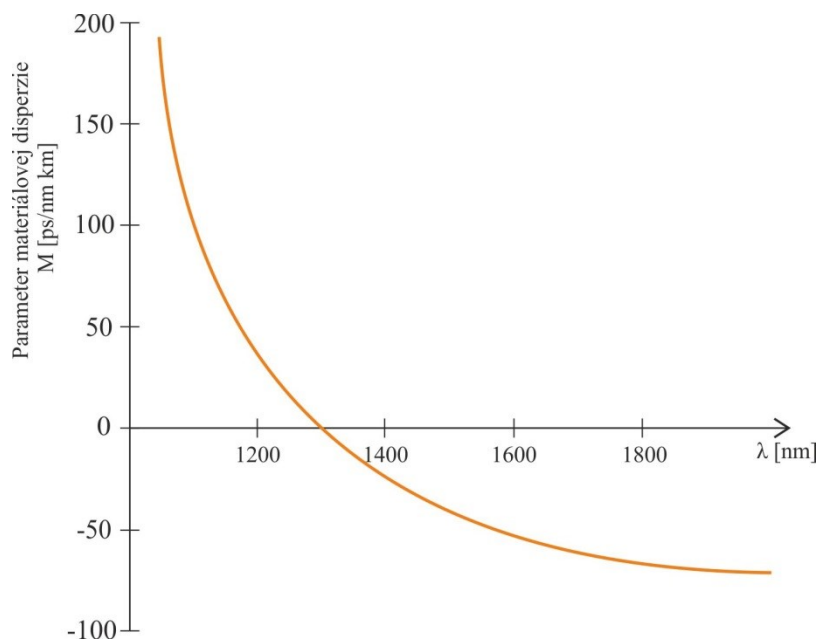
$$\tau_{MAT} = \frac{L}{c} \times \left(n_1 - \lambda \times \frac{dn_1}{d\lambda} \right), \quad (2.16)$$

kde L je dĺžka vlákna a c je rýchlosť svetla vo vákuu a n_1 je index lomu jadra [13].

Materiálová disperzia sa môže ďalej označovať aj pomocou parametra M , ktorého hodnotu vypočítame ako:

$$M = \frac{1}{L} \times \frac{d\tau_{MAT}}{d\lambda} \quad \left[\frac{ps}{nm \times km} \right]. \quad (2.17)$$

Na Obrázku 2.6 je zobrazená zmena parametra M v závislosti na vlnovej dĺžke pre čistý kremík. Pre vlnovú dĺžku okolo 1300 nm sa dá konštatovať že materiálová disperzia sa blíži k nule. Toto predstavuje ďalší podnet pre zníženie materiálovej disperzie pre dlhšie vlnové dĺžky [14].



Obrázok 2.6: Zobrazenie parametru materiálovej disperzie M pre čistý kremík v závislosti na vlnovej dĺžke [14]

2.2.3 Vlnodovová disperzia

Príčinou vlnodovovej disperzie sú geometrické vlastnosti optického vlákna ako polomer jadra, profil index lomu a vlnová dĺžka signálu. Tieto vlastnosti majú vplyv na šírenie signálu tým že sa menia kmitočty a teda aj rýchlosť jednotlivých módov. Inými slovami svetlo vedené

v jadre optického vlákna sa čiastočne prenáša aj plášťom a vzhľadom k tomu že indexy lomu jadra a plášťa sú rozdielne nastáva zmena rýchlosti jednotlivých vlnových dĺžok [11].

Parameter vlnovodovej disperzie je daný vzťahom:

$$D_{wg} = -\left(\frac{n_1 - n_2}{\lambda \times c}\right) \times V \times \frac{d^2 \times (V \times b)}{d \times V^2}, \quad (2.18)$$

kde V je normalizovaná frekvencia pre optické vlákno a b je normalizovaná konštanta šírenia, ktorá sa vypočíta podľa vzťahu 2.19 [14].

$$b = \frac{(\beta^2 / k^2) - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.19)$$

kde β je konštanta šírenia, k je celé číslo z rozsahu 1 až 3, n_1 je index lomu jadra a n_2 je index lomu plášťa [13].

Parameter vlnovodovej disperzie je vždy záporný. Veľkosť roztiahnutia signálu vplyvom tejto disperzie rastie s dĺžkou optickej trasy, veľkosťou koeficientu vlnovodovej disperzie a spektrálnou šírkou optického zdroja žiarenia [12]. Vlnovodová disperzia je pri multimódových vláknach zanedbateľná, ale pri jednomódových vláknach sa podieľa na celkovej chromatickej disperzii [17].

2.2.4 Typické hodnoty chromatickej disperzie

Koeficient chromatickej disperzie sa pre jednotlivé typy vlákien líši. Pre každé vlákno je podľa odporúčenia ITU-T stanovená limitná hodnota. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené hodnoty koeficientov chromatickej disperzie pre vybrané typy vlákien [37], [38], [39].

Tabuľka 2.1: Hodnoty koeficientov chromatickej disperzie pre vybrané typy vlákien

Typ vlákna	Koeficient chromatickej disperzie [ps/nm × km]	
	$\lambda = 1310$ nm	$\lambda = 1550$ nm
ITU-T G.652	0	17
ITU-T G.653	-	0
ITU-T G.656	-	9,28 ⁽¹⁾

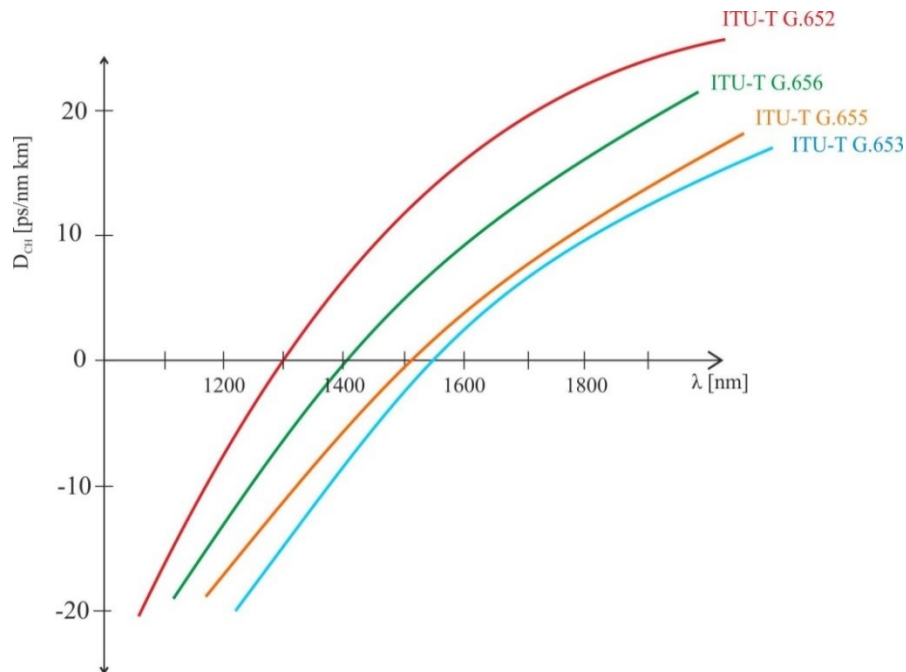
(1) - maximálna hodnota

Medzinárodná telekomunikačná únia (ITU-T) v rámci sektoru pre telekomunikačnú normalizáciu určuje štandardizované parametre optických vlákien v odporúčaní rady G.65x. V telekomunikačnej technike sa používajú nasledujúce štandardy optických vlákien a káblov ktoré sa aktualizujú a sú dostupné na internetovej stránke ITU.

- G.651.1 - Predstavuje charakteristiku multimódového 50/125 μm gradientného optického kábla pre optické prístupové siete.
- G.652 - Tento štandard charakterizuje jednomódové konvenčné optické vlákna a káble, ktorý obsahuje štyri kategórie A, B, C, D.
- G.653 - Charakteristika jednomódových optických vlákien a káblov s posunutou disperznou charakteristikou. Koeficient nulovej chromatickej disperzie je posunutý na vlnovú dĺžku 1550 nm.
- G.654 - Charakteristika jednomódových optických vlákien a káblov s minimálnym útlmom v oblasti vlnovej dĺžky 1550 nm. Obsahuje štyri kategórie A, B, C, D.
- G.655 - Charakteristika jednomódových vlákien s posunutou nenulovou chromatickou disperziou obsahujúci päť kategórií.
- G.656 - Charakteristika vlákien a káblov s nenulovou disperziou pre širokopásmový optický prenos.
- G. 657 - Charakteristika jednomódových vlákien a káblov so zníženou citlivosťou na ohyb pre prístupové siete. Obsahuje dve kategórie A, B.

Tieto štandardy predstavujú najhoršie možné podmienky pre prácu optických rozhraní. Odlišujú sa od seba predovšetkým v počte módo, útlmom, citlivosťou a priebehom chromatickej disperzie [36].

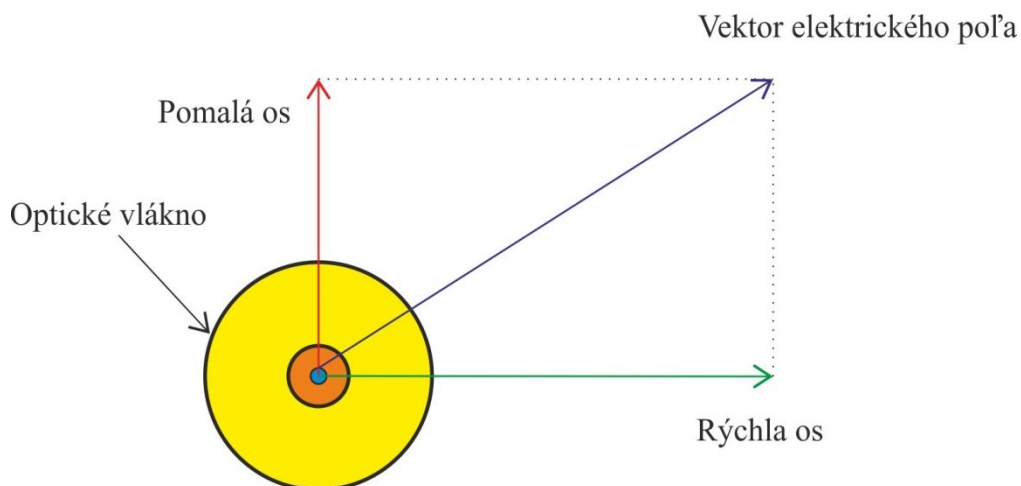
Priebehy chromatickej disperzie u vybraných štandardov vlákien možno vidieť na Obrázku 2.7 [52].



Obrázok 2.7: Štandardy vlákien podľa priebehu chromatickej disperzie

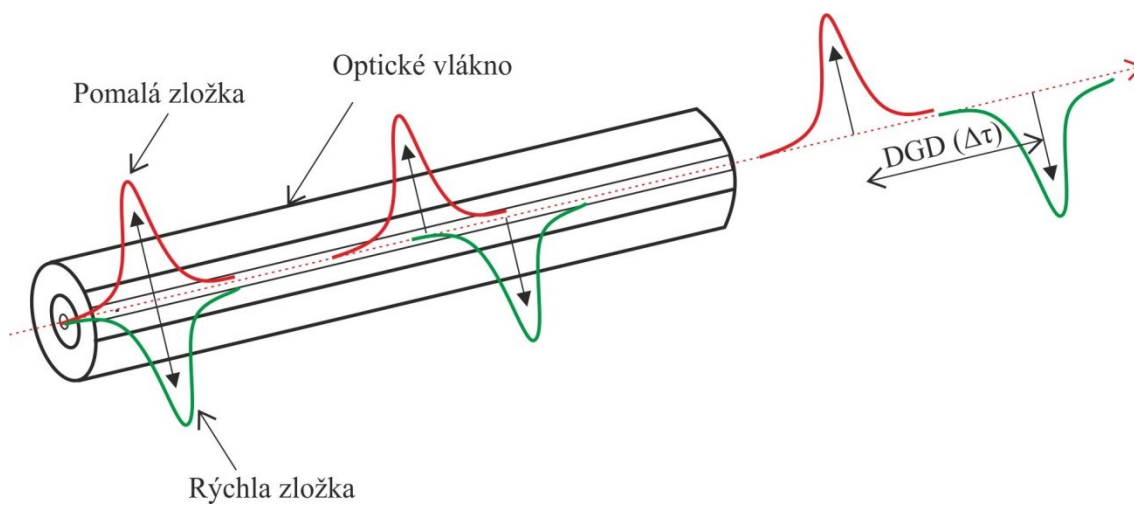
2.3 Polarizačná módová disperzia

Polarizačne módová disperzia PMD (Polarization Mode Dispersion) predstavuje s narastajúcimi prenosovými rýchlosťami jeden z najväčších limitujúcich problémov optického vlákna. Vedie k časovému rozťahnutiu a skresleniu prenášaného signálu a tak ovplyvňuje linearitu samotného vlákna a šírku pásma. PMD je spôsobená dvojlomom v optickom vlákne, ktorý spôsobuje rozloženie módu do dvoch navzájom kolmých zložiek optického impulzu [16]. Zložky impulzu sú závisle medzi sebou a pri šírení si vymieňajú energiu. Jedna z týchto zložiek je označovaná ako rýchla a druhá ako pomalá alebo tiež ako rýchla os a pomalá os (Obrázok 2.8). Po zlúčení týchto zložiek vzniká vektor elektrického poľa [19]. Tieto zložky sa vplyvom nehomogenity ako je nesymetria kruhového prierezu optického vlákna šíria rôznou rýchlosťou. PMD vzniká náhodne v závislosti na indexu lomu ktorý nie je po celej dĺžke optického vlákna rovnaký [15]. Vplyvy ktoré spôsobujú PMD môžu byť vonkajšie (mechanické pôsobenia na optické vlákno), vnútorné (nedokonalosti jadra vlákna) alebo použitím určitého prenosového systému [16].



Obrázok 2.8: Zobrazenie rozloženia módu vplyvom dvojlomu [16]

Keďže žiadne optické vlákno nie je ideálne kruhové a homogénne dochádza vplyvom rôznej rýchlosti šírenia zložiek k časovému oneskoreniu medzi nimi. Časové oneskorenie je zobrazené na Obrázku 2.9, kde $\Delta\tau$ zobrazuje posuv medzi rýchlou a pomalou osou. $\Delta\tau$ sa tiež označuje pojmom DGD (Differential Group Delay) diferenciálna skupinová doba oneskorenia a je uvádzaná v jednotkách ps [14].



Obrázok 2.9: Oneskorenie zložiek impulzu pri PMD

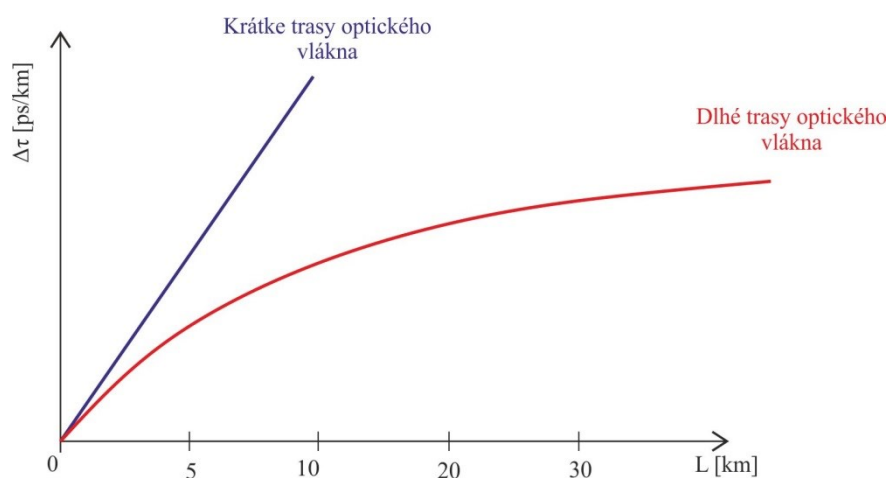
Časové oneskorenie DGD je základným parametrom pri PMD. PMD je pri krátkych vzdialenostiach okolo 10 km lineárne závislá na dĺžke optického vlákna a určuje sa pomocou vzťahu 2.20. Pri dlhých optických vláknach nie je PMD lineárne závislá na dĺžke vlákna ale mení sa s jeho druhou odmocninou vzdialenosti. Na výpočet PMD pre dlhé trasy sa používa vzťah 2.21 [17].

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{L} \quad \left(\frac{ps}{km} \right). \quad (2.20)$$

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad \left(\frac{ps}{\sqrt{km}} \right). \quad (2.21)$$

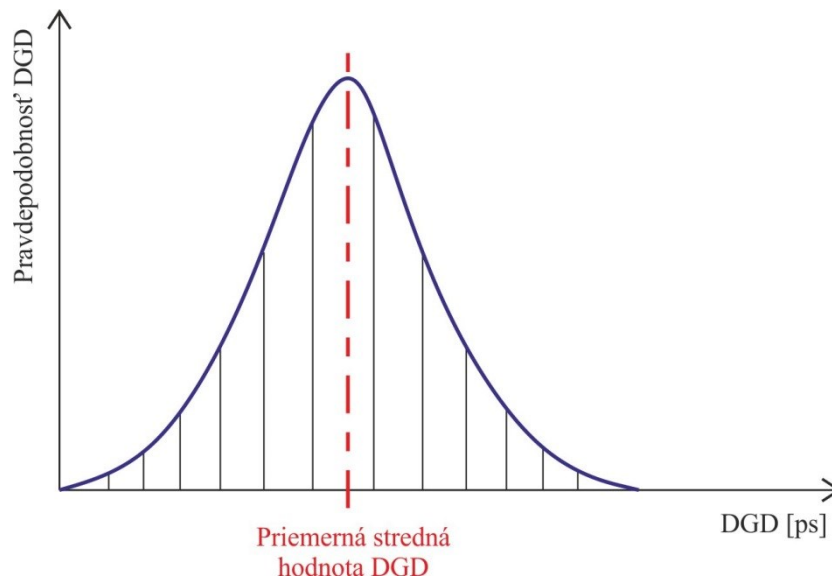
Kde $\Delta\tau$ je doba oneskorenia medzi zložkami a L je dĺžka optického vlákna.

Závislosti PMD na dĺžkach optického vlákna sú zobrazené na nasledujúcom Obrázku 2.10. Kde v prípade krátkych trasách optického vlákna PMD stúpa lineárne a pri dlhých s druhou odmocninou dĺžky trasy [15].



Obrázok 2.10: Závislosť PMD na dĺžke trasy optického vlákna

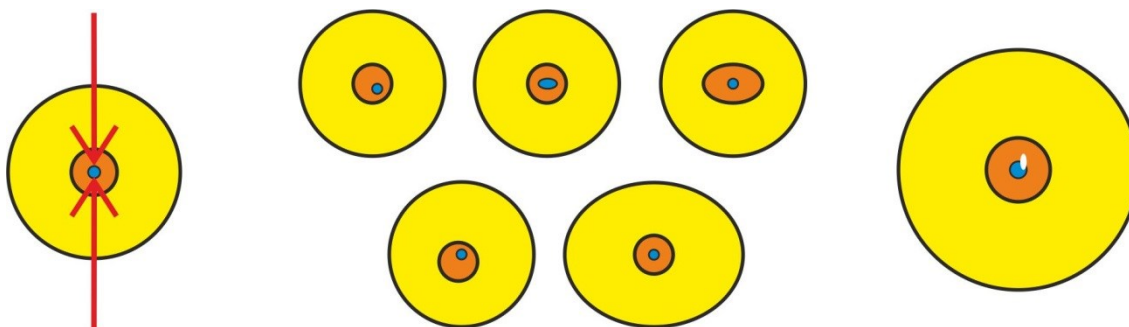
Keďže PMD závisí na náhodnom dvojlome optického vlákna nemôže byť definovaná priamo okamžitou hodnotou DGD. Nejedná sa o opakovateľnú hodnotu, ale o hodnotu ktorá náhodne kolíše okolo priemernej strednej hodnoty Maxwellovej krivky (Obrázok 2.11) [19].



Obrázok 2.11: Maxwelllove rozloženie DGD

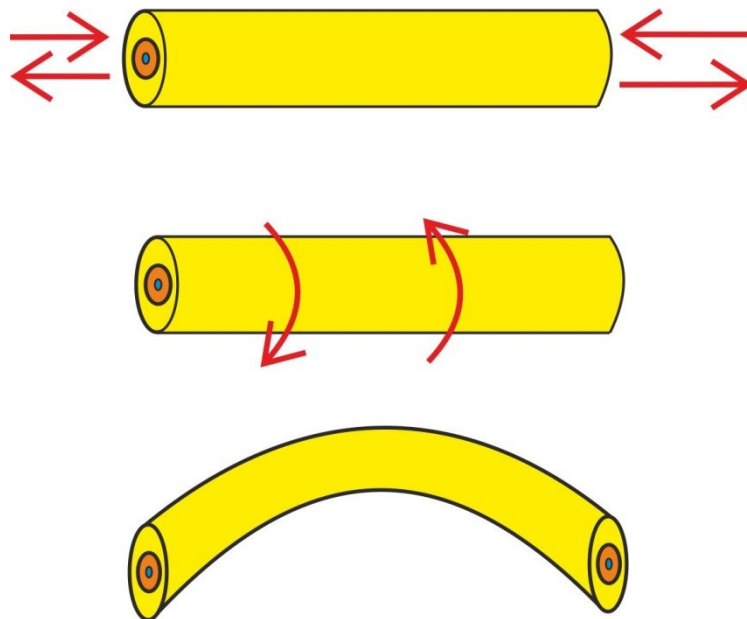
Ako už bolo spomenuté vplyvy vzniku PMD možno rozdeliť na dve veľké skupiny a to: vnútorné a vonkajšie. Ďalej môže existovať rozdelenie vzhľadom na použitý prenosový systém kde sa PMD zvyšuje so zväčšovaním prenosovej rýchlosti, dĺžkou trasy alebo množstvom kanálov vo vlákne pri použití WDM multiplexu [16].

Medzi vnútorné vplyvy vznikajúce pri výrobe vlákna patrí: eliptický tvar jadra, eliptický tvar plášťa, nesúmerný plášť, tlak na jadro, vzduchová bublina, nesúmerná sekundárna ochrana, eliptický tvar sekundárnej ochrany [12].



Obrázok 2.12: Zobrazenie vnútorných vplyvov na PMD (tlak na jadro, nehomogénna geometria vlákien, vzduchová bublina)

Do vonkajších vplyvov vznikajúcich pri budovaní trasy alebo pôsobením okolitého prostredia sa zaradzuje: tlak na vlákno, krútenie vlákna, ohyb vlákna, naťahovanie vlákna, teplota okolitého prostredia [16].



Obrázok 2.13: Vonkajšie vplyvy na PMD

2.3.1 Popis PMD pomocou Jonesovho a Stokesovho priestoru

PMD sa dá matematicky popísať pomocou Stokesovho priestoru a Jonesovho priestoru. R.C. Jones zaviedol v roku 1941 výpočet podľa ktorého je polarizované svetlo reprezentované dvoma zložkami. Prvá predstavuje fázu a amplitúdu x zložky poľa, druhá predstavuje fázu a amplitúdu y zložky poľa. Pole je teda reprezentované nasledovne:

$$E = \begin{bmatrix} E_x & e^{i\Psi_x} \\ E_y & e^{i\Psi_y} \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

kde E_x a E_y sú x -ové a y -ové zložky poľa a Ψ_x a Ψ_y sú fázy poľa.

V lineárne polarizovanom svetle sú x -ová a y -ová zložka poľa vo fáze, takže Jonesov vektor obsahuje iba informáciu o amplitúde poľa. To je popísané v nasledujúcom vzťahu 2.23.

$$E = A \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

kde α je uhol sklonu vzhľadom k lineárnej horizontálnej polarizácii a A je celková amplitúda poľa. Pre kruhovo polarizované svetlo je fázový rozdiel $\pm \pi/2$ medzi x -ovou a y -ovou polarizačnou zložkou poľa, amplitúdy poľa sú tu rovnaké. Pre kruhovo polarizované svetlo je Jonesová matica daná:

$$E = A \begin{bmatrix} 1 \\ e^{\pm i\pi/2} \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Stavy medzi lineárnou a kruhovou polarizáciou sú eliptický polarizované [34].

Polarizačné stavy svetla môžu byť reprezentované aj Stokesovými parametrami, ktoré zaviedol v roku 1852 George Gabriel Stoke. Tieto parametre sú definované v nasledujúcich rovniciach v podmienkach x -ovej a y -ovej polarizácie poľa.

$$S_0 = |E_x|^2 + |E_y|^2 \quad (2.25)$$

$$S_1 = |E_x|^2 - |E_y|^2 \quad (2.26)$$

$$S_2 = 2 \times |E_x| |E_y| \cos \phi \quad (2.27)$$

$$S_3 = 2 \times |E_x| |E_y| \sin \phi \quad (2.28)$$

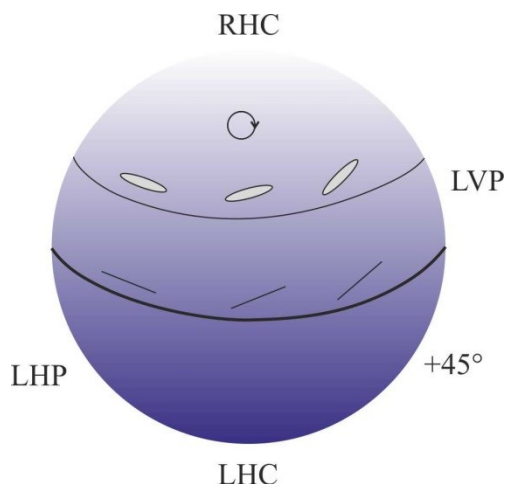
Tu je ϕ fázový rozdiel medzi x -ovou a y -ovou polarizačnou zložkou poľa a je definovaný ako:

$$\phi = \Psi_x - \Psi_y. \quad (2.29)$$

S_0 je celková intenzita alebo výkon svetla, S_1 a S_2 sú meradlami lineárnej polarizácie svetla a S_3 je meradlom kruhovej polarizácie svetla. Stokesové parametre S_0, S_1, S_2 a S_3 nie sú nezávislé a vzťahujú sa k sebe navzájom podľa nasledujúceho vzťahu:

$$S_0 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (2.30)$$

Hodnoty Stokesovho vektora $[S_1 S_2 S_3]$ sa pohybujú medzi +1 a -1. Ak je Stokesov vektor znázornený graficky v kartézskom súradnicovom systéme, stavy polarizácie svetla budú reprezentované sférou o polomere jednotky. Táto sféra je nazývaná Poincarého sférou. Vzhľadom k tomu je stav polarizácie svetla reprezentovaný ľubovoľným bodom na povrchu Poincarého sféry. Na trojrozmernom povrchu je užitočné identifikovať niektoré typické referenčné body [34].



Obrázok 2.14: Poincarého sféra [34]

Podľa Jonesovej matice pre kruhovo polarizované svetlo, amplitúdy x -ovej a y -ovej polarizačnej zložky sú rovné ($|E_x| = |E_y|$) a fázový rozdiel medzi polarizačnými zložkami je $\pm \pi/2$ čo odpovedá $S_1 = 0$, $S_2 = 0$ a $S_3 = \pm 1$ podľa vzťahov 2.26 až 2.30. Pravotočivé (RHC) a ľavotočivé (LHC) polarizačné stavy sú reprezentované severným a južným pólom na Poincarého sfére [34].

Pre lineárne polarizované svetlo reprezentované Jonesovou maticou nie je fázový rozdiel medzi x -ovou a y -ovou polarizačnou zložkou, takže $S_3 = 0$ čo znamená, že všetky lineárne polarizačné stavy sú reprezentované rovníkom (Obrázok 2.14) [34].

V Tabuľke 2.2 sú zobrazené hodnoty Stokesovho vektoru pre rôzne stavy polarizácie ktoré môžu nastať.

Tabuľka 2.2: Stokesov vektor pre rôzne stavy polarizácie [34]

Polarizačný stav	S_0	S_1	S_2	S_3
Vertikálna polarizácia (LVP)	1	-1	0	0
Horizontálna polarizácia (LHP)	1	1	0	0
Pravotočivá polarizácia (RHC)	1	0	0	1
Ľavotočivá polarizácia (LHC)	1	0	0	-1
+45° Lineárna polarizácia	1	0	1	0
-45° Lineárna polarizácia	1	0	-1	0

2.3.2 Limitné hodnoty PMD

Hodnoty PMD stanovené ITU-T pre vybrané optické vlákna a káble sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke [37], [38], [39].

Tabuľka 2.3: Maximálne hodnoty PMD pre vybrané typy vlákien

Typ vlákna a kategória	Hodnota PMD koeficientu [ps/√km]
G.652 A, C	0,5
G.652 B, D	0,2
G.653 A	0,5
G.653 B	0,2
G.656	0,2
G.657 A	0,2
G.657 B	0,5

V tabuľke 2.4 sú uvedené limitné hodnoty PMD spolu s maximálnymi DGD pre rôzne prenosové rýchlosti a dĺžky vlákien definované ITU-T [37].

Tabuľka 2.4: Limitné hodnoty DGD a PMD pre rôzne dĺžky vlákna a rýchlosti

Dĺžka vlákna [km]	Prenosová rýchlosť [Gbit/s]	Max. PMD [ps/√km]	Max. DGD [ps]
400	10	0,5	25
40	10		19
2	40		7,5
3000	10	0,2	19
80	40		7
>4000	10	0,1	12
400	40		5

3 Metódy kompenzácie disperzných javov v optických sieťach

Kompenzácia disperzných javov predstavuje v súčasnosti pri stále zväčšujúcich sa prenosových rýchlostiach najväčšie výzvy pri vývoji nových prenosových technológií. Ako bolo spomenuté v prechádzajúcej kapitole disperzné javy spôsobujú nežiaduce vplyvy na optické prenosové systémy. Medzi možnosti kompenzácie patrí použitie kompenzačných metód, využitie rôznych zdrojov žiarenia prípadne špeciálne upravených optických vlákien. Všetky kompenzácie disperzií majú za cieľ zvýšiť samotnú kvalitu prenosu a prenosové dosahy jednotlivých technológií.

Ideálne kompenzátory musia poskytovať okrem cenovej dostupnosti a nízkej spotreby aj nízke vložné straty a musia zvládať vysoký optický výkon. V skutočnosti je skoro nemožné splniť všetky požiadavky, takže sa musí pristúpiť ku kompromisom. Niektoré kompenzačné techniky sú vhodné pre určité aplikácie a na druhej strane menej vhodné na iné. Aj napriek týmto okolnostiam sú kompenzačné techniky (či už kompenzačné moduly, elektronické kompenzácie alebo využitie pokročilých modulačných formátov) atraktívne z dôvodu poskytovania vysokých disperzných tolerancií.

Kompenzačné metódy možno rozdeliť na základe typu kompenzovanej disperzie na:

- kompenzácie chromatickej disperzie,
- kompenzácie polarizačne módovej disperzie.

3.1 Metódy kompenzácie chromatickej disperzie

Kompenzovanie chromatickej disperzie formou optickou alebo elektrickou je v optických prenosových systémoch veľmi dôležité. V prípade optických sietí s nízkou prenosovou rýchlosťou je možný prenos bez potreby kompenzácie trasy do stoviek kilometrov. Pri vysokých prenosových rýchlostiach (10 Gbit/s, 40 Gbit/s) a trasách cez päť kilometrov je už potreba kompenzácie chromatickej disperzie [20]. Pre kompenzovanie chromatickej disperzie existujú rôzne metódy.

Tieto metódy možno rozdeliť na aktívne, kde patrí predovšetkým elektronické kompenzácie (popísané v Kapitole 3.3) a pasívne [21].

Medzi pasívne metódy patria kompenzácie s využitím:

- vlákien s posunutou disperznou charakteristikou DSF,
- kompenzačných vlákien DCF,
- Braggovských mriežok FBG,
- viac módových vlákien HOM,
- optickej fázovej konjugácie OPC,
- virtuálneho zobrazovacieho fázového poľa VIPA.

Chromatickú disperziu možno znížiť aj použitím vhodného zdroja optického signálu. V prípade že pôvodný zdroj je LED dióda, možno ju zameniť za DFB laser s externým modulátorom založeným na princípe Mach-Zehnderovho interferometra. Týmto sa zníži spektrálna šírka svetelného zdroja [22].

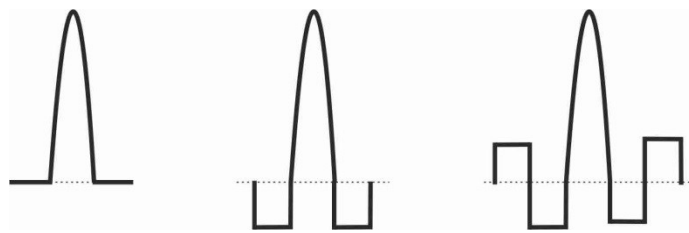
3.1.1 Kompenzácia pomocou DSF vlákien

Chromatická disperzia v sebe zahŕňa materiálovú a vlnovodovú disperziu. Materiálová disperzia ako už bolo spomenuté je pre daný materiál vlákna konštantná, vlnovodová závisí na geometrických vlastnostiach vlákna. Výrobcovia optických vlákien preto môžu meniť index lomu tak, aby nastavili nulový koeficient chromatickej disperzie na požadovanú pracovnú vlnovú dĺžku [22]. Takéto vlákna sa označujú ako vlákna s posunutou disperznou charakteristikou DSF alebo štandardné jednomódové vlákna SSMF. Využívajú sa najmä v oblasti vlnovej dĺžky 1550 nm. Štandard týchto vlákien je definovaný podľa ITU-T G.653. Pri týchto vláknach nastáva problém vo DWDM systémoch. Tu dochádza pri nulovej alebo veľmi nízkej chromatickej disperzie k vzájomnému ovplyvňovaniu kanálov najmä vplyvom nelineárne javu nazývaného štvorvlnné mixovanie FWM. Tým sa odstup signálu od šumu znižuje a signál sa skresľuje [18].

3.1.2 Kompenzačné vlákna DCF

Disperziu kompenzujúce vlákna DCF predstavujú jednoduchý a efektívny spôsob kompenzácie inštalovaných trás z jednomódových vlákien. Tieto špeciálne vlákna majú veľmi veľkú zápornú disperziu a to -70 až -100 ps/nm \times km a môžu byť použité na kompenzáciu kladnej disperzie prenosového vlákna. Zníženie výkonu vo WDM systéme je spôsobené skupinovú rýchlosťou disperzie, nelinearitou a hromadením zosilnenej spontánnej emisie šumu v dôsledku periodického rozširovania. Vplyvom nelineárneho charakteru šírenia, výkon systému závisí na výkonovej úrovni na vstupe rôznych typov vlákien, pozícií DCF vlákna a na veľkosti disperzie. Na základe toho kde bude na trase DCF vlákno umiestnené existujú tri typy kompenzačných schém a to pre-kompenzácia, post-kompenzácia a symetrická alebo zmiešaná kompenzácia [23].

Pri vytváraní kompenzačného vlákna sa ovplyvňuje profil indexu lomu na dosiahnutie zápornej disperzie. Tieto profily indexu lomu sú zobrazené na Obrázku 3.1. Prvý profil je jednoduchý profil indexu lomu používaný v začiatkoch rozvíjajúcej sa kompenzácie. Tento profil je nevýhodný pre kompenzáciu disperzie v širokom pásme, pretože má kladný disperzný sklon. Celková disperzia sa tu zväčšuje smerom k vyšším vlnovým dĺžkam. Druhý profil indexu lomu má už negatívny sklon disperzie a dá sa použiť pre kompenzáciu v DWDM systémoch. Tretím profilom indexu lomu DCF vlákien je profil na zväčšenie medznej vlnovej dĺžky, ktorý je výhodný pre väčšie výkony bez vzniku nelineárnych javov [52].



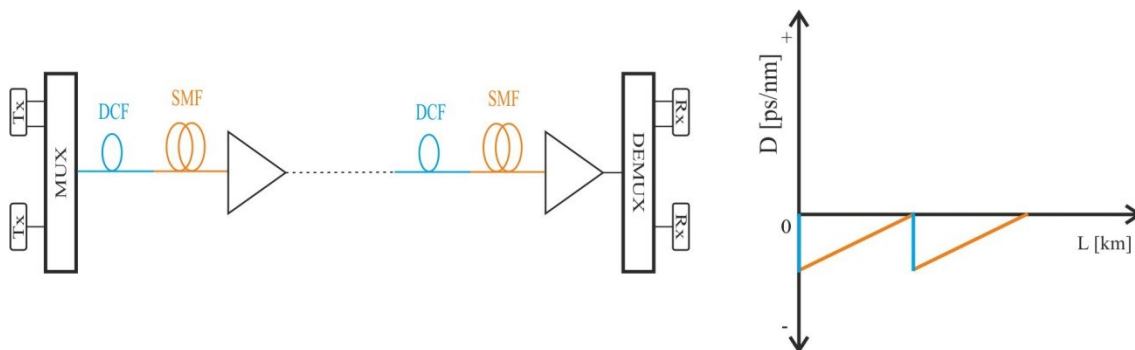
Obrázok 3.1: Typy profilov pre DCF vlákna

Dĺžka DCF vlákna je približne 1/6 dĺžky vlákna trasy [18]. DCF vlákna by mali mať nízky vložný útlm, nízku polarizačne módovú disperziu, nízku optickú nelinearitu a tiež by mali mať veľký koeficient chromatickej disperzie pre minimalizáciu dĺžky DCF vlákna. Umiestneným DCF vlákna so zápornou disperziou do trasy s jednomódovým vláknom s kladnou disperziou by sa mala celková chromatická disperzia rovnať nule. Takže pri kompenzovaní DCF vláknom by mal platiť nasledujúci vzťah 3.1 [23], [24].

$$D_{SMF} \times L_{SMF} = -D_{DCF} \times L_{DCF} \quad (3.1)$$

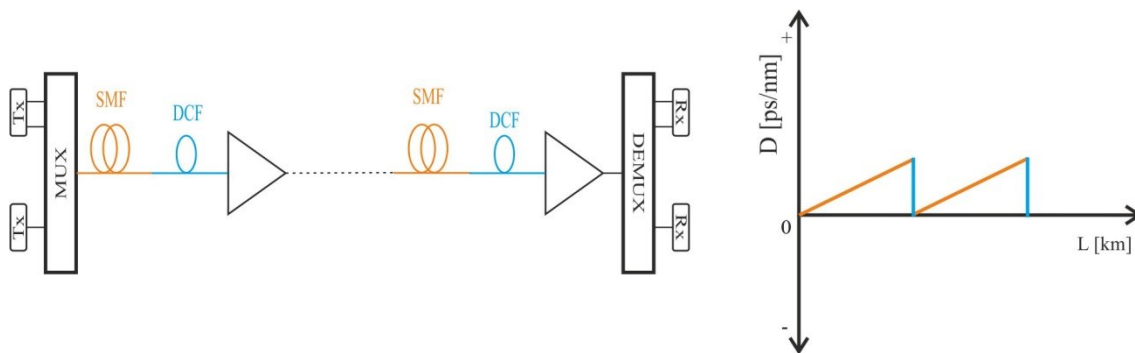
Kde D je chromatická disperzia a L je dĺžka vlákien.

Pre-kompenzácia zobrazená na Obrázoku 3.2 je metóda kde DCF vlákno so zápornou disperziou sa nachádza pred štandardným jednomódovým vláknom.



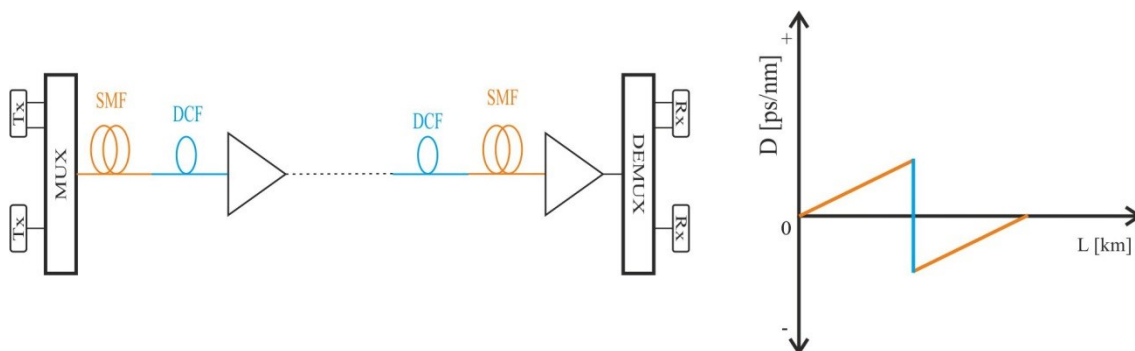
Obrázok 3.2: Pre-kompenzácia chromatickej disperzie [25]

Pri post-kompenzácií (Obrázok 3.3) sa DCF vlákno so zápornou disperziou umiestňuje za SMF s kladnou disperziou.



Obrázok 3.3: Post-kompenzácia chromatickej disperzie [25]

Miešaná alebo symetrická metóda kompenzácie predstavuje umiestnenie DCF vlákien pred a za štandardné jednomódové vlákno (Obrázok 3.4).



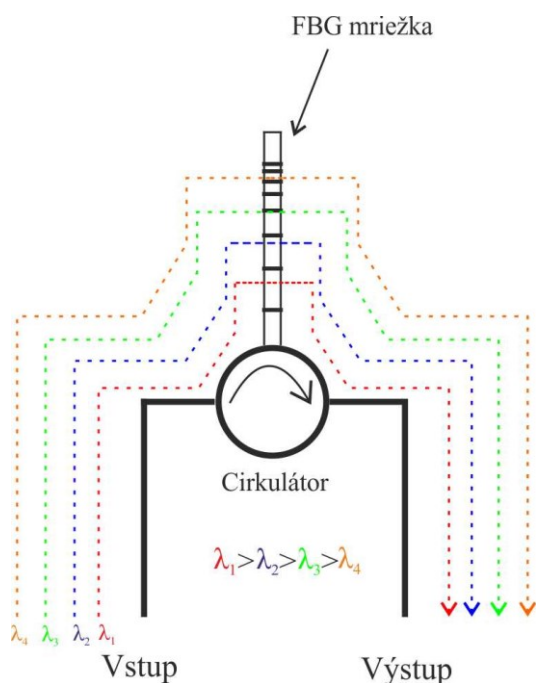
Obrázok 3.4: Symetrická kompenzácia chromatickej disperzie [25]

Rozdielne metódy vedú k vytváraniu rôznych nelineárnych efektov. Symetrická kompenzácia do značnej miery znižuje nelineárne efekty v porovnaní s pre-kompenzáciou a post-kompenzáciou. So zvyšovaním bitovej chybovosti sa zvyšuje aj výstup optického vlákna. Symetrická kompenzácia má minimálnu bitovú chybovosť a teda najlepší výkon z tejto skupiny DCF kompenzácií čiže je najvhodnejšia na kompenzovanie [24].

Výhodou DCF vlákien je ľahká výroba a vysoká spoľahlivosť. Poskytujú súvislú kompenzáciu v širokom rozsahu vlnových dĺžok. Nevýhodou je veľký vložný útlm, okolo 0,5 dB/km [18]. Z toho dôvodu sa zvyčajne umiestňujú moduly s DCF vláknom spolu s EDFA zosilňovačmi. To v konečnom dôsledku zvyšuje celkovú cenu optickej trasy. DCF vlákna majú malú veľkosť jadra čo môže mať za následok náchylnosť na určitý typ nelinearity. DCF kompenzácia závisí na vlnovej dĺžke a dokonale kompenzované je len úzke pásmo frekvencie [24].

3.1.3 Kompenzácia s využitím FBG

Vláčna s braggovskými mriežkami predstavujú dynamický kompenzátor disperzií. FBG kompenzujú chromatickú disperziu viacerých vlnových dĺžok. Pre túto vlastnosť je táto kompenzácia uprednostňovaná pred ostatnými. Čirpované FBG sú založené na princípe difrakčných mriežok. Braggovské mriežky predstavujú periodické zmeny indexu lomu jadra vo vlákne. Toto čirpované braggovské vlákno obsahuje mriežku na odraz rôznych vlnových dĺžok na rozdielnych miestach pozdĺž dĺžky mriežky. Preto pre každú vlnovú dĺžku alebo frekvenciu sa nastavuje iné oneskorenie. Krátke vlnové dĺžky sa šíria rýchlejšie a preto sa odrážajú ďalej v rámci FBG, kde splňujú Braggovskú podmienku. Z toho vyplýva že dlhšie oneskorenie sa zavádza pre kratšie vlnové dĺžky a naopak pre dlhé vlnové dĺžky, ktoré sa šíria pomalšie je oneskorenie menšie. Po týchto odrazoch v FBG je na cirkulátore pulz opäť bez chromatickej disperzie [23]. Princíp FBG je znázornený na Obrázku 3.5 [52].



Obrázok 3.5: Princíp kompenzácie pomocou FBG

Odrazená vlnová dĺžka je nazývaná Braggovská (λ_B) a je definovaná vzťahom:

$$\lambda_B = 2 \times n_{eff} \times \Lambda, \quad (3.2)$$

kde n_{eff} je efektívny index lomu mriežky v jadre vlákna a Λ je perióda mriežky [24].

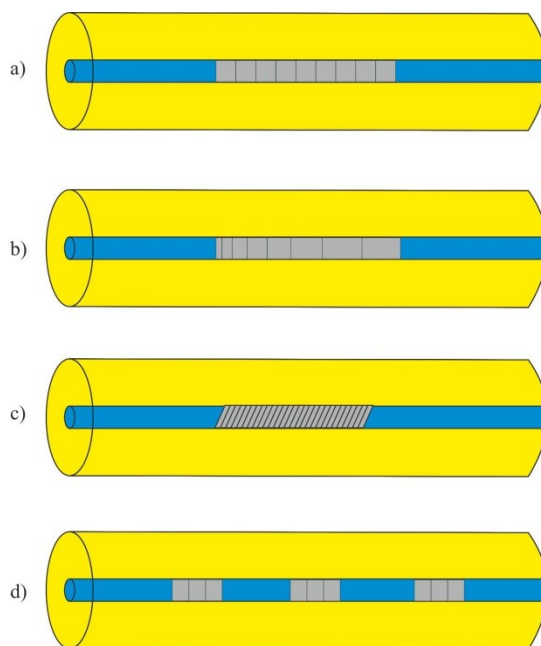
Štruktúra FBG sa môže meniť prostredníctvom indexu lomu alebo periódy mriežky. Perióda mriežky môže byť uniformná alebo gradientná. Profil indexu lomu má dve základné

charakteristiky a to profil indexu lomu a offset. Typický profil indexu lomu môže byť uniformný alebo apodizovaný. Offset indexu lomu je buď nulový alebo pozitívny [24].

Na základe periódy mriežky vlákna FBG možno rozdeliť na štyri typy [24]:

- uniformné,
- čirpované,
- naklonené,
- superštruktúrne.

Uniformné majú mriežkovanie v pevnom intervale teda zmena indexu lomu je konštantná a tak isto aj perióda zmien. Čirpované mriežky predstavujú najčastejší typ použitý pre kompenzáciu chromatickej disperzie v telekomunikačných aplikáciách. Pri týchto mriežkach sa perióda mení monotónne. Naklonené braggovské mriežky vyvážujú svetlo vedené v jadre do odrazov alebo do vyžiarených módov prípadne do módov vedených v plášti. Superštruktúrne tiež nazývané vzorkované FBG je kombináciou skupín mriežok v superštruktúre a prázdnych miest. Tieto jednotlivé typy sú zobrazené na Obrázku 3.6.



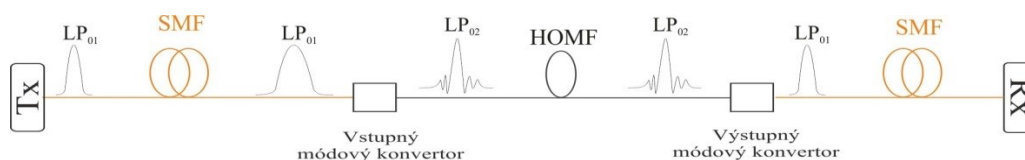
Obrázok 3.6: Typy mriežkovania: a) uniformné, b) čirpované, c) naklonené, d) superštruktúrne

FBG sa používa v dvoch konfiguráciách a to ako pre-kompenzácia kde je FBG modul zaradený na začiatku vlákna optickej siete a pred zosilňovačom a ako post-kompenzácia kde je vložený na koniec trasy a pred zosilňovač [23]. Hlavná výhoda FBG je že majú nízke vložné straty a aj cenu. Vložné straty pri moduloch s FBG sú od 3 dB do 4 dB [24]. Oproti DCF kde

vložný útlm rastie lineárne s dĺžkou vlákna trasy majú výhodu že vložný útlm je takmer konštantný po celej dĺžke vlákna. Vďaka flexibilnému mriežkovaniu môže byť charakteristika čirpovania jednoducho vybraná podľa špecifikácie vlákna. Čo predstavuje napríklad úroveň disperzie a disperzný sklon podľa ktorých sa zvolí presný kompenzátor FBG na každý typ optického vlákna. Ďalšou výhodou oproti DCF je že tolerujú vysoké optické výkony bez akýchkoľvek strát spôsobených nelineárnymi efektmi. FBG moduly môžu byť sústredené na jednom mieste v trase čo predstavuje menší počet kompenzačných miest a tak isto menej zosilňovačov v trase [24].

3.1.4 Kompenzácia HOM

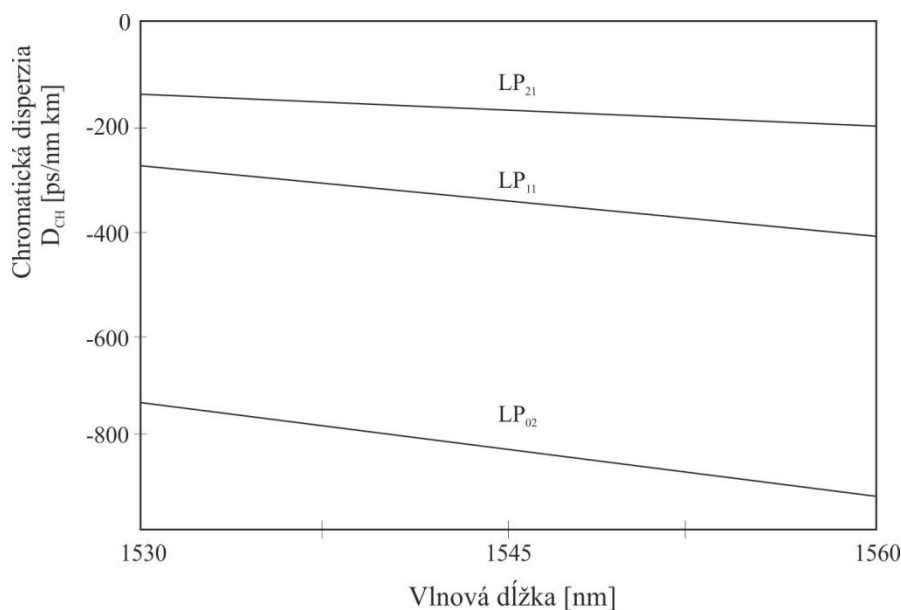
Kompenzácia pomocou HOM (higher-order-mode) vlákien je v porovnaní s DCF vlákнами efektívnejšia. Koeficient chromatickej disperzie je pri HOM o približne trikrát väčší ako pri DCF. Tieto vlákna majú dostatočný záporný sklon disperznej charakteristiky pre kompenzácie konvenčných vlákien alebo vlákien s nenulovou disperziou. Vyššie módy ako LP_{11} a LP_{02} majú oproti základnému módu LP_{01} väčšie koeficienty chromatickej disperzie [15][18]. Na Obrázku 3.7 je zobrazená kompenzácia chromatickej disperzie pomocou HOM.



Obrázok 3.7: Kompenzácia pomocou HOM [26], [15]

Optický pulz z vysielача sa v dôsledku chromatickej disperzie rozširuje pozdĺž optického vlákna, kde je svetlo vedené v základnom LP_{01} móde. Táto disperzia je kompenzovaná pomocou HOM modulu, ktorý sa skladá zo vstupného a výstupného módového konvertora a vlákna s vyšším módom. Na vstupnom módovom konvertore základný mód LP_{01} je prevedený na HOM, ako napríklad na LP_{11} alebo LP_{02} módy. Tieto vyššie módy prechádzajú cez vlákno HOM (HOMF) kde budú mať výrazne negatívnu disperziu a disperzný sklon a tým vykompenzujú chromatickú disperziu nahromadenú v predchádzajúcom jednomódovom vlákne. Po tejto kompenzácii sa na výstupnom konvertore prevedú HOM na základný mód ktorý sa šíri v štandardnom optickom vlákne.

Obrázok 3.8 zobrazuje koeficient chromatickej disperzie pre vyššie módy v závislosti na vlnovej dĺžke. Ako je možné vidieť hodnota zápornej disperzie je pri vyšších módoch niekoľkonásobne vyššia ako pri základnom móde LP_{01} kde dosahuje -70 až -100 ps/nm × km [26].



Obrázok 3.8: Porovnanie závislosti disperzie na vlnovej dĺžke pri vyšších módoch

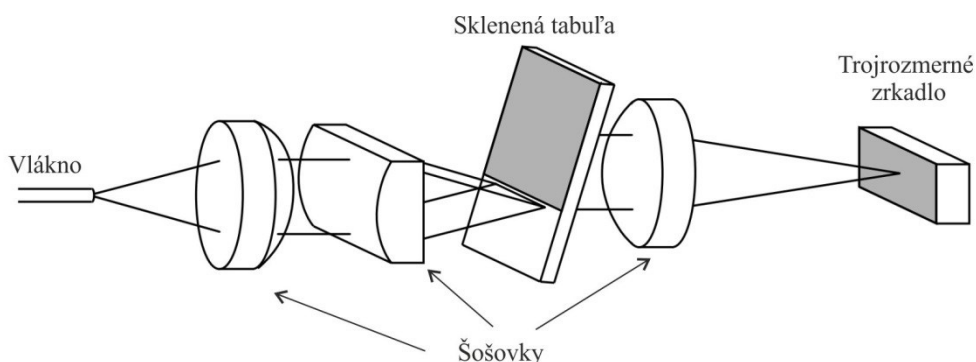
Nevýhodou tohto typu kompenzácie je že kompenzačné moduly vyžadujú diskkrétne konvertory pre prístup k módom vyšších rádov, ktoré môžu zvyšovať straty a náklady. Okrem toho HOM vlákna sú viac módové, takže tu môže vznikáť módová disperzia [26].

3.1.5 Kompenzácia pomocou optickej fázovej konjugácie

Optická fázová konjugácia (OPC) sa používa ako všeobecný pojem pre veľké množstvo nelineárnych optických procesov. Spoločným znakom je že pre všetky tieto procesy sú schopné otočiť smer šírenia a fázu pre každú rovinnú vlnu ľubovoľného vstupného lúča svetla. To znamená že fázový konjugátor je akýmsi typom zrkadla s veľmi neobvyklými odrazovými vlastnosťami. Na rozdiel od konvenčného zrkadla, kde sa lúč odráža na základe zákona odrazu, zrkadlo fázového konjugátora odráža všetky prichádzajúce lúče naspäť na pôvodnú cestu. Fázové konjugáčné zrkadlo mení znamienko vlnového vektora tak, že odrazený lúč je vždy antiparalelný k dopadajúcemu lúču nezávisle na orientácii povrchu zrkadla. OPC sa umiestňuje v strede trasy kde obracia spektrum a to tak že dlhé vlnové dĺžky zmení na krátke vlnové dĺžky a naopak. Ak je teda spektrum obrátene v strede trasy, spektrum v druhej časti trasy pôsobí v opačnom smere. Keď pulz dorazí do OPC je prestavený presne pre kompenzovanie druhej časti trasy. Nevýhodou OPC bol v minulosti nízky výkon pumpy pracujúcej v širokej šírke pásma. Tieto technické problémy a neschopnosť kompenzácie disperzného sklonu boli nevýhodné v porovnaní s ostatnými kompenzáciami. V súčasnosti sa však výkon optických fázových konjugátorov zlepšil. Optická fázová konjugácia zaznamenala pokrok v aplikáciách na 40 Gbit/s prenosoch, kde je účinná pri kompenzácií nelinearity. S využitím DCF vlákien môžu pracovať spoločne na kompenzácií kde sa ich funkcie vzájomne dopĺňajú [27].

3.1.6 Kompenzácia virtuálnym zobrazovacím fázovým poľom VIPA

Virtuálne zobrazovacie fázové pole (VIPA) je optická štruktúra kde vlnová dĺžka závisí na uhle výstupného lúča. VIPA disperzný kompenzátor (Obrázok 3.9) využíva trojrozmerné zrkadlo cez ktoré svetelný lúč putuje zo vstupného vlákna a následne po prejení zrkadlom sa do neho opäť vracia. V princípe je vo VIPA vstupný lúč z vlákna zameraný pomocou polkruhových šošoviek na sklenenú doštičku. Následne takýto zaostrený lúč vystupuje zo zadnej strany doštičky pod uhlom ktorí sa mení v závislosti na zmenách vlnovej dĺžky dopadajúceho lúča na sklenenú doštičku [28].



Obrázok 3.9: Schéma VIPA kompenzátora [28]

Pri kompenzovaní sa svetlo vystupujúce z druhej strany VIPA zameria pomocou šošoviek na trojrozmerné zrkadlo a následne sa vracia naspäť cez túto zaostrovaciu šošovku do VIPA. Vzhľadom k tomu je svetlo vracané do VIPA presne v opačnom smere šírenia pre každú vlnovú dĺžku a je naviazané naspäť do vlákna. Toto výstupné svetlo z kompenzátora je oddelené od vstupujúceho optickým cirkulátorom. Disperzia vzniknutá na trase sa teda vykompenzuje zápornou disperziou na VIPA kompenzátore [28].

Kompenzátory VIPA sa používajú v konfiguráciách, kde sú umiestňované na konci trasy. Veľkou výhodou tejto metódy je že pracuje pre mnoho WDM kanálov súčasne. Vložné straty tohto kompenzátora sú okolo 8 dB [28].

3.2 Metódy kompenzácie polarizačne módovej disperzie

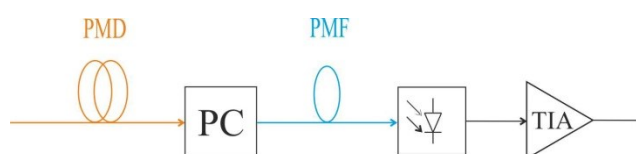
Náhodný charakter vzniku PMD vyžaduje dynamické metódy kompenzácie. PMD nemožno úplne kompenzovať, ale len znížiť. Pre zníženie efektu PMD boli navrhnuté spôsoby ako kódovanie FEC (Forward Error Correction) a redundancia vlnových dĺžok v optických sieťach WDM. Ďalšiu možnosť zníženia PMD predstavuje použitie pokročilých modulačných formátov popísaných v kapitole 4. Priama kompenzácia PMD efektu je často vyžadovaná buď nezávisle alebo v spojení s redundantnými schémami. Rôzne kompenzačné metódy možno rozdeliť do rôznych kategórií v závislosti na spôsobe vykonávania kompenzácie. Tieto spôsoby predstavujú optickú, elektronickú a optoelektronickú kompenzáciu [29]. Ďalšie rozdelenie môže

byť na základe toho, kde na trase sa kompenzácia vykoná. Teda na začiatku trasy kde sa jedná o pre-kompenzáciu alebo na konci trasy v prípade post-kompenzácie.

V tejto podkapitole je popísaná optická a optoelektronická kompenzácia. Elektronická kompenzácia PMD je uvedená v kapitole 3.3.

3.2.1 Optická kompenzácia PMD

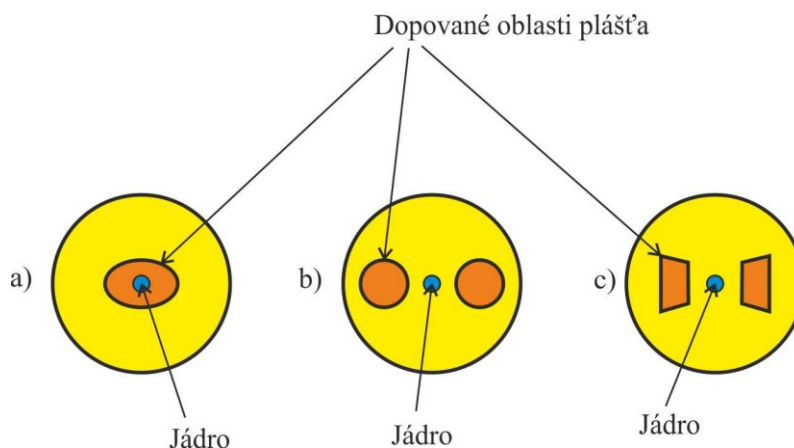
Optický kompenzátor musí byť prispôsobivý a reagovať na dynamickú povahu PMD. Jeden z najbežnejších optických PMD kompenzátorov vyžaduje polarizačný riadič (PC) a určitú dĺžku vlákna so zachovávajúcou polarizáciou (PMF). Takýto optický kompenzátor je zobrazený na Obrázku 3.10.



Obrázok 3.10: Architektúra optického PMD kompenzátoru

Polarizačný riadič sa využíva na vyrovnanie polarizácie svetelného signálu tak, že je zarovnaný s hlavnými stavmi polarizácie PMF vlákna. Vláknó PMF je zámerné vyrobené tak aby malo síce veľký ale kontrolovaný dvojlom. Preto môže byť použité na vytvorenie určitého množstva DGD. Týmto spôsobom sa môže znížiť celkové DGD a to tak, že výkon v rýchlom stave polarizácie (SOP) môže byť oneskorený o hodnotu rovnú DGD vo vlákne PMF. V prípade zložitejších kompenzátorov možno nahradiť pevnú dĺžku PMF vlákna premenlivým oneskorením. Takéto oneskorenie má za následok vyrušenie akéhokoľvek množstva DGD v trase. Ďalšou možnosťou je použitie viacerých blokov s polarizačným riadičom a PMF vláknom pre zvýšenie presnosti kompenzácie [29].

PMF vlákna majú pri výrobe zavedené do plášťa vnútorné napätové komponenty. Tie pôsobia definovaným symetrickým mechanickým napätím na jadro vlákna s kruhovým prierezom. Komponenty sú tvorené dopovaním určenej oblasti plášťa atómami istých prvkov, čo má za následok vznik oblastí s rozdielnym tepelným expanzným koeficientom. Po ochladení ťahaného vlákna vznikne latentné mechanické napätie pôsobiace na jadro a spôsobujúce jeho anizotropiu. Takto dopované oblasti plášťa majú rôzne tvary (Obrázok 3.11). Lineárne polarizovaná vlna s polarizáciou v smere jednej z osí PMF sa šíri bez zmeny stavu. Vplyv latentného lineárneho dvojlomu citlivého na ohyb a teplotu je prevýšený zavedeným dvojlomom, ktorý je na tieto vplyvy citlivý minimálne [53].

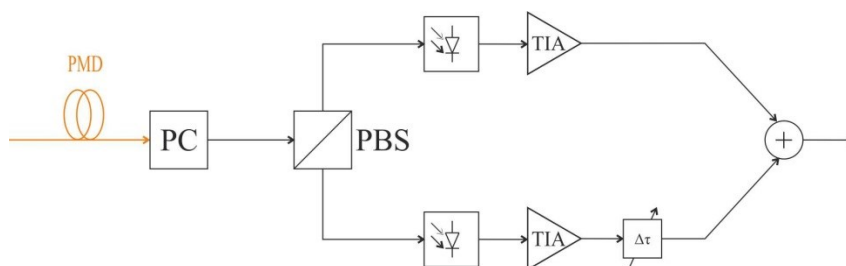


Obrázok 3.11: Profily PMF vlákien: a) eliptický vnútorný obal jadra, b) typ PANDA, c) typ Bow-tie

Nevýhodou optickej kompenzácie sú pomerne drahé a objemné optické komponenty. Tak isto musia byť kompenzátory adaptívne, čo nie je ľahké dosiahnuť v optickej oblasti vzhľadom k relatívnemu nedostatku flexibility optických komponentov [29].

3.2.2 Optoelektronická kompenzácia PMD

Kompenzácia PMD je možná aj spojením optickej a elektronickej oblasti. V optoelektronickej kompenzácii (Obrázok 3.12) je optický signál privedený do polarizačného riadiča z ktorého ďalej vedie do polarizačného rozdeľovača lúčov (PBS). Tu sa rozdelí na dve polarizačné roviny z ktorých každá je prevedená separátne na elektrický signál pomocou fotodiódy a transimpedančného zosilňovača. Elektrický signál odpovedajúci svetlu v rýchlom stave polarizácie je následne oneskorený o interval rovný DGD. Tieto dva signály sú nakoniec znova spojené do formy prijímaného signálu, ktorý je bez PMD [29].



Obrázok 3.12: Architektúra optoelektronického PMD kompenzátora

Optoelektronická kompenzácia predstavuje výhodu najmä v prevedení niektorých kompenzačných prvkov z optickej do elektrickej oblasti čo zvyšuje úroveň integrácie.

Nevýhodu ešte stále ale predstavuje použitie optických prvkov ako PBS a PC. Väčšiu integráciu predstavuje použitie elektronickej kompenzácie [29].

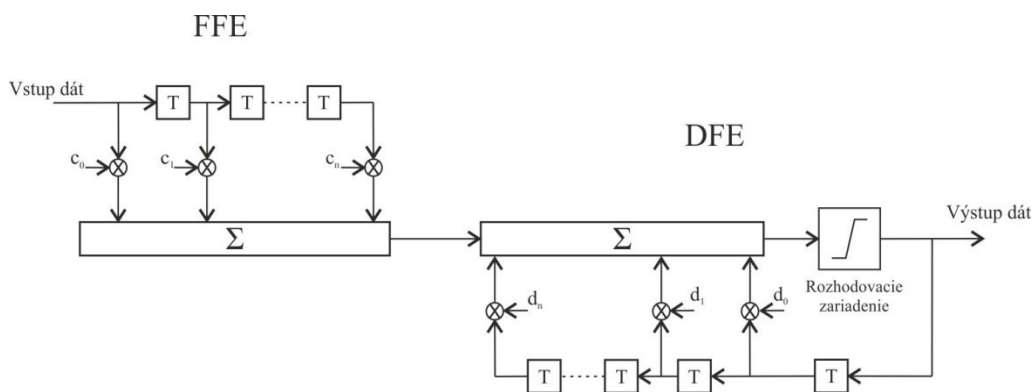
3.3 Elektronická kompenzácia CD a PMD

Pokrok v oblasti vysokorychlostnej digitálnej elektroniky oživil záujem o pokročilé digitálne spracovanie signálu pre komunikáciu s využitím optických vlákien. V súčasnosti sa využívajú dve odlišné metódy implementácie spracovania signálu a to [30]:

- elektronické ekvalizovanie (EE),
- najpravdepodobnejší odhad postupnosti symbolov (MLSE).

3.3.1 Elektronické ekvalizovanie

Elektronické ekvalizovanie je založené na ekvalizére so spätnou väzbou DFE (Decision Feedback Equalizer) a na lineárnom ekvalizére FFE (Feed Forward Equalizer). Práve FFE a DFE boli prvé analógové spracovacie štruktúry, ktoré boli pôvodne realizované pre prenos na 10 Gbit/s a neskôr preukázané aj na 40 Gbit/s [31]. Tieto ekvalizéry sú tvorené štruktúrou oneskorovacích členov a násobičiek. Majú za úlohu nastaviť hodnoty násobičiek tak, aby čo najlepšie odpovedali odhadovanej postupnosti symbolov. Pri DFE sa pre nastavenie používa spätná väzba vo forme sledovania tvaru oka rozhodnutia alebo súvisejúcej hodnoty Q faktoru [32]. Kombinácia FFE a DFE predstavuje vďaka svojmu pomerne jednoduchému operačnému princípu atraktívnu štruktúru ekvalizéra. Lineárna štruktúra FFE je schopná kompenzovať strednú polarizačne módovú disperziu, pričom ďalšie spätné členy DFE môžu kompenzovať vyššie PMD a aj chromatickú disperziu [31].

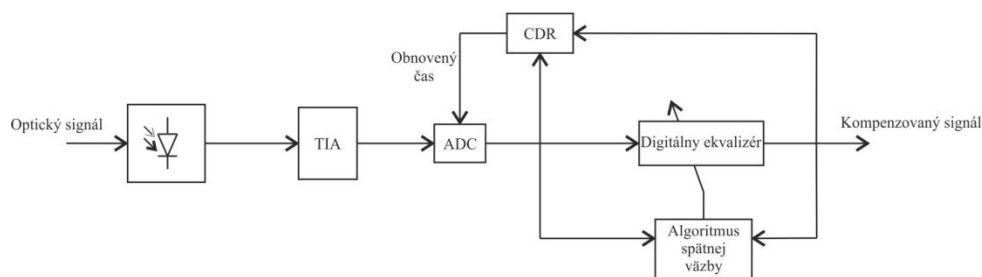


Obrázok 3.13: Štruktúra FFE a DFE ekvalizérov

Na Obrázku 3.13 je znázornená kombinácia analógových ekvalizérov FFE a DFE. Výstupné napätie signálu z transimpedančného zosilňovača (TIA) je privedené na dátový vstup FFE, ktorý vykonáva kompenzáciu disperzie pre skreslený napäťový signál. Signál je tu oneskorený jednotlivými oneskorovacími členmi trasy. Oneskorený signál je potom posudzovaný koeficientmi členov a sčítaný s ostatnými. Výstup z FFE je vedený na ďalšie

kompenzovanie do DFE bloku. Kompenzovaný signál je následne privedený do bloku pre obnovu časovania dát (CDR). DFE je nelineárny, pretože výstup rozhodovacej úrovne ekvalizéra je spätnými väzbami privedený na jeho vstup. Sekcia spätnej väzby odstráni oneskorené intersymbolové interferencie, ktoré sú mimo dosahu prednej časti. DFE nezvyšuje šum, avšak trpí problémom šírenia chýb, pretože pevná rozhodovacia úroveň môže zničiť informáciu. To nastane tak, že ak sa raz vykoná zle rozhodnutie, chyby sa vracajú späť na vstup ekvalizéra a to vedie k vyššej pravdepodobnosti výskytu chyby v následných rozhodnutiach. Konečným výsledkom je potom zhluk chýb. Každý systém so spätnou väzbou zahŕňa analýzu stability, zatiaľ čo lineárny FFE je vždy stabilný [33].

Výkon analógového elektronického ekvalizéra je obmedzený linearitou obvodu a šírkou pásma. Obvod ekvalizéra by mal mať minimálne skupinové oneskorenie aby sa minimalizovala disperzia spôsobená ekvalizérom. Ekvalizér sám o sebe môže byť implementovaný pre vysoko rýchlostné aplikácie, ale obvody spätnej väzby nemôžu fungovať pri rýchlosti prenosu dát, pretože zložité výpočty musia byť vykonané v jednom hodinovom cykle. Keďže vláknová disperzia je proces buď časovo invariantný (CD) alebo pomaly časovo variantný (PMD), obvody spätnej väzby potrebujú len pracovať na oveľa pomalších frekvenciách než je prenosová rýchlosť. Vstup do spätnoväzobného bloku môže byť nahromadeným priemerom dát. Koeficienty členov ekvalizéra sú preto aktualizované na oveľa pomalšej frekvencii. Alternatívny prístup je vzorkovať vstupný signál s použitím vysokorýchlostného analogovo-digitálneho prevodníka (ADC). Takže všetky vyrovnávania, opravy chýb a algoritmy spätnej väzby môžu byť vykonávané digitálne v rámci DSP čo poskytuje presnejší a vyšší výkon [33]. Digitálny ekvalizér je na Obrázku 3.14.



Obrázok 3.14: Digitálny elektronický ekvalizér [33]

Pre digitálne spracovanie signálov boli vyvinuté rôzne adaptívne algoritmy. Medzi najčastejšie používané a výpočtovo jednoduché adaptívne ekvalizačné algoritmy patrí metóda najmenších štvorcov LMS (Least Mean Square) a algoritmus CMA (Constant Modulus Algorithm). Pri LMS je výstup z bloku ekvalizéra porovnaný s referenčným signálom v prípade tréningového módu alebo je prijaté rozhodnutie na výstupe v prípade rozhodovacieho módu. Pri rozhodovacom móde je počítačové nastavenie koeficientov určené tréningovým módom a aktualizácia koeficientov nastáva pri zmene parametrov prenosovej cesty. LMS je jednoduchý a môže byť implementovaný pre FFE a DFE ekvalizéry [33], [34].

CMA algoritmus je na druhej strane slepá adaptačná technika v ktorej ekvalizér konverguje na kanálovú impulznú odozvu minimalizovaním chýb medzi výstupom ekvalizéra a konštantnou hodnotou amplitúdy. CMA predpokladá, že prenášaný signál má konštantnú amplitúdu a akákoľvek zmena prijímanej amplitúdy signálu predstavuje zhoršenie kanála. Výstupná fáza signálu z CMA nie je zhodná s fázou vysielaného signálu. CMA upravuje iba amplitúdu [33], [34].

3.3.2 MLSE

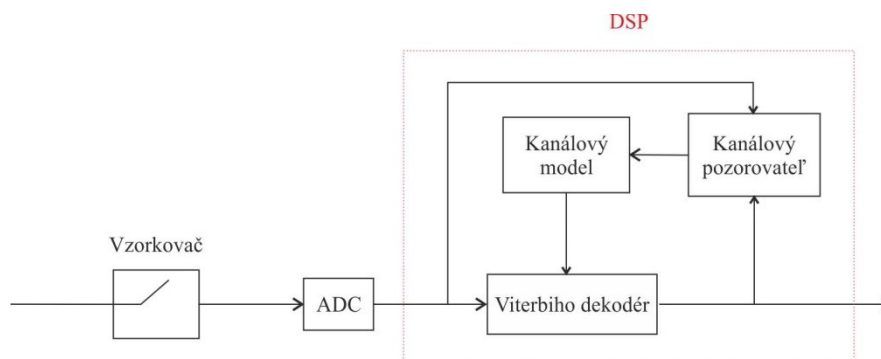
Technika najpravdepodobnejšieho odhadu postupnosti symbolov (MLSE) je dobre známou v komunikáciách pre ekvalizáciu a detekciu prenášaných digitálnych signálov. Dosahuje optimálnu detekciu tým, že hľadá najpravdepodobnejšiu bitovú sekvenciu tvorenú skreslenými bitmi. Matematicky možno kritérium MLSE vyjadriť ako:

$$d = \arg \max \{p(r|s)\} \quad s \in S, \quad (3.3)$$

kde d je rozhodovací symbol sekvencie, s je jeden z možných vyslaných symbolov sekvencie, S je množina všetkých možných vyslaných symbolových sekvencií, r je prijímaný signál a $p(r|s)$ je funkcia hustoty pravdepodobnosti prijímaného signálu podmienená vyslaným symbolom sekvencie s .

Rozhodovacie kritérium znamená, že MLSE nie je prispôbené na konkrétne skreslenie ale je optimalizované pre akýkoľvek skreslený optický signál detegovaný fotodiódou za predpokladu že intersymbolová interferencia nepresahuje $N+1$ symbolu s každou periódou. N predstavuje maximálny počet stavov braných do úvahy v MLSE [35].

Implementácia s využitím Viterbiho algoritmu je účinná realizácia MLSE schémy. Model Viterbiho algoritmu prenáša symbolovú sekvenciu ako stavovú sekvenciu v ktorej je stav v čase n rovný $L, L+1$ až 1 kde L je pamäť kanála. A ďalej aj ako sekvenciu stavov v ktorej nie sú možné všetky prechody medzi ktorýmkoľvek dvoma párami stavov. Preto nemožno rozhodnúť, ktorá stavová sekvencia zodpovedá maximálnej pravdepodobnosti alebo má maximálnu metriku až pokiaľ nie sú prijaté všetky symboly. Avšak, keď sa použije algoritmus, je možné preskočiť stavovú sekvenciu pri ktorej je už na základe prijatých symbolov (ale nie všetkých) určite jasné, že neobsahuje maximálnu metriku [35].



Obrázok 3.15: Architektúra MLSE prijímača [35]

Princíp architektúry prijímača MLSE je zobrazený na Obrázku 3.15. Je zložený z analógovo-digitálneho prevodníka (ADC), obnovy časovania (CR) a digitálneho spracovania signálu (DSP) ktorý vykonáva Viterbiho algoritmus. Softwarový modul v DSP obsahuje Viterbiho detektor, kanálový model (CM) a kanálový pozorovateľ (CO). Kanálový pozorovateľ sleduje rozhodovací výstup kanálu k stanoveniu metriky. Metrika je použitá vo Viterbiho procesore v dvoch smeroch. V prvom smere je parametrický kanálový pozorovateľ, ktorý odhaduje parametre uzatvorenej formy aproximácie k relevantným dátam metriky závislej na amplitúdovej distribúcií. V druhom smere využíva neparametrický pozorovateľ empirický podmienený amplitúdový histogram.

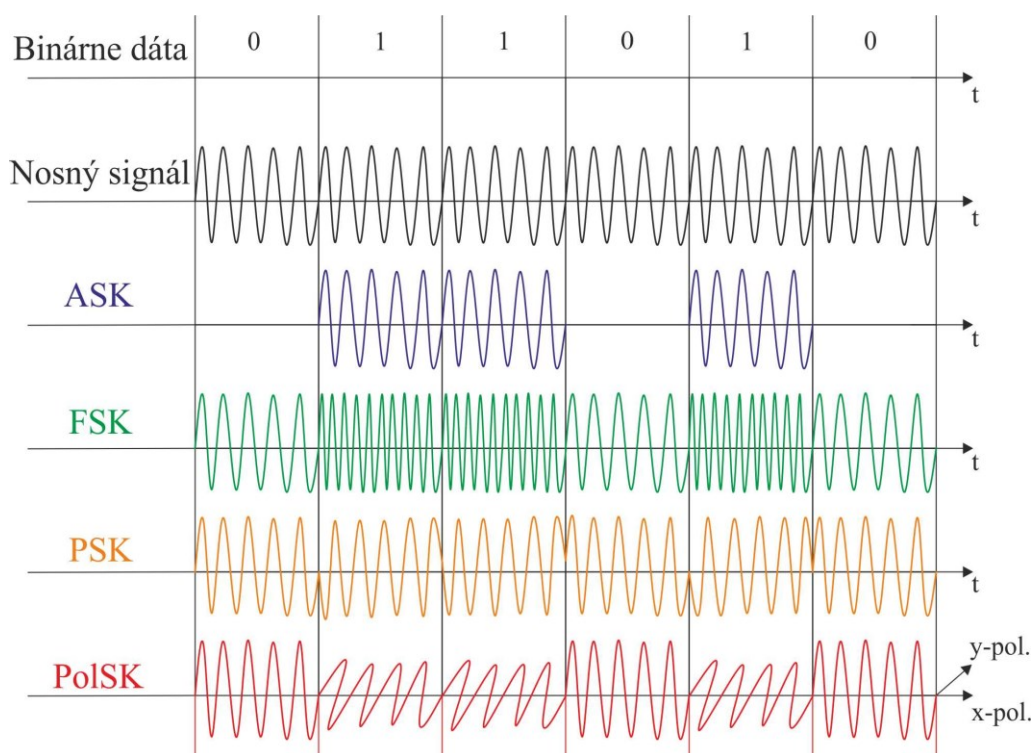
Voľba architektúry je ovplyvnená kompromisom medzi zlepšením výkonu, zložitou a cenou. Najdôležitejšou voľbou v súvislosti s prípustnou pamäťou kanálu je počet mriežkových stavov vo Viterbiho detektore. Okrem toho musí byť brané do úvahy obnovenie časovania rovnako ako aj ADC rozlíšenie a numerické riešenie [35].

4 Modulačné formáty

4.1 Modulačné techniky

Optický signál v komunikačných systémoch môže byť generovaný rôznymi modulačnými technikami. Pre optický prenos informácií sa môžu modulovať štyri základné fyzikálne atribúty a to: intenzita, fáza, frekvencia a polarizácia [27]. Na základe toho, ktorý parameter signálu je modulovaný, možno modulačné techniky rozdeliť na:

- kľúčovanie amplitúdovým posuvom (ASK),
- kľúčovanie frekvenčným posuvom (FSK),
- kľúčovanie fázovým posuvom (PSK),
- kľúčovanie polarizačným posuvom (PolSK).



Obrázok 4.1: Princíp optických modulačných techník

4.1.1 Kľúčovanie amplitúdovým posuvom ASK

Kľúčovanie amplitúdovým posuvom (ASK) tiež známe ako On-Off Keying (OOK) je technika modulovania intenzity nosného signálu. V najjednoduchšej forme sa zdroj prepína medzi zapnutým a vypnutým stavom. ASK modulácia je charakterizovaná vzťahom medzi úrovňami signálu v On-Off stavoch nazývaný extinkčný pomer ER (Extinction Ratio). Táto hodnota ER je závislá od použitého spôsobu generovania signálu (priama alebo externá

modulácia). Pri externej modulácii je ER limitovaný externým modulátorom. Hodnoty ER sa pohybujú typicky medzi 8 dB až 12 dB v závislosti na použitej prenosovej rýchlosti. Modulačné formáty na báze ASK sa vyznačujú jednoduchým generovaním a detekciou signálu. Vďaka tomu sú v súčasnosti najviac nasadené v optických prenosových systémoch. Použitím rozdielnych modulačných metód pre generovanie týchto formátov sa líšia spektrálne charakteristiky, tvary signálu, ktoré spôsobujú odlišné chovanie prenosového systému [27].

4.1.2 Kľúčovanie frekvenčným posuvom FSK

FSK je realizované prepínaním frekvencie svetelného signálu medzi dvoma hodnotami. V FSK sa obálka optického signálu nemení a zložitost' generovania a detekcie signálu sa zväčšuje v porovnaní s ASK moduláciou. FSK modulácia je charakteristická modulačným indexom. Na základe zmeny modulačného indexu môžu byť realizované rôzne modulačné formáty na báze FSK. Rozdiely medzi FSK formátmi sa odrážajú v optickom spektre signálu, pričom menší modulačný index umožňuje kompaktnjšie optické spektrum. Formáty na báze FSK sa nepoužívajú v už nasadených prenosových systémoch. V poslednej dobe FSK modulácie, známe ako disperziu podporujúci prenos DST (Dispersion Supported Transmission), boli skúmané pre realizáciu v metropolitných optických sieťach. Hlavnou nevýhodou tejto techniky je, že parametre vysielateľa a prijímateľa musia presne zodpovedať vlastnostiam trasy a vyžadujú detailnú charakteristiku disperzie v celej optickej trase [27].

4.1.3 Kľúčovanie fázovým posuvom PSK

Kľúčovanie fázovým posuvom PSK využíva fázu signálu na zakódovanie informácií. Optické PSK signály majú úzke spektrum a konštantnú obálku signálu. To umožňuje lepšiu nelineárnu toleranciu, ale na druhej strane PSK signály sú citlivé na fázovú moduláciu vyvolanú viacanálovými efektmi, ktoré môžu viesť k chybnému dekódovaniu na strane prijímateľa. Avšak v porovnaní s ASK formátmi umožňuje lepšiu citlivosť prijímateľa až o 6 dB. Špeciálnou metódou PSK modulácie je diferenciálna PSK (DPSK) modulácia. V DPSK signáloch je informácia kódovaná vo fázovej zmene dvoch po sebe idúcich bitoch. Čistá PSK modulácia je skôr nepoužiteľná pre systémovú implementáciu, ale niektoré špeciálne binárne a viacúrovňové varianty PSK ako DPSK a DQPSK umožňujú použitie priamych detekčných metód. DQPSK umožňuje ďalšie zlepšenie účinnosti kódovania pomocou štyroch odlišných fáz, kde je symbolová rýchlosť polovičná v porovnaní v DPSK. Aj napriek značnej zložitosti PSK modulácií sú DPSK a DQPSK dobré alternatívy pre ASK modulácie vo vysokorýchlostných WDM systémoch [27].

4.1.4 Kľúčovanie polarizačným posuvom PolSK

Optické signály s využitím kľúčovania polarizačným posuvom (PolSK) sú generované prepínaním polarizácie signálu medzi dvoma ortogonálnymi zložkami polarizácie. PolSK sa vyznačuje konštantnou obálkou signálu, ktorá umožňuje zlepšenú nelineárnu toleranciu, lepšiu citlivosť (3 dB) v porovnaní s ASK moduláciou. Umožňuje aj lepšie využitie šírky pásma systému použitím ortogonálnej polarizácie ako ďalší stupeň voľnosti. Nevýhodou tejto

modulačnej techniky je väčšia zložitosť generovania a detekcie signálu ako aj citlivosť na poruchy v prenosovej trase, ktoré sa zvyšujú s prenosovou rýchlosťou kanálu [27].

4.2 Intenzitné modulačné formáty

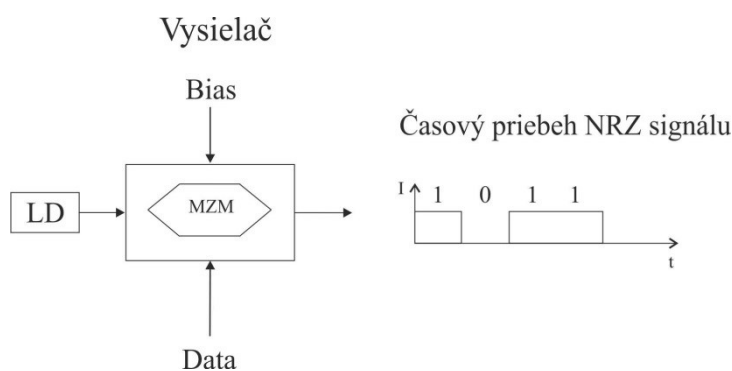
Intenzitné modulačné formáty sú založené na zmene intenzity nosného signálu. Takýto signál je popísaný nasledujúcim vzťahom [19]:

$$S_{ASK}(t) = s_c(t) \times g(t) = S_c \times \cos \omega_c \times t \times g(t), \quad (4.1)$$

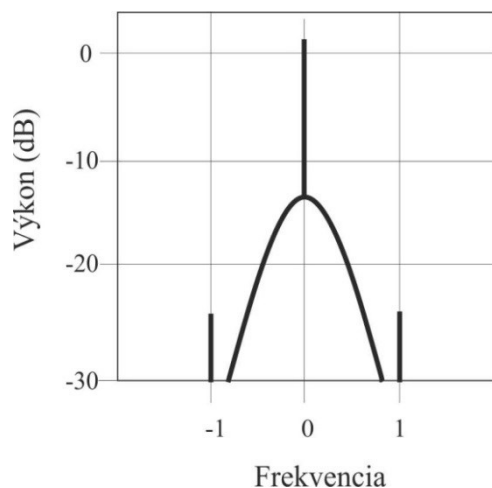
kde S_c je amplitúda, ω_c je uhlová frekvencia nosnej, t je čas a $g(t)$ je obdĺžnikový modulačný signál s hodnotu 1 alebo 0.

4.2.1 Modulačný formát bez návratu k nule NRZ

Tento modulačný formát je najjednoduchší, pulz tu trvá celú bitovú periódu. Väčšina komerčných systémov využíva NRZ. Dôvody pre použitie NRZ v optických komunikáciách sú, že vyžaduje relatívne malú šírku pásma v porovnaní s RZ, nie je citlivý na fázový šum laseru a má úzke spektrum optického signálu. Redukovaná spektrálna šírka zlepšuje disperznú toleranciu, ale má za následok intersymbolovú interferenciu medzi pulzmi. Tento modulačný formát nie je vhodný pre vysoké prenosové rýchlosti a veľké vzdialenosti. Úzke spektrum NRZ (Obrázok 4.3) pulzov prináša lepšiu realizáciu odstupov kanálov v DWDM systémoch. Modulácia sa realizuje priamou moduláciou laseru približne do prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s, alebo externými: Elektro-Absorbčným Modulátorom (EAM), Mach-Zehnder Modulátorom (MZM) Obrázok 4.2. Výhody NRZ sú v jednoduchej konštrukcii vysielača a efektívnej šírky pásma [27]. NRZ modulačný formát sa používa najmä na malých vzdialenostiach a rýchlostiach do 10 Gbit/s, kde je odolnosť proti nelinearitám pomerne dobrá.



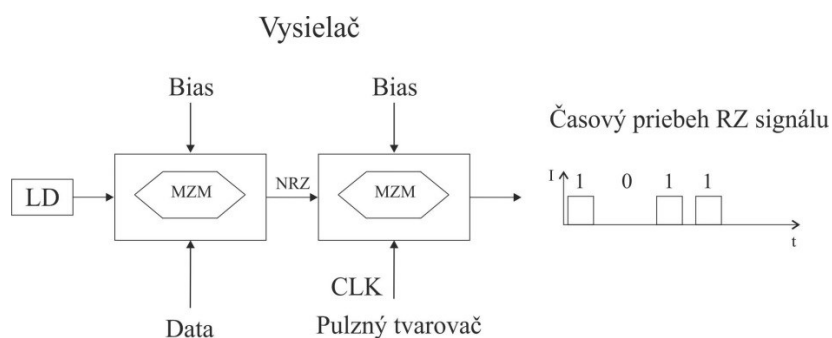
Obrázok 4.2: Bloková schéma NRZ vysielača



Obrázok 4.3: Optické spektrum NRZ modulácie

4.2.2 Modulačný formát s návratom k nule RZ

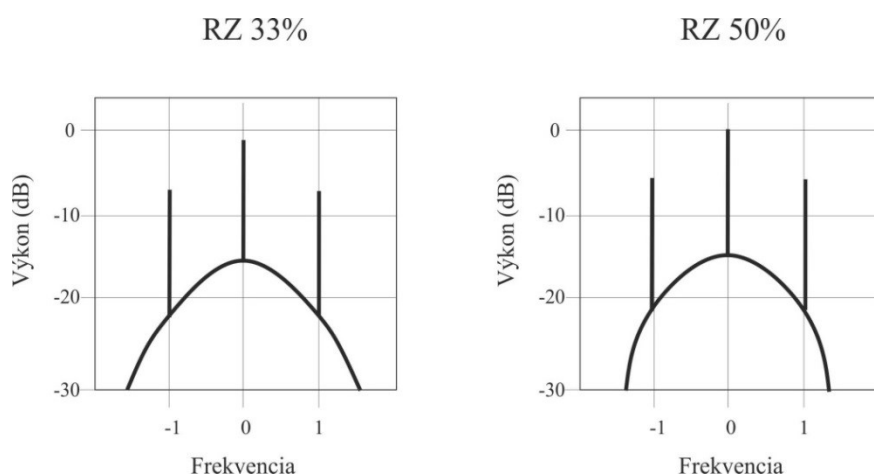
V tomto modulačnom formáte sa energia prenáša len na zlomok bitovej periódy. RZ signál s rovnakým priemerným výkonom ako NRZ signál má spektrum najvyššieho výkonu dvakrát väčšie ako v prípade NRZ pulzu. Hlavnou charakteristikou signálov modulovaných pomocou RZ, je pomerne široké optické spektrum (Obrázok 4.5). Veľká spektrálna šírka ústi k zníženiu disperznej tolerance a znižuje aj spektrálnu účinnosť WDM systémov na báze RZ modulačných formátov. Tvar RZ pulzu umožňuje zvýšenú odolnosť voči nelineárnym efektom vo vlákne a účinkom polarizačne módovej disperzie. Implementácia systémov s RZ zlepšuje citlivosť prijímača až o 3 dB. Nižšia šírka pulzu znamená širšie spektrum signálu čo nemožno plne využiť v prípade DWDM systémoch. Vyšší optický výkon pripadajúci na jeden kanál má využitie vo WDM systémoch, kde vedie k zlepšeniu maximálnej prenosovej dĺžky. RZ modulačné formáty sa používajú pre diaľkové optické komunikácie a vyššie prenosové rýchlosti [27].



Obrázok 4.4: Blokova schéma RZ vysielača

Modulačný formát RZ sa môže realizovať elektronickou formou, kde sa dosahujú rýchlosti okolo 10 Gbit/s alebo pomocou dodatočného modulátora na prenosové rýchlosti 40 Gbit/s a viac. V elektronickej forme sú generované vlny typu RZ priamo namodulované na optickú nosnú. V prípade dodatočného modulátora sa tvarujú NRZ pulzy pulznými tvarovačmi založenými na harmonicky riadených EAM alebo MZM (Obrázok 4.4). Tvarovanie pulzu pre rýchlosti niekoľkých 10 Gbit/s možno pomocou troch metód.

V prvej metóde pri vzniku 50% RZ pulzov je MZM buďením harmonickým signálom s frekvenciou rovnou prenosovej rýchlosti, s rozkmitom medzi minimálnou a maximálnou hodnotou prevodovej charakteristiky MZM, kde stredná hodnota leží uprostred prevodovej charakteristiky. V druhej metóde 33% RZ sa podobne ako v prvej jedná o MZM s tým rozdielom, že harmonický signál má polovičnú frekvenciu ako je prenosová rýchlosť. Rozkmit tu leží medzi oboma minimami prevodovej charakteristiky MZM a stredná hodnota je v maximum prevodovej charakteristiky. V tretom prípade sa jedná o metódu 67% RZ. MZM je buďením harmonickým signálom s polovičnou frekvenciou ako je prenosová rýchlosť s rozkmitom medzi oboma maximami a so strednou hodnotou nachádzajúcou sa v prostrednom minime. Susedné bity bez ohľadu na ich logický stav, majú periodickú zmenu fázy. Tiež sa tato metóda nazýva modulácia RZ s potlačenou nosnou (Carrier Suppressed Return to Zero) [27], [40], [45].



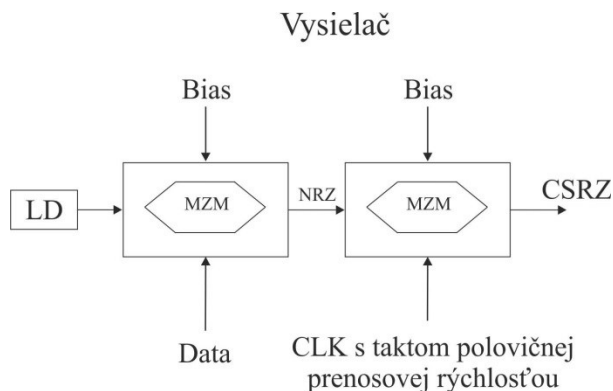
Obrázok 4.5: Optické spektra modulácií RZ 33% a RZ 50 %

4.2.3 Modulačný formát RZ s potlačenou nosnou CSRZ

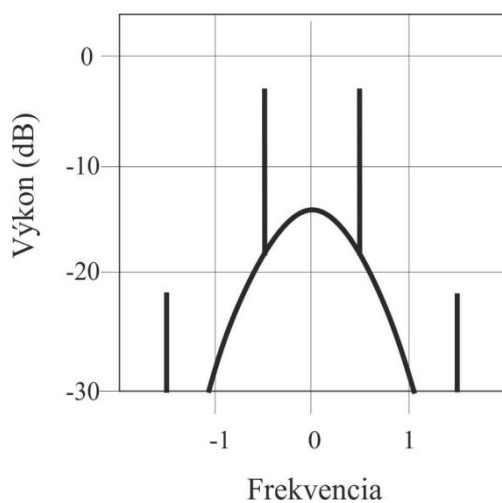
CSRZ je modulačný formát pre vysoko rýchlostne prenosové systémy, ktorého hlavným cieľom je zníženie nelineárnych vplyvov a zlepšenie spektrálnej účinnosti vo vysokorýchlostných WDM systémoch. V porovnaní s RZ moduláciou majú menšiu spektrálnu šírku čo zväčšuje disperznú toleranciu. CSRZ pulzy majú tvar ako RZ s optickým fázovým rozdielom π medzi susednými bitmi. Táto fázová podmienka vo vnútri pulzu môže byť prínosná pre zvýšenie tolerancie na nelineárne efekty vo vlákne. CSRZ je špeciálna forma RZ v ktorom je potlačená nosná. Tento modulačný formát poskytuje lepšiu odolnosť proti

narušeniam prenosu a vylepšená je jeho robustnosť v úzkom pásme, čo je prospešné v DWDM systémoch. V porovnaní s RZ poskytuje aj lepšie parametre v diaľkových WDM systémoch [27], [40].

Na Obrázku 4.6 je zobrazená bloková schéma CSRZ vysielača. V porovnaní s RZ vysielačom je upravený hodinový tak na polovičnú prenosovú rýchlosť.



Obrázok 4.6: Bloková schéma CSRZ vysielača

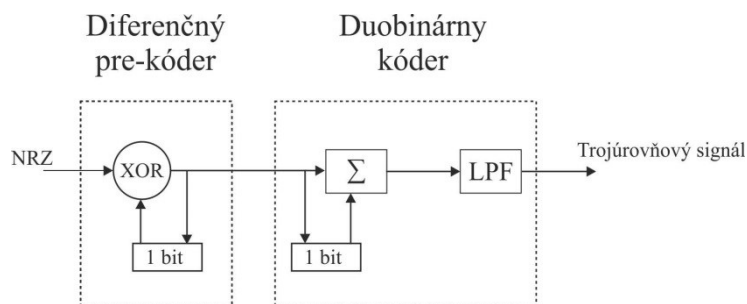


Obrázok 4.7: Optické spektrum CSRZ modulácie

4.2.4 Duobinárny modulačný formát

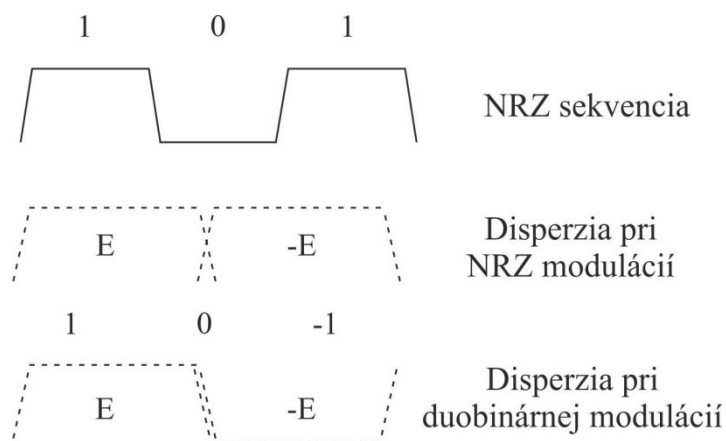
Duobinárna modulácia predstavuje kombináciu konvenčných modulácií na báze ASK a PSK. V závislosti na realizáciu možno chápať optický duobinárny proces ako viacúrovňový prenos s fázovým kódovaním bitov a redukovanou spektrálnou šírkou. Optické spektrum duobinárneho signálu je v porovnaní s ostatnými binárnymi formátmi veľmi stlačené. Duobinárna modulácia je reprezentovaná trojúrovňovým signálom, kde vstupná bitová

sekvencia (1 0 1) je dekódovaná na sekvenciu s opačnými polaritami (+1 0 -1) pomocou diferenčného pre-kódera a duobinárneho kódera (Obrázok 4.8). Takáto dekódovaná sekvencia je ďalej modulovaná pomocou MZM z ktorého výstup je optický signál s intenzitami (1 0 1) so zmenou vo fáze (0 0 π). Optické spektrum duobinárneho signálu je v porovnaní s ostatnými binárnymi formátmi veľmi stlačené [41].



Obrázok 4.8: Optické duobinárne kódovanie

Na Obrázku 4.9 možno vidieť účinok disperzie na NRZ modulačný formát a na duobinárny modulačný formát. Dôležitou vlastnosťou duobinárneho signálu je, že nemôže dôjsť k všetkým možným sekvenciám troch hodnôt. Napríklad NRZ bitová sekvencia 1 0 1 je prevedená do optickej domény ako elektrické pole (E 0 -E) a po zakódovaní dostaneme sekvenciu 1 0 -1 namiesto sekvencie 1 0 1 [42].



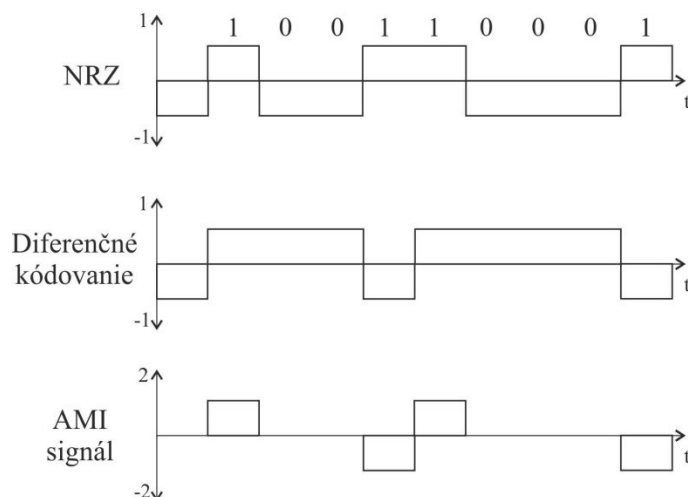
Obrázok 4.9: Vplyv disperzie pri modulácií NRZ a duobinárnej modulácií

Optický duobinárny formát získal veľkú pozornosť najmä vďaka nízkym nákladom pri výrobe a dvojnásobnému zníženiu spektrálnej šírky v porovnaní s NRZ. Duobinárna modulácia zlepšuje toleranciu chromatickej disperzie pri prenosových rýchlostiach vyšších ako 10 Gbit/s. Zníženie spektrálnej šírky pri duobinárnej modulácií je dôvodom lepšej disperznej tolerancie

a umožňuje zároveň zlepšenie spektrálnej účinnosti vo WDM systémoch aj pri 40 Gbit/s. Ďalšou výhodou tejto modulácie je potlačenie efektu nazývaného stimulovaný Brillouin rozptyl (SBS), keďže v optickom duobinárnom spektre je nosná účinne potlačená. Nové modulačné formáty založené na RZ umožňujú realizáciu WDM systémov s hustým kanálovým odstupom a s lepšimi výkonovými prenosmi. Limitujúcim faktorom a nevýhodou je relatívne silný vplyv nelinearit na vlákno, ktoré obmedzujú maximálnu dĺžku a kvalitu prenosu. No aj napriek tomu je duobinárna modulácia vďaka jej veľkej disperznej tolerancii vhodná pre optické metropolitné siete, v ktorých cena komponentov a generovanie signálu v elektrickej oblasti zohrávajú významnú úlohu [27], [45].

4.2.5 Modulačný formát AMI

Alternate Mark Inversion (AMI) je modulačným formátom s čiastočnou odozvou. V optických komunikáciách sa AMI formát implementuje zvyčajne v RZ forme ako RZ-AMI. AMI modulácia môže znížiť pôsobenie nelinearit v optickom vlákne.

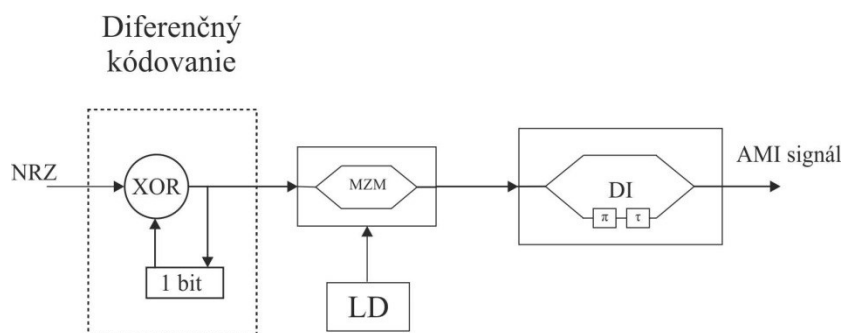


Obrázok 4.10: Priebeh vstupného signálu, diferenčného kódovania a výstupného AMI signálu

Štruktúra vysielača AMI (Obrázok 4.11) najprv generuje binárnu fázovú alebo intenzitnú moduláciu v NRZ forme -1, 1 alebo 0, 1. Potom signál prechádza cez optický oneskorovací a odčítací filter a je implementovaný optickým oneskorovacím interferometrom (DI) s oneskorením menším alebo rovným ako je bitová perióda. Zmenou oneskorenia na DI môžu byť generované rôzne cykly. Z toho dôvodu nie je nutný modulátor s RZ pulzným tvarovačom čo predstavuje výhodu pre tento typ vysielača. Ďalšou výhodou AMI modulačného formátu je potlačenie štvorvlňového zmiešavania pri fázových prechodoch [40].

Existuje aj ďalšia štruktúra vysielača AMI, ktorá je podobná ako pri duobinárnom modulačnom formáte. Odlišuje sa od duobinárneho v použití oneskorovacieho a odčítacieho

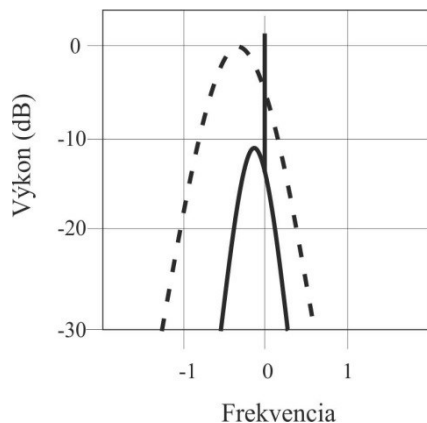
filtra namiesto oneskorovacieho a sčítacieho filtra. A ďalej sa odlišuje od prvej štruktúry vysieláča AMI popísanej vyššie v použití RZ pulzného tvarovača [43].



Obrázok 4.11: Generovanie AMI signálu vo vysieláči

4.2.6 Modulačný formát VSB a SSB

Modulačné formáty s čiastočne potlačeným spektrom VSB a úplne potlačeným spektrom SSB potláčajú svoje spektra pomocou vhodných optických filtrácií. Pri SSB je využitý fakt, že spektrum signálu reálnych hodnôt je v základnom pásme súmerné podľa nulovej frekvencie, kedy obe polovice spektra nesú tú istú informáciu a teda filtrácia prebytočnej polovice spektra nemá za následok stratu informácie. Pri VSB modulácií optický filter potlačí pri nosnom kmitočte významnejšiu časť jedného postranného pásma a zatiaľ v tom istom čase na druhom pásme vykonáva filtrácie. Reálna hodnota obojstranného signálu je tak premenená na komplexnú hodnotu VSB alebo SSB formátu. Aby bolo možné použiť modulačný formát VSB alebo SSB musí byť použitá kvadratická detekcia i po prevedení signálu na VSB alebo SSB. V praxi sa SSB realizuje dosť komplikovane vzhľadom na funkciu elektrického alebo optického filtra. VSB je v tomto smere jednoduchšie [40]. Obrázok 4.12 zobrazuje optické spektrum NRZ VSB modulácie, kde prerušovanou čiarou je znázornený odpovedajúci tvar VSB filtra.



Obrázok 4.12: Optické spektrum modulačného formátu VSB

Vo WDM systémoch je filtrovanie VSB vykonávané buď vo vysielači alebo v prijímači. Vo vysielači môže byť pred alebo v kombinácii s multiplexovaním WDM kanálov, v prijímači po demultiplexovaní alebo jeho kombinácií. Filtrovanie na vysielači zaručuje vysoko spektrálnu účinnosť prenosu WDM a maximálnu spektrálnu kompresiu. Filtrovanie na prijímači poskytuje výhodu v podobe redukcií WDM kanálových presluchov pre požadované postranné pásmo ak sú použité nerovnomerné rozstupy WDM kanálov [40].

4.3 Diferenčné fázové modulačné formáty

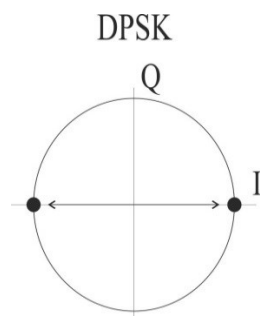
4.3.1 DPSK

Zaujímavou metódou PSK modulácie je diferenciálna PSK modulácia (DPSK). DPSK kóduje informáciu pomocou zmeny fázy medzi dvoma susednými bitmi, kde jednotkové bity predstavujú zmenu fázy o π a nulové bity nepredstavujú žiadnu zmenu fázy. Vysielaný signál pri DPSK sa dá opäť popísať vzťahom [19]:

$$S_{DPSK}(t) = S_c \times \cos \omega_c \times t \times g(t), \quad (4.2)$$

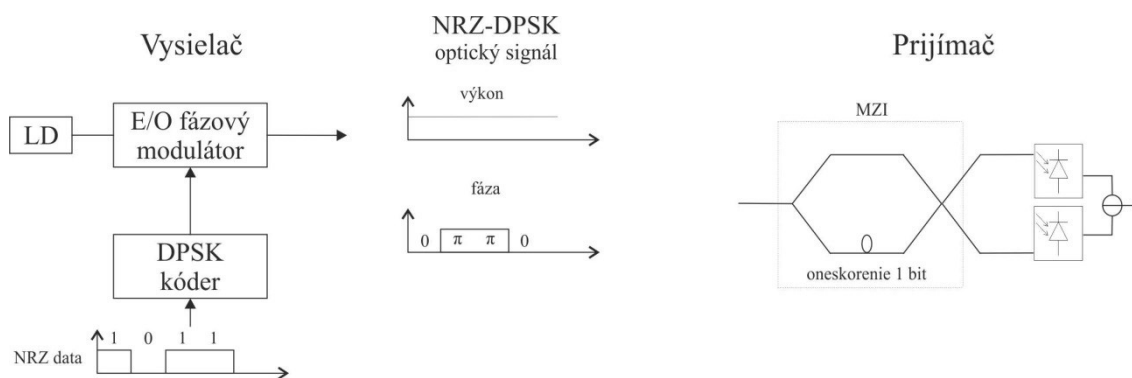
kde S_c je amplitúda, ω_c je uhlová frekvencia nosnej, t je čas a $g(t)$ je obdĺžnikový modulačný signál s hodnotu 1 alebo 0.

DPSK modulácia môže byť implementovaná ako RZ alebo NRZ formát. Medzi výhody tohto formátu možno zaradiť zvýšenú citlivosť na prijímacej strane o 3db v porovnaní s OOK formátmi, keďže signály sú detekované nesúvisle. Limitujúcim faktorom pri DPSK a signáloch kľučovaných fázovým posuvom s optickými zosilňovačmi je nelineárny fázový šum pri veľkých vzdialenostiach. DPSK je citlivý na nelineárny fázový šum, zosilnený spontánny šum (ASE) generovaný optickými zosilňovačmi [40].



Obrázok 4.13: Konštelčný diagram DPSK modulácie

Pri NRZ-DPSK je dátový signál najprv diferenčne zakódovaný vo vysieláči, čo umožňuje zabrániť šíreniu chýb, ktoré môžu nastať diferenčným dekódovaním signálu v prijímači. V DPSK kóderu je NRZ signál kombinovaný s jednobitovým oneskorením pomocou XOR prvku. Takýto signál sa ďalej vstupuje do fázového alebo MZM modulátora, ktorý generuje DPSK optický signál (Obrázok 4.14). Intenzita signálu je v NRZ-DPSK vždy konštantná [44].



Obrázok 4.14: Blokový diagram vysieláča a prijímača NRZ-DPSK

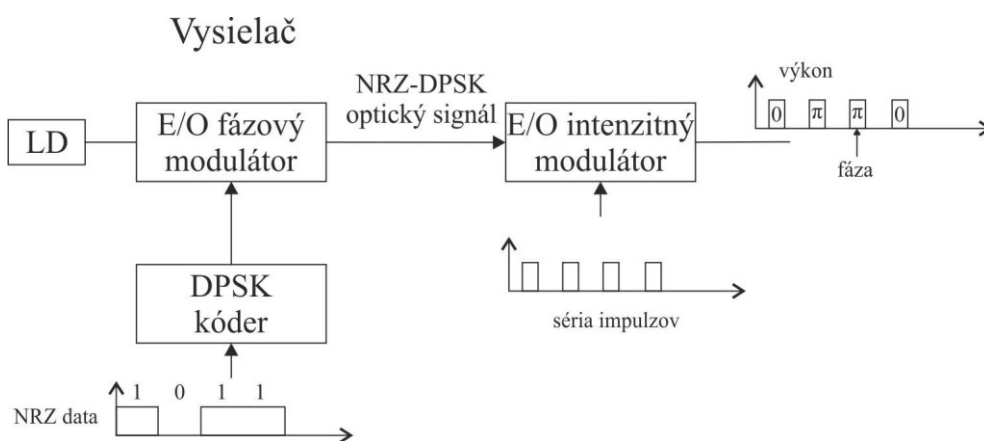
Ako DPSK optický prijímač (Obrázok 4.14) sa zvyčajne používa Mach-Zehndrov interferometer (MZI). MZI využíva koreláciu každého bitu s jeho susedným a mení fázovú moduláciu na intenzitnú. Z MZI vedú dva výstupy nazývané konštruktívny a deštruktívny port. Pre konštruktívny port platí, že keď nasledujú dva po sebe idúce bity vo fáze, výstupom je vysoká úroveň signálu. V prípade deštruktívneho portu nastáva medzi dvoma po sebe idúcimi bitmi fázový rozdiel, kde sa tieto bity vzájomne vynulujú a výstupom je nízka úroveň signálu.

V DPSK vyváženom prijímači sú pre každý výstup z MZI použité fotodiódy. Fotodiódy generujú fotoelektrické prúdy, ktoré sa potom logicky odčítajú a tým zdvojnásobia signálovú úroveň. Takouto konfiguráciou je zlepšená citlivosť prijímača o 3 dB v porovnaní s jednou fotodiódou pri konštruktívnom alebo deštruktívnom porte. V tomto systéme kmitá amplitúda signálu v ideálnom prípade za použitia fotodetekcie a odpovedajúceho optického filtru od 1 do -

1 čo umožňuje zlepšiť citlivosť o 3 dB naproti konvenčnému intenzitnými NRZ kde kmitá signál len od 0 do 1. Pre kódovanie NRZ-DPSK platí, že optický výkon je konštantný. Avšak fázové posuny (medzi 0 a π) a priemer optického poľa je nulový. V dôsledku toho nie je žiadna nosná zložka v spektre. Tým sa líši od NRZ-OOK spektra kde nosná zložka je silná [44].

Účinnosť NRZ-DPSK by nemala byť ovplyvnená optickým výkonom modulácie súvisiacim s nelineárnymi efektmi. Vplyv chromatickej disperzie však toto nepotvrďuje. Fázové modulácie môžu byť prevedené na intenzitné prostredníctvom skupinovej rýchlosti disperzie (GVD), a potom nelineárne efekty ako vlastná modulácia fáze (SPM) a krížová fázová modulácia (XPM) môžu prispievať do určitej miery k narušeniu tvaru vlny [40], [44].

RZ-DPSK bolo navrhnuté za účelom zlepšenia tolerancie systému pre nelineárne skreslenie a pre dosiahnutie väčšej prenosovej vzdialenosti. Podobne ako pri NRZ-DPSK modulácií aj tu sú binárne dáta kódované ako fázový posun 0 alebo π medzi susednými bitmi. Šírka optického pulzu je tu užšia ako bitový slot, takže optický výkon signálu sa vráti na nulu na okraji každého bitového slotu. Pre vytvorenie RZ-DPSK sa používa ešte jeden intenzitný modulátor ako možno vidieť na Obrázku 4.15 v porovnaní s NRZ-DPSK. Ako je znázornené na blokovej schéme prvý elektro-optický fázový modulátor generuje konvenčný NRZ-DPSK optický signál, potom tento optický signál je modulovaný hodinovým signálom s rovnakou dátovou rýchlosťou ako elektrický signál prostredníctvom elektro-optického intenzitného modulátora [44].



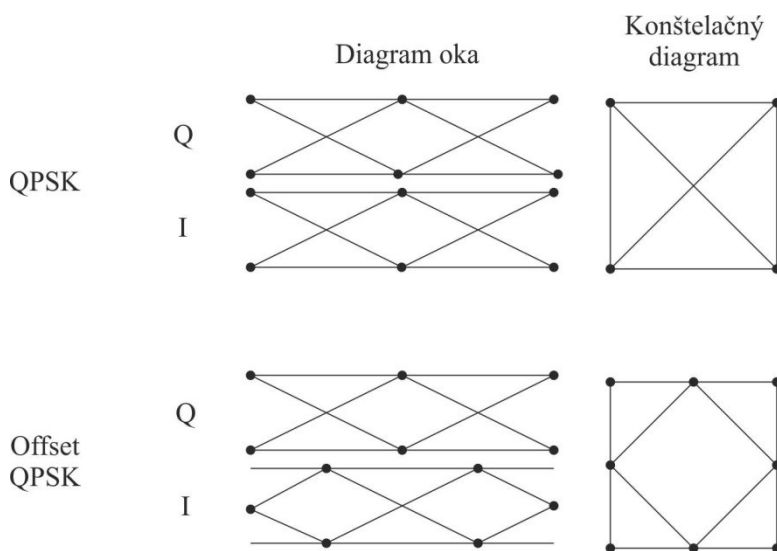
Obrázok 4.15: Blokový diagram vysielača RZ-DPSK

RZ-DPSK modulácia je niekedy označovaná aj ako intenzitne modulované DPSK (IMDPSK). V tomto modulačnom formáte nie je výkon optického signálu konštantný čo sa pravdepodobne prejaví v citlivosti na nelineárne efekty. Vzhľadom k úzkej šírke optického impulzu signálu je optické spektrum RZ-DPSK širšie než konvenčné NRZ-DPSK. Vďaka tomuto širokouhlému optickému systému by mohol byť systém viac náchylný na chromatickú

disperziu. Avšak podobne ako RZ-OOK je RZ-DPSK viac tolerantný k SPM-GVD efektom s optimálnou disperznou kompenzáciou [44], [45].

4.3.2 OQPSK

Offset QPSK modulačný formát je typom PSK modulácie kde je Q kanál posunutý o polovicu symbolového času tak, aby sa signály I a Q neprenášali v tom istom čase. Výsledkom tejto jednoduchej zmeny je, že fázové posuny v každom okamžiku sú limitované. Z toho vyplýva že OQPSK má obálku viac konštantnú oproti jednoduchej QPSK modulácii. Ďalej oproti QPSK ma OQPSK odlišný konštelačný diagram (Obrázok 4.16) čo poskytuje výhody v energetickej účinnosti vplyvom znížených amplitúdových zmien. V OQPSK sú trajektórie signálov upravené symbolovým ofsetom tak, že nosná amplitúda neprechádza cez nulu alebo blízko nule. Na prenos symbolu sa využívajú opäť dva bity [46].



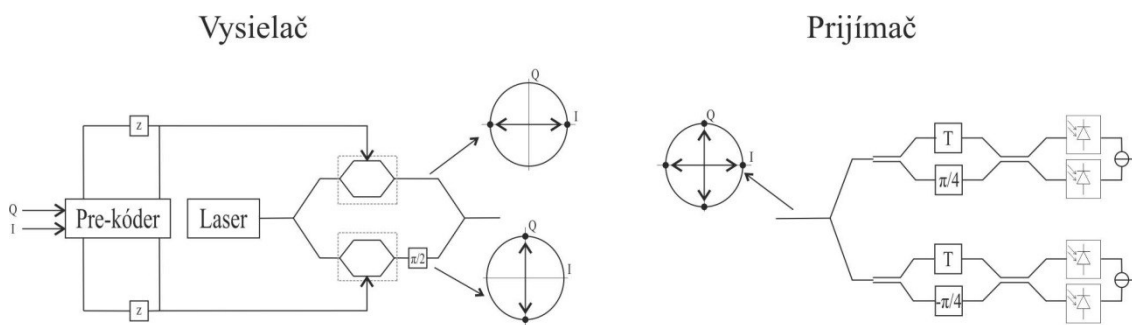
Obrázok 4.16: Porovnanie modulácií QPSK a Offset QPSK

4.3.3 DQPSK

Diferenčná kvadrátúrna PSK (DQPSK) modulácia je viac úrovňovým typom modulácie, ktorá umožňuje prenášať optický signál s využitím štyroch fázových posuvov ($0, -\pi/2, \pi/2, \pi$). Každý symbol je zložený z dvoch bitov a teda symbolová rýchlosť predstavuje polovičnú hodnotu celkovej prenosovej rýchlosti. Vysielaný signál môže byť reprezentovaný ako:

$$S_{DQPSK}(t) = S_c \times (2\pi f_c t + \theta(k)), \quad kT \leq t < (k+1)T, \quad (4.3)$$

kde S_c je amplitúda, $\theta(k)$ je zmena fázy v časovom intervale, t je čas, T je perióda a f_c je frekvencia nosnej.



Obrázok 4.17: Typická DQPSK modulačná schéma

Vysielač DQPSK (Obrázok 4.17) sa skladá z kontinuálneho laserového zdroja, rozdeľovača, dvoch MZM, optického fázového posuvu $\pi/2$ a zlučovača na produkovanie jedného výstupného signálu. Takáto štruktúra vysielača poskytuje výhodu vo využití skoro dokonalého fázového posuvu π vygenerovaných Mach-Zehnder modulátormi nezávisle na prekročení riadiaceho signálu. Ďalej takáto štruktúra vysielača vyžaduje iba binárne elektronicky riadené signály, ktoré je oveľa ľahšie generovať pri vysokých rýchlostiach než viac úrovňovo riadené priebehy.

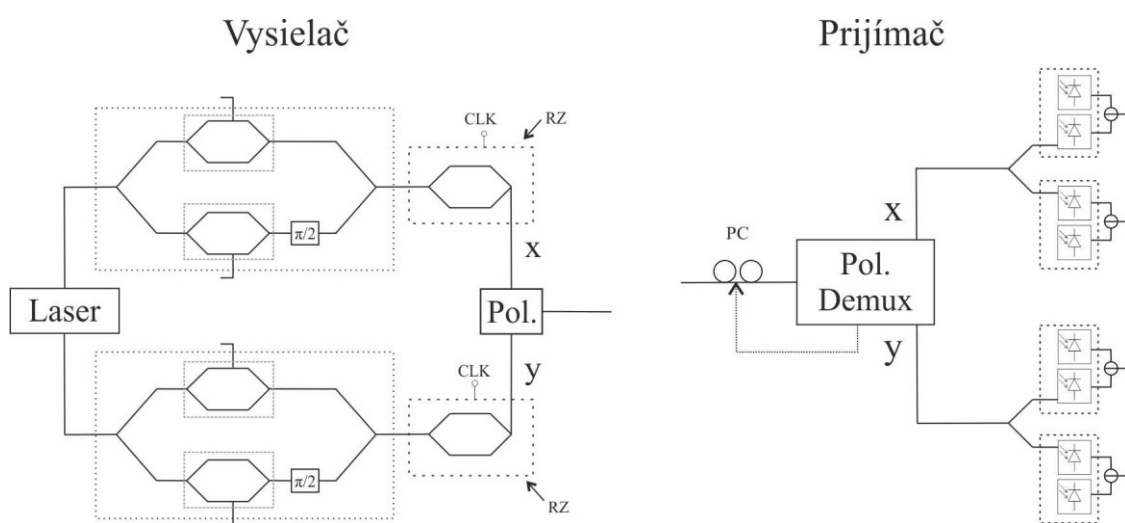
Podobne ako vysielač tak aj prijímač pracuje s binárnymi elektrickými signálmi v dôsledku implementácie vo vysokorýchlostnej elektronike. V prijímači je signál rozdelený na dve rovnaké časti, ktoré spracovávajú vyvážené prijímače s rôznym nastavením oneskorenia interferometrov. Takto paralelne demodulujú dva binárne dátové toky zahrnuté v DQPSK signály. Oneskorenie interferometrov sa rovná dobe trvania symbolu pre DQPSK demodulácie, ktorá je dvojnásobná vzhľadom k trvaniu bitu. Oproti DPSK je tolerancia tejto štruktúry prijímača k samovoľným frekvenčným posuvom medzi vysielačim laserom a oneskorovacím interferometrom šesťkrát nižšia. Keďže dochádza k posuvu medzi oboma polarizáciami signálu je tento frekvenčný posuv polarizačne závislý a musí byť upravený tak, aby odpovedal tolerancii posuvu u DQPSK.

Spektrum DQPSK signálu je stlačené vo frekvenciách o faktor dva z dôvodu polovičnej symbolovej rýchlosti pre prenos s pevnou prenosovou rýchlosťou. Stlačené spektrum poskytuje výhodu pre dosiahnutie vysokej spektrálnej účinnosti vo WDM systémoch. Rovnako poskytuje zvýšenú odolnosť voči chromatickej disperzii a dlhšia doba trvania symbolu v porovnaní s binárnymi modulačnými formátmi robí z DQPSK robustnejšiu moduláciu voči PMD.

RZ-DQPSK vysielač sa vytvára pridaním pulzného tvarovača do štruktúry. Použitím pulzného tvarovača má vzniknutý modulačný formát RZ-DQPSK zväčšenú toleranciu na CD a prispieva k zníženiu reziduálneho čirpu v modulovanom signály. RZ-DQPSK má oproti NRZ-DQPSK lepšie hodnoty BER a Q-faktoru, a aj väčšiu maximálnu vzdialenosť. V porovnaní s RZ-DPSK poskytuje RZ-DQPSK oveľa lepší výkon, pretože nesie dva bity pripadajúce na jeden symbol v štyroch stavoch optickej fázy [44], [45].

4.3.4 PM-DQPSK

Polarizačne multiplexovaný (PM) DQPSK modulačný formát umožňuje zdvojnásobením rýchlosti linky alebo priamo polovičnými symbolovými rýchlosťami znížiť celkovú symbolovú rýchlosť v optickom systéme. Vysielač na Obrázku 4.18 obsahuje zložitejší modulátor tvorený dvoma vloženými MZM, ktorý modulujú každú časť laserového svetla. Pomocou polarizačného zlučovača sú oba signály DQPSK zlúčené ako ortogonálne polarizované. V porovnaní s jedno polarizačnou DQPSK sú pri tomto formáte vyžadované dva pre-kóдеры. Pre vláknové prenosy s rýchlosťou okolo 100 Gbit/s je potrebné kompenzovať chromatickú disperziu aj keď je disperzná tolerancia štyrikrát vyššia ako pri jednoduchom DQPSK formáte.



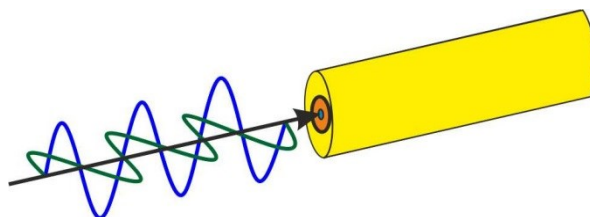
Obrázok 4.18: Schéma typického PM-DQPSK vysielača a prijímača

Na strane prijímača (Obrázok 4.18) je použitý polarizačný demultiplexer, ktorý rozdeľuje oba ortogonálne DQPSK dátové signály a privádza ich na fotodiódy s daným bitovým oneskorením. Pre stabilnú prevádzku a aby sa zabránilo veľkým prenosovým chybám sa rýchle automatické polarizačné demultiplexovanie prispôsobuje pomocou ovládania jedného alebo oboch polarizačných demultiplexerov v závislosti na kolísajúcich dátach. Na druhej strane nízka frekvencia šumu generovaná koherentnými presluchmi na prijímacej alebo monitorovacej fotodióde spôsobí, že nemusí byť použitý dokonalý spätnoväzobný signál na riadenie elektroniky polarizačných demultiplexerov.

Použitie PM-DQPSK modulačného formátu v laboratórnych podmienkach preukázalo, že je použiteľný pre vysoké prenosové rýchlosti (100 Gbit/s). Je kompatibilný aj pre nižšie prenosové rýchlosti 10 Gbit/s a 40 Gbit/s. Výhodou tohto formátu je štvornásobné zväčšenie tolerancie na chromatickú disperziu a dvojnásobné zväčšenie tolerancie pri DGD oproti DQPSK. Nevýhodou oproti DQPSK je nižší dosah, kde pri PM-DQPSK je odhadovaný dosah 600 km a u DQPSK to je až 1000 km [47].

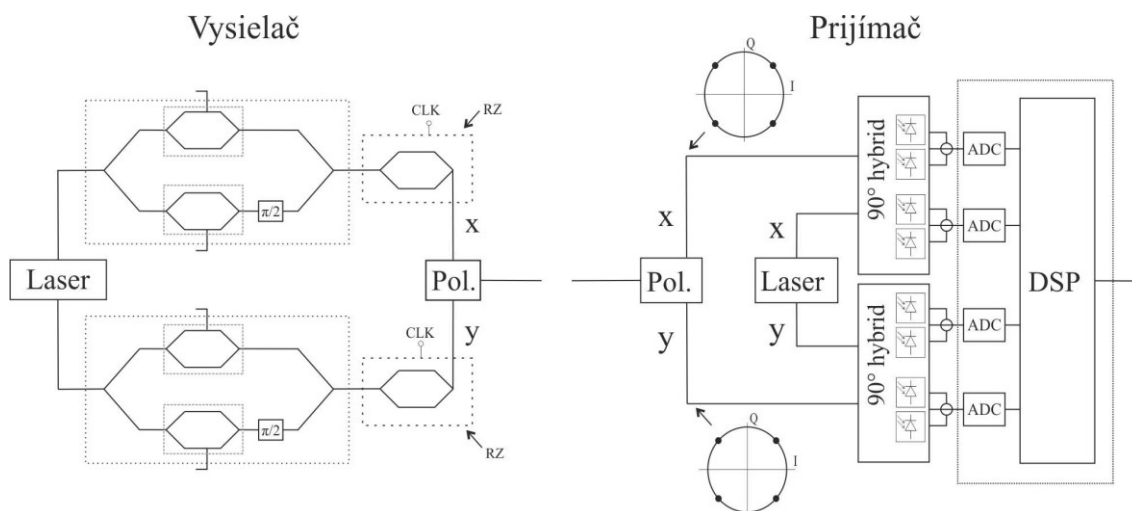
4.3.5 DP-QPSK

Duálne polarizovaný QPSK modulačný formát umožňuje prenos viacerých kanálov na jednom vlákne podporujúcom prenos signálu v dvoch polarizáciách. Jeden signál je prenášaný v horizontálnej polarizácii a druhý signál vo vertikálnej polarizácii. Tieto signály majú rovnakú frekvenciu a sú polarizované medzi sebou o 90° , takže sa vzájomne neovplyvňujú. Tento princíp je znázornený aj na Obrázku 4.19.



Obrázok 4.19: Princíp duálnej polarizácie

Na rozdiel od systémov s priamou detekciou tu nie je vyžadovaný vo vysielači pre-kóder, pretože optická fáza je priamo obnovená koherentným zmiešaním prijatého optického signálu s úzkou spektrálnou čiarou lasera lokálneho oscilátora. Pri tomto formáte sa prenášajú v každej polarizačnej rovine dva bity na symbol čo umožňuje štvornásobnú šírku pásma. Každý symbol sa teda môže prenášať v štyroch rôznych fázach a je reprezentovaný štyrmi bitmi [48]. Vysielač spolu s prijímačom je zobrazený na Obrázku 4.20.



Obrázok 4.20: Schéma typického DP-QPSK vysielača a prijímača

V prijímači sa rozdeľuje optický signál do ortogonálnych zložiek a tie sa kombinujú so svetlom z lokálnych optických oscilátorov na štyroch rozdielnych fotodiódach. Pri

vyhodnocovaní výstupných elektrických signálov elektronické obvody spracovávajú signál, ktorý je spomalený o faktor štyri a informácie môžu byť spracované pomocou technológie digitálneho spracovania signálu (DSP). Zároveň DSP umožňuje kompenzáciu chromatickej disperzie a PMD [45].

Tento modulačný formát je testovaný najmä pre prenosovú rýchlosť 100 Gbit/s a pre veľmi dlhé vzdialenosti bez regenerácie. Zároveň je kompatibilný a teda použiteľný pre rýchlosti 10 Gbit/s a 40 Gbit/s. V porovnaní s modulačnými formátmi DQPSK a PM-DQPSK umožňuje dosiahnuť väčšie vzdialenosti a zároveň má omnoho väčšiu toleranciu CD a DGD [47].

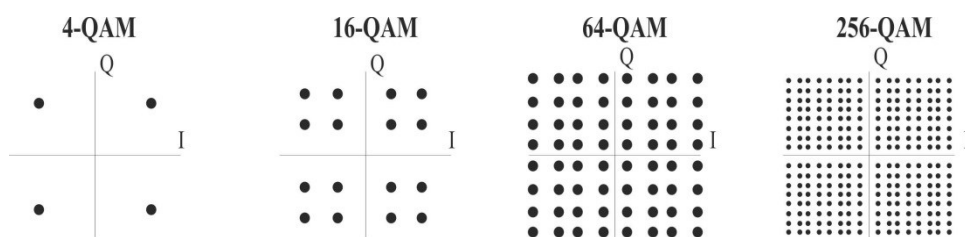
4.3.6 QAM

Modulačný formát QAM (Quadrature Amplitude Modulation) je kombináciou fázovej a amplitúdovej modulácie. Znížená symbolová rýchlosť pri QAM modulácií umožňuje prenos vysokými prenosovými rýchlosťami pod limitmi existujúcej nízko rýchlostnej elektroniky. QAM kombinuje dve nosné, ktorých amplitúdy sú modulované nezávisle rovnakou frekvenciou a fázy sú navzájom posunuté o 90° . QAM modulácia môže priradiť 2^N stavov použitím nosných I a Q podľa nasledujúceho vzťahu:

$$m = 2^N, \quad (4.x)$$

kde m je počet modulačných stavov a N je počet bitov.

Konšteláčne body pri QAM môžu byť usporiadané vo štvorci alebo v kruhoch. Modulačný formát kruhového usporiadania je popísaný v nasledujúcej podkapitole. Pri usporiadaní vo štvorci je tolerancia šumu vyššia ako v prípade kruhového usporiadania konšteláčnych bodov. Konšteláčne diagramy štvorcového usporiadania m -ary QAM (kde $m = 4, 16, 64$ a 256 .) sú zobrazené na Obrázku 4.21. Sú tu znázornené symboly s rôznou amplitúdou a fázou z ktorých každý je mapovaný pomocou $\log_2(m)$ prichádzajúcich bitov. Tým sa zvýši spektrálna účinnosť [49], [50].



Obrázok 4.21: Konšteláčne diagramy QAM

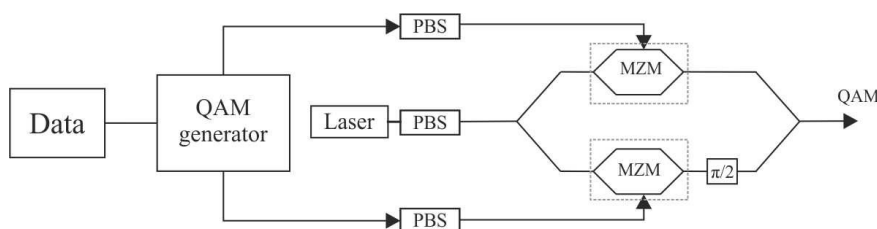
Vysielané symboly sú vyjadrené nasledujúcim vzťahom:

$$S_{QAM} = \sqrt{\frac{2 \times E_{\min}}{T_S}} \times a_i \times \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2 \times E_{\min}}{T_S}} \times b_i \times \cos(2\pi f_c t), \quad (4.4)$$

$$0 \leq t \leq T_S, i = 1, 2, \dots, m.$$

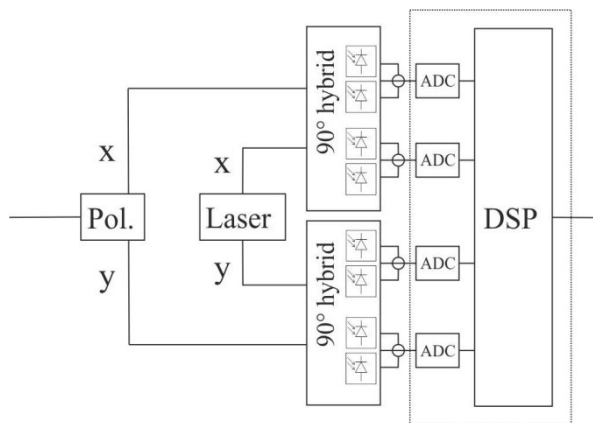
Kde E_{\min} je stredná energia signálového prvku s najmenšou amplitúdou, T_S je symbolová perióda, f_c je frekvencia nosnej, a_i a b_i sú páry nezávislých celých čísiel.

Vysielač QAM (Obrázok 4.22) využíva I-Q modulátor obsahujúci MZM s fázovým posuvom v jednom z dvoch ramien. Pre generovanie ďalších impulzov ako napríklad RZ, je vyžadovaný ďalší pulzný tvarovač. Pre implementáciu duálnej polarizácie na zdvojnásobenie spektrálnej účinnosti je potrebný polarizačný rozdeľovač lúča a polarizačný zlučovač. Kontinuálne vlny laseru sú rozdelené do dvoch ortogonálnych polarizácií, modulovaných nezávisle pomocou MZM a následne spojených pred odoslaním signálu do prenosového vlákna.



Obrázok 4.22: Bloková schéma QAM vysielača

Pri detekcii QAM so štvorcovým usporiadaním sa môže využiť koherentný synchronný prijímač alebo prijímač s diferenčnou detekciou. Detekcia kruhového usporiadania vyžaduje diferenčné prijímače. Koherentná detekcia môže získať všetky informácie ako je amplitúda, frekvencia, fáza a polarizácia optického signálu, ktorý môže byť prevádzkovaný v elektrickej doméne. To umožňuje jednoduché nastavenie prijímača najmä vo vyšších rádoch QAM. Na Obrázku 4.23 je zobrazený koherentný prijímač s polarizačným multiplexovaním. Pri spracovaní signálu prijímačom sa využíva optický hybridný komponent, ktorý prijíma optický signál a spolu s laserom oscilátora dáva štyri výstupné signály spracovávané vyvažovacími detektormi. Pre detekciu optického signálu s duálnou polarizáciou je potreba dodatočných optických hybridných súčastí a polarizačných deličov zväzku [49], [50].

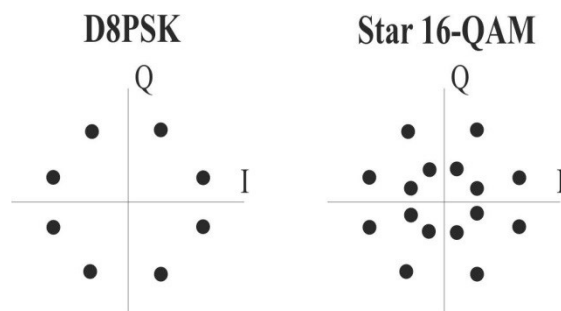


Obrázok 4.23: Prijímač QAM s polarizačným delením

Použitím polarizačného multiplexovania a QAM modulačného formátu možno dosiahnuť vysoké kapacity DWDM prenosov s vysokou spektrálnou účinnosťou. Na jednej strane viacúrovňová modulácia umožňuje nižšie symbolové rýchlosti, čo je výhodné v prítomnosti chromatickej a polarizačne módovej disperzie a zároveň umožňuje aj menšie odstupy kanálov. Na strane druhej tieto výhody sú sprevádzané zníženou toleranciou voči šumu a vlastnej fázovej modulácií (SPM). V prijímači môže nastať chyba vplyvom šumu, ktorý sa pridá k symbolu a tak sa prekročí prahová úroveň susedného konštelačného bodu. Polarizačne multiplexované 16-QAM, 32-QAM, 256-QAM sú v súčasnej dobe testované pre vysokorýchlostné prenosy s rýchlosťami 100 Gbit/s až 1000 Gbit/s. Tu poskytujú v porovnaní s ostatnými modulačnými formátmi vysokú spektrálnu účinnosť, a nízke symbolové rýchlosti použitím viacerých bitov na jeden symbol. V kombinácii s DSP sa účinne zvyšuje ich disperzná tolerancia sú využívané na prenos do veľkých vzdialeností [45], [47].

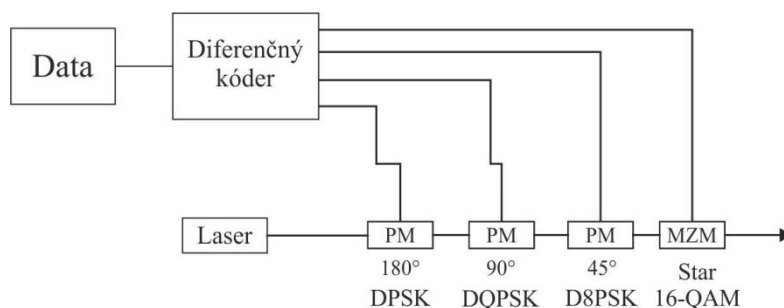
4.3.7 D8PSK a Star 16-QAM

D8PSK kóduje tri bity v rozdielu fáze dvoch po sebe nasledujúcich symboloch. Kódovanie sa prevádza v diskretnom diferenčnom kódery v prípade binárnych signálov. Pre Star 16-QAM sa pridáva štvrtý nezávislý bit pomocou amplitúdovej modulácie čo vytvára dva kruhy ako je znázornené v konštelačnom diagrame na Obrázku 4.23. Tento štvrtý bit nemusí byť kódovaný a môže byť detekovaný nezávisle pomocou detekcie intenzity prijímača. D8PSK a Star 16-QAM signály môžu byť generované pomocou DSP a binárne riadením signálom. V prípade binárneho riadenia je zložitosť v elektrickej oblasti minimálna a je vyžadovaný jeden modulátor na bit. Binárne riadený vysielač môže byť konfigurovaný sériovo alebo paralelne.



Obrázok 4.24: Konšteláčny diagramy modulácií D8PSK a Star 16-QAM

V sériovej konfigurácii na Obrázku 4.25 sú dáta kódované a riadia tri fázové modulátory v sérii, čo vytvára osem úrovňový modulovaný signál. Pre vytvorenie Star 16-QAM signálu je pridaný za modulátor vytvárajúci 8 PSK ešte MZM. Paralelná konfigurácia sa odlišuje v tom, že prvé dva modulátory sú riadené paralelne a následne modulátory D8PSK a Star 16-QAM sú riadené za nimi v sérii. V praxi je uprednostňované paralelné zapojenie, ktoré viac toleruje amplitúdový šum.



Obrázok 4.25: Blokova schéma vysielača D8PSK a Star 16-QAM

V prípade vysielača na báze DSP je I-Q modulátor riadený viac úrovňovým signálom. DSP tu poskytuje výhodu v podobe pre-kompenzácie CD, signálového predkreslenia a flexibilnú zmenu modulačného formátu.

Prijímače existujú taktiež v dvoch konfiguráciách. V binárnej detekcii sú pre D8PSK signál štyri MZM s fázovými posuvmi na detegovanie jednotlivých symbolov a oneskorovací člen rovný symbolu jednej doby. Následne je takto prevedený signál vyhodnotený vyvažovacími fotodetektormi. Pre detekciu Star 16-QAM je pridaná detekcia intenzity zložená s fotodiódou na ktorú je pripojená časť vstupného signálu. Diferenčný prijímač na báze DSP umožňuje detekciu ľubovoľného viac úrovňového formátu. Namiesto analógového spracovania sú elektrické signály vzorkované a prevedené pomocou analógovo-digitálnych prevodníkov do DSP [51].

Modulačné formáty

Oba modulačné formáty majú veľmi dobrú citlivosť prijímača. Star 16-QAM modulačný formát dosahuje väčšie vzdialenosti v porovnaní s D8PSK. Oba tieto formáty môžu mať v budúcnosti uplatnenie vo WDM-PON sieťach, či už ako samostatne modulácie alebo v kombinácii s inými.

5 Simulácie modulačných formátov na DWDM-PON topológii

Simulácie jednotlivých modulačných formátov, disperzií a ich kompenzácií boli vykonávané na DWDM-PON topológii prostredníctvom softwarovej aplikácie Optiwave OptiSystem. Táto aplikácia umožňuje užívateľom testovať, plánovať a simulovať optické trasy v prenosovej vrstve moderných optických sietí. OptiSystem vypočítava parametre výkonu systému ako napríklad BER a Q faktor pomocou numerickej analýzy alebo semi-analitických techník pre systémy obmedzenými intersymbolovou interferenciou a šumom.

5.1 Nastavené parametre simulácií

Simulácie prebiehali na DWDM-PON topológii pri zvolených prenosových rýchlostiach 10, 20, 40, 100 Gbit/s a dĺžkach trás 10, 30, 50, 70, 100 km. Zvolené typy modulačných formátov testované na odolnosť voči vplyvom disperzií sú v Tabuľke 5.1.

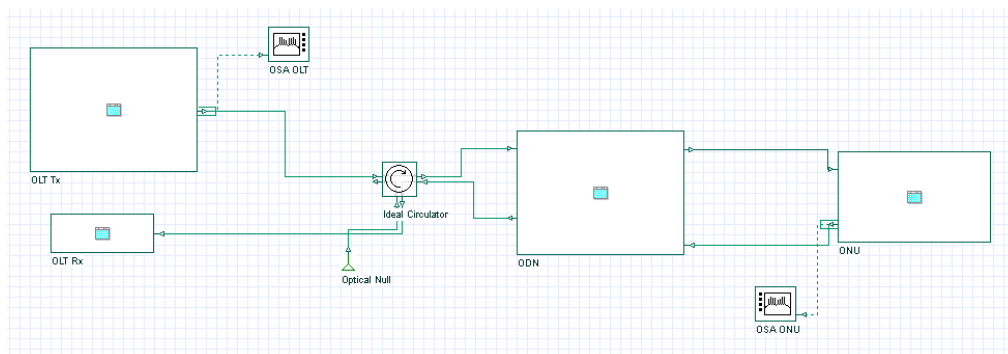
Tabuľka 5.1: Zvolené modulačné formáty pre simulácie

Intenzitné modulácie	Pokročilé modulácie
RZ 33%	RZ 33% DPSK
RZ 50%	RZ 50% DPSK
CSRZ	NRZ DPSK
NRZ	QPSK
AMI	DQPSK
DB	DP-QPSK
CSRZ-VSB	16-QAM

Intenzitné modulácie spolu s moduláciami DPSK a DQPSK sa vyhodnocovali pomocou komponentu BER Analyzer. Ten zobrazoval diagram oka a merané hodnoty BER aj Q faktor. Pri moduláciách QPSK, DP-QPSK a 16-QAM bolo vyhodnocovanie vykonávané pomocou DSP a vyhodnocovacieho komponentu. Vyhodnocovací komponent zároveň meral parameter EVM. Pre meranie BER tu bol použitý komponent BER Test Set, keďže po konzultáciách s členmi Optiwave sa dospelo k záveru, že BER Analyzer nie je schopný vracať správne údaje pre tieto pokročilé modulácie a vysoké rýchlosti. BER Test Set porovnáva prijatý signál z vyslaným a je možné na ňom nastaviť dĺžku sekvencie. BER Analyzer odhaduje parameter BER na základe diagramu oka. Hodnoty BER teda pri týchto pokročilých moduláciách nemohli dosahovať hodnôt 10^{-9} a nižších (okrem BER = 0), pretože by bolo potrebné nastaviť veľmi dlhú sekvenciu a vzhľadom na výpočtový výkon by to na použitom počítači pre simulácie nebolo možné.

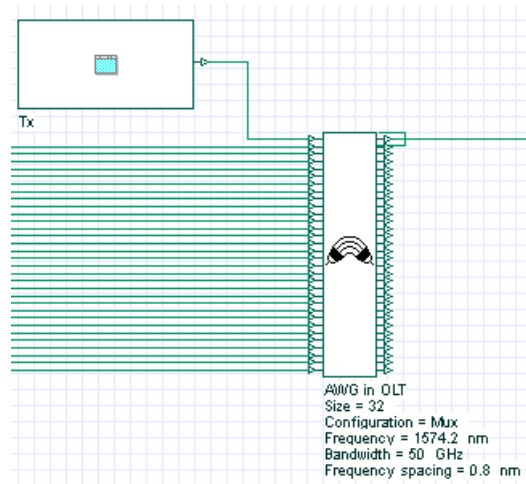
Pri pokročilých moduláciách (okrem DPSK) sa v závislosti na použitej modulácii menila symbolová rýchlosť. Pri DPSK sa symbolová rýchlosť rovnala prenosovej rýchlosti. V prípade DQPSK a QPSK modulácií sa symbolová rýchlosť rovnala polovici prenosovej rýchlosti. Modulácie DP-QPSK a 16-QAM mali symbolovú rýchlosť rovnú štvrtine prenosovej rýchlosti.

DWDM-PON topológia zobrazená na Obrázku 5.1 je zložená z časti OLT, ODN a ONU. Obsahuje 32 prenášaných kanálov medzi ktorými je odstup 0,8 nm. Simulácie sa vykonávali na zostupnom aj vzostupnom smere. Zostupný smer prevádzkovaný v L pásme má prvý kanál na vlnovej dĺžke 1574,2 nm. Vzostupný smer je prevádzkovaný v C pásme s prvým kanálom na vlnovej dĺžke 1533,4 nm. Nastavený výkon všetkých vysielačov mal hodnotu 3 dBm a šírka spektrálnej čiary bola 0,1 MHz. Výkon bol zvolený na základe reálneho DWDM vysielača [62]. Na lokálnych optických oscilátoroch pri pokročilých moduláciách bol nastavený výkon 10 dBm a šírka spektrálnej čiary taktiež 0,1 MHz. Tieto hodnoty boli zvolené pre správnu funkčnosť na základe informácií z internetovej stránky softwaru Optiwave Optisystem.



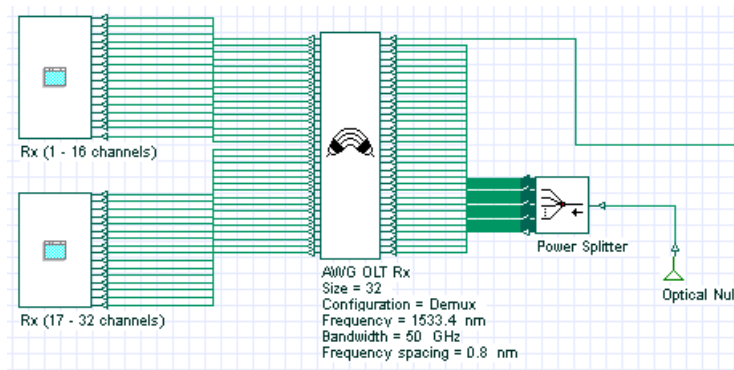
Obrázok 5.1: DWDM-PON topológia vytvorená v Optiwave OptiSystem

Optické linkové zakončenie OLT sa skladá z vysielačieho bloku Tx a prijímacieho bloku OLT Rx. OLT Tx (Obrázok 5.2) obsahuje vysielače s konkrétnou moduláciou a AWG smerovač v konfiguračnom režime multiplexér.



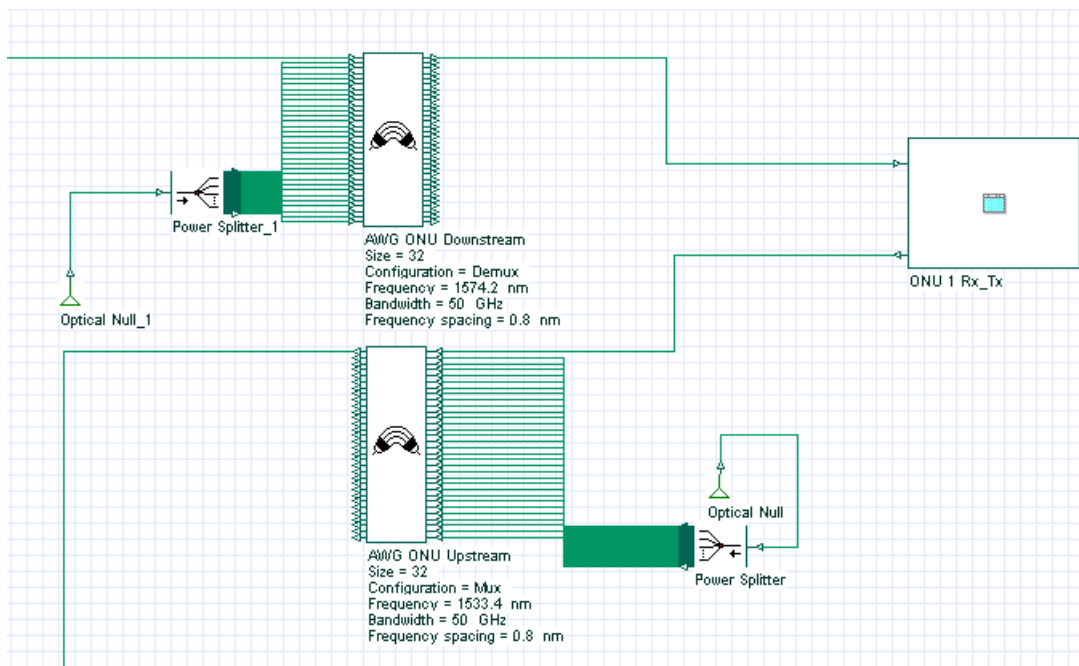
Obrázok 5.2: Blok OLT Tx DWDM-PON topológie

OLT Rx (Obrázok 5.3) je zložený z prijímačov pre konkrétnu moduláciu a AWG smerovača v konfiguračnom režime demultiplexér.



Obrázok 5.3: Zloženie bloku OLT Rx

Ďalším blokom DWDM-PON topológie je optická distribučná sieť ODN, ktorá obsahuje optické vlákna pre zostupný a vzostupný smer. Blok optických sieťových jednotiek ONU obsahuje jednotlivé ONU jednotky (Obrázok 5.4), ktoré obsahujú prijímač danej modulácie a vysielač v vzostupnom smere. Ďalej sa tu nachádza AWG smerovač v konfigurácii demultiplexéru pre zostupný smer a AWG smerovač v konfigurácii multiplexéru pre vzostupný smer.



Obrázok 5.4: Ukážka ONU bloku

5.1.1 Použité optické vlákna pre simuláciu

Každá simulácia jednotlivých modulácií a kompenzácií sa vykonávala na troch rozdielnych štandardoch optických vlákien použitých pre optickú distribučnú sieť ODN. Tieto štandardy a parametre optických vlákien sú uvedené v Tabuľke 5.2. Tieto parametre boli čerpané z katalógových listov pre každý typ použitého optického vlákna [54], [55], [56].

Tabuľka 5.2: Parametre použitých optických vlákien

Typ vlákna	G.652.D	G.654.B	G.656
Útlm [dB/km]	0,21	0,19	0,20
Chromatická disperzia [ps/nm × km]	18	22	8,5
Disperzný sklon [ps/nm ² × km]	0,087	0,069	0,045
PMD koeficient [ps/√km]	0,05	0,03	0,04

5.1.2 Nastavenia simulácie pre kompenzáciu vplyvu chromatickej disperzie

Na kompenzovanie chromatickej disperzie boli využité DCF vlákna a komponent FBG softwaru Optiwave OptiSystem. DCF vlákno malo hodnotu zápornej chromatickej disperzie - 100 ps/nm × km, disperzný sklon 0,0034 ps/nm² × km a útlm 0,40 dB/km [57]. Metóda DCF kompenzácie bola zvolená symetrická DCF kompenzácia vďaka najlepšiemu výkonu a odolnosti voči nelinearitám. Pri týchto simuláciách boli najprv vypočítané dĺžky DCF vlákien na začiatku aj konci trasy tak aby výsledná chromatická disperzia mala nulovú hodnotu. V tabuľke 5.3 sú uvedené tieto dĺžky DCF vlákien pre všetky typy použitých vlákien a pre jednotlivé dĺžky trasy.

Tabuľka 5.3: Dĺžky DCF vlákien na začiatku a konci trasy pre rozdielne vlákna

Dĺžka trasy [km]	Dĺžky DCF pre G.652.D [km]	Dĺžky DCF pre G.654.B [km]	Dĺžky DCF pre G.656 [km]
10	0,9	1,1	0,425
30	2,7	3,3	1,275
50	4,5	5,5	2,125
70	6,3	7,7	2,975
100	9	11	4,25

Pri FBG kompenzácií sa nastavoval komponent softwaru Optiwave pre každý kompenzovaný kanál. FBG komponent bol umiestnený vždy na konci trasy. Hodnoty nastavovanej kompenzácie sa tak isto odvíjali od dĺžky kompenzovanej trasy a od použitého prenosového optického vlákna. V Tabuľke 5.4 sú zobrazené nastavené hodnoty kompenzácií chromatickej disperzie pomocou FBG pre jednotlivé optické vlákna.

Tabuľka 5.4: Hodnoty nastavenej FBG kompenzácie pre rozdielne vlákna

Dĺžka trasy [km]	D _{CH} pre G.652.D [ps/nm × km]	D _{CH} pre G.654.B [ps/nm × km]	D _{CH} pre G.656 [ps/nm × km]
10	-180	-220	-85
30	-540	-660	-255
50	-900	-1100	-425
70	-1260	-1540	-595
100	-1800	-2200	-850

Pri moduláciách QPSK, DP-QPSK a 16-QAM bola navyše použitá kompenzácia chromatickej disperzie pomocou DSP komponentu. V tomto komponente sa nastavovala frekvencia kompenzovaného kanálu, dĺžka trasy, disperzný koeficient a disperzný sklon v závislosti na použítom optickom vlákne.

5.2 Merané parametre modulácií

Parametre zaznamenávané pre intenzitné modulácie boli BER, Q faktor a diagram oka. Pri pokročilých moduláciách to boli parametre BER, EVM a konštelačný diagram. Jednotlivé parametre sú bližšie popísané v nasledujúcich podkapitolách.

5.2.1 Bitová chybovosť BER

BER (Bit Error Ratio) predstavuje pomer chybné prenesených bitov k celkovému počtu prenesených bitov za určitý čas (Vzťah 5.1). Tento čas je tak dlhý, pokiaľ sa bitová chybovosť už nemení so zväčšujúcim časom. BER predstavuje významný indikátor kvality celkového systému. Pri typickom optickom prenose predstavuje hodnota BER 10^{-12} dostatočne nízku hodnotu vhodnú na prenos. Niektorí prevádzkovatelia sieti vyžadujú bitovú chybovosť pre niektoré služby 10^{-15} až 10^{-16} . Bitová chybovosť je ovplyvnená nelinearitami, šumami a disperziami. BER je možné tiež vyjadriť ako P_e čo predstavuje pravdepodobnosť chyby v prenose bitu (Vzťah 5.2) [58], [49].

$$BER = \frac{\text{poč. chybné prenesených bitov}}{\text{celkový poč. prenesených bitov}} \quad [-] \quad (5.1)$$

$$P_e = \frac{\text{priemerný poč. chybných bitov prenesených za 1s}}{\text{celkový poč. bitov prenesených za 1s}} \quad [-] \quad (5.2)$$

5.2.2 Q faktor

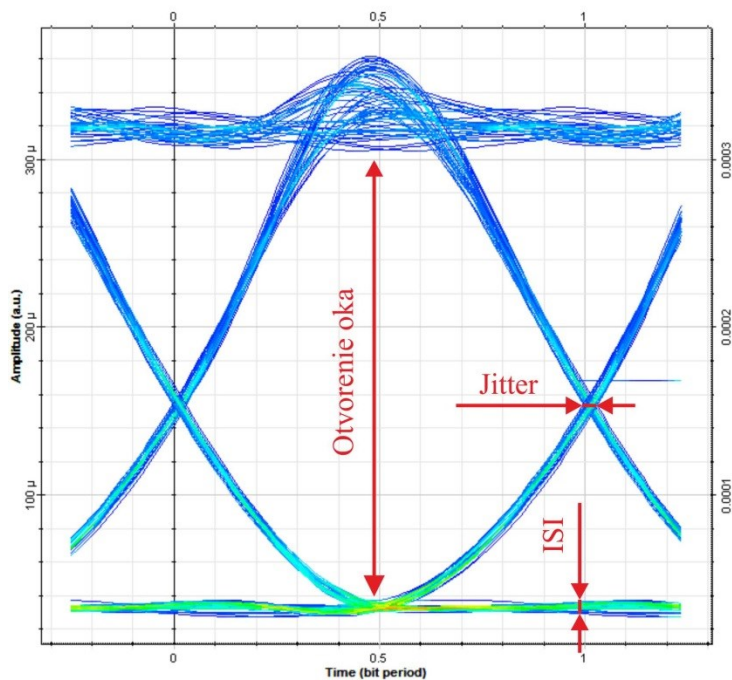
Q faktor (Quality factor) slúži k meraniu kvality prenosu. Hodnota Q faktoru je vypočítaná podľa odstup signálu od šumu SNR. Q faktor vyjadruje kvalitu diagramu oka a rastie s klesajúcim parametrom BER. Vo výpočte Q faktoru sú zahrnuté všetky efekty znižujúce hodnoty signálu ako je šum, nelineárne efekty a disperzie. Q faktor sa vypočíta nasledujúcim vzťahom:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad [-], \quad (5.3)$$

kde μ_1 je stredná hodnota logickej úrovne jedna, μ_0 je stredná hodnota logickej úrovne nula, σ_1 je štandardná odchýlka logickej úrovne jedna a σ_0 je štandardná odchýlka logickej úrovne nula [58], [60].

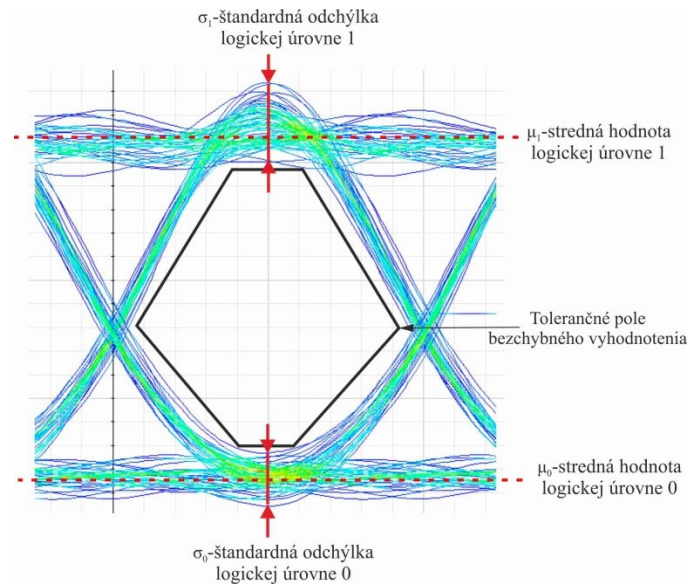
5.2.3 Diagram oka

Diagramom oka možno hodnotiť kvalitu prenášaného signálu. Poskytuje pohľad na vyhodnotenie prenosovej charakteristiky systému a dokáza sa podľa neho diagnostikovať kanálové chyby. S diagramom oka súvisia pojmy BER a SNR. Pri hodnotení signálu na diagrame oka je dôležité jeho otvorenie, intersymbolová interferencia (ISI) a kolísanie oneskorenia (Jitter). Tieto parametre sú zobrazené na Obrázku 5.5 kde sa nachádza diagram oka pre NRZ signál [59].



Obrázok 5.5: Diagram oka s vyznačenými parametrami

Otvorenie oka predstavuje rozoznatelnosť logickej jednotky od logickej nuly. Pri väčšom otvorení oka je rozoznatelnosť väčšia a aj kvalita signálu je vyššia. Intersymbolová interferencia je spôsobená prekrytím jednotlivých impulzov. Kolísanie oneskorenia predstavuje krátkodobú odchýlku digitálneho signálu z jeho ideálnej pozície. Na ďalšom obrázku je znázornená súvislosť diagramu oka s výpočtom Q faktoru [60].



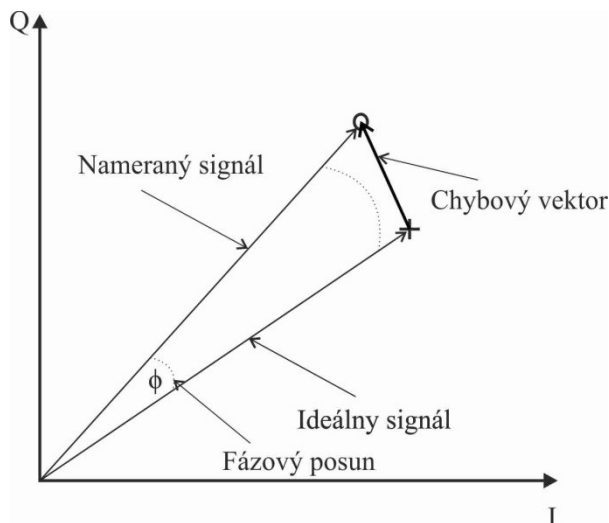
Obrázok 5.6: Súvislosť Q faktoru v diagrame oka

5.2.4 Konštelačný diagram

Pre grafické znázornenia modulácie sa používa rovina IQ do ktorej sa zakresľujú body odpovedajúce jednotlivým stavom nosnej. Signál je teda zobrazený ako dvojrozmerný bodový diagram v komplexnej rovine v okamžikoch vzorkovania symbolu. Toto zobrazenie je založené na skutočnosti že signál s uhlovou rýchlosťou, fázou a amplitúdou je možné zobraziť v komplexnej rovine ako rotujúci vektor zložený z dvoch kvadrátúrnych zložiek s rovnakými frekvenciami a vzájomnou fázou 90° . Každému amplitúdovo fázovému stavu danej modulácie odpovedá určitá veľkosť týchto zložiek. V konštelačnom diagrame sa dá rozpoznať rušenie a skreslenie signálu [61].

5.2.5 EVM

Error Vector Magnitude (EVM) alebo amplitúda chybového vektoru udáva ako presný je vysielač, prijímač. Definuje odchýlku bodu konštelačného diagramu od ideálneho stavu. Táto odchýlka býva spôsobená rušením na trase a amplitúdovou, fázovou nesymetriou prijímača a vysielača. EVM sa líši v závislosti na typu modulácie.



Obrázok 5.7: Amplitúda chybového vektoru EVM

EVM sa dá vypočítať podľa nasledujúceho vzťahu:

$$EVM = \sqrt{\frac{P_{error}}{P_{reference}}} \times 100 \quad [\%], \quad (5.4)$$

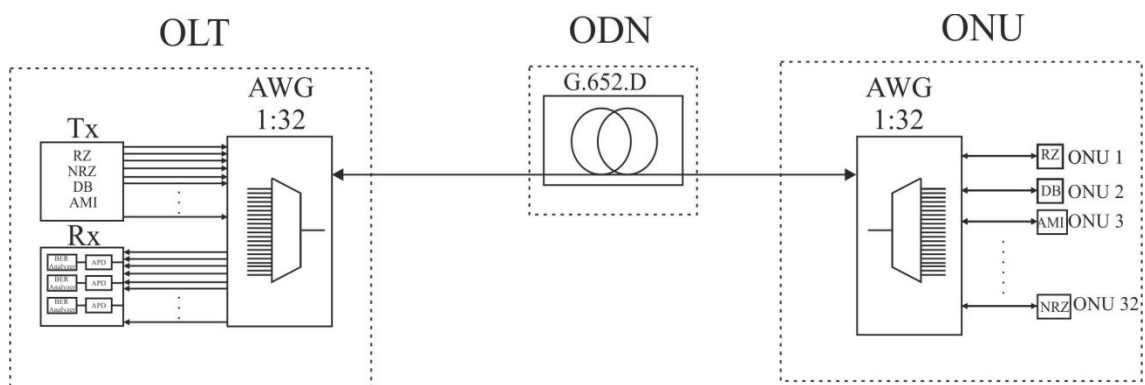
kde P_{error} je efektívna hodnota výkonu chybového vektora a $P_{reference}$ je hodnota výkonu referenčného vektora [58], [61].

5.3 Výsledky simulácií pre optické vlákno G.652.D v zostupnom smere

V tejto časti sú spracované výsledky simulácií pre optické vlákno G.652.D v zostupnom smere. Pre prehľadnosť sú tu uvedené tabuľky s výsledkami pre prenosové rýchlosti 10 Gbit/s a 20 Gbit/s a dĺžky trás 10 km, 50 km, 70 km v prípade intenzitných modulácií. Pri 40 Gbit/s boli hodnoty BER pri 10 km veľmi nízke a pre väčšie vzdialenosti mal parameter BER hodnotu 1 u všetkých intenzitných modulácií. Pri 100 Gbit/s mali všetky intenzitné modulácie hodnotu BER = 1. V prípade pokročilých modulácií sú uvedené prenosové rýchlosti 20 Gbit/s a 40 Gbit/s a dĺžky trás 10 km, 50 km a 70 km. Všetky kompletne namerané výsledky a grafy sú uvedené v prílohách.

5.3.1 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s

Simulácie všetkých intenzitných modulácií sa vykonávali na DWDM-PON topológii, ktorej bloková schéma je zobrazená na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 5.8: Bloková schéma intenzitných modulácií

Výsledne hodnoty BER a Q faktoru pre prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s sú zobrazené v tabuľkách 5.5 a 5.6.

Tabuľka 1.5: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	1,86E-16	4,4E-120	4,3E-224	1,4E-122	1,86E-16
50	5,24E-08	4,1E-06	0,0031	5,03E-5	7,25E-17	8,86E-11	0,0016
70	1,2E-06	0,0008	0,0016	0,0002	7,11E-11	0,0022	0,001

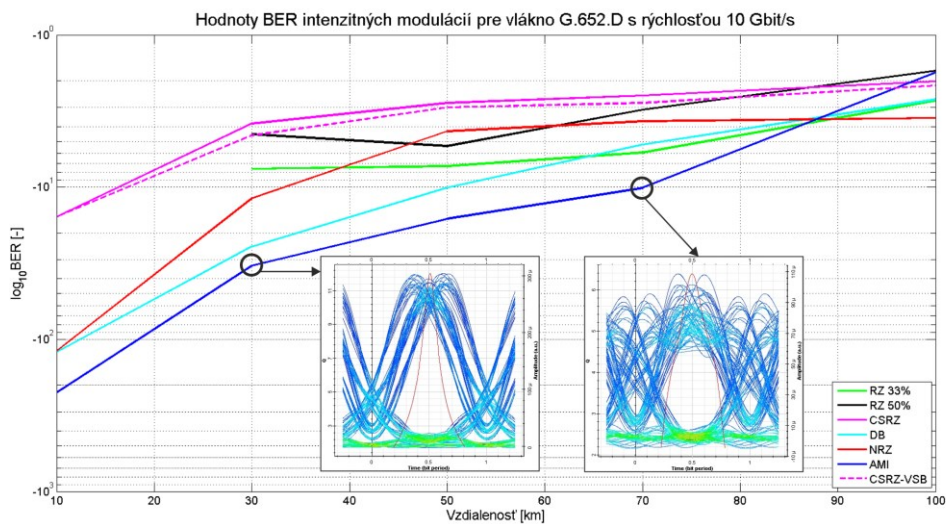
Tabuľka 5.6: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	86,27	92	8,13	23,27	33,34	23,52	8,13
50	5,31	4,46	2,87	3,88	8,21	6,35	2,96
70	4,71	3,11	2,62	3,44	6,38	4,33	2,84

Ako možno vidieť z Tabuľky 5.5 pre dĺžku trasy 10 km mali najlepšie hodnoty BER (BER = 0) modulácie RZ 33% a RZ 50%. Modulácia CSRZ tu mala najhoršiu hodnotu BER, avšak dostačujúcu na kvalitný prenos. S postupne zväčšujúcou sa dĺžkou trasy začala prevládať AMI modulácia, ktorá mala na 70 km najvyššiu hodnotu spomedzi všetkých. Podobne sú teda

výsledky aj pri Q faktore, kde najväčšie hodnoty sú pri RZ 33% a RZ 50% pre dĺžku trasy 10 km a pri väčších dĺžkach začínajú prevládať Q faktory modulácie DB a najmä AMI.

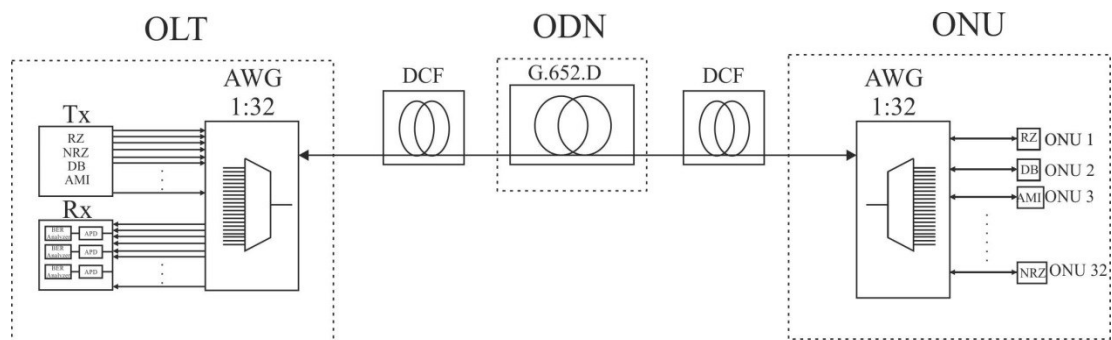
Na Obrázku 5.9 možno vidieť priebeh hodnôt BER pre jednotlivé modulácie a všetky zvolené dĺžky trasy. Pre lepšie porovnanie sú hodnoty prepočítané na desiatkový logaritmus. Z obrázka možno vidieť, že odolnosť voči disperziám a nelineárnym efektom je pri moduláciách RZ 33% a RZ 50% najlepšia do 30 km oproti ostatným. Od dĺžky trasy 30 km prevládajú modulácie AMI a DB, ktoré aj podľa teoretických predpokladov dosahujú väčšie vzdialenosti pri nižších prenosových rýchlostiach. Pri dĺžke trasy 100 km dosahovali všetky modulácie veľkých hodnôt BER nevhodných na prenos, keďže signál bol utlmený disperziami. Pri AMI modulácii je v 30 km a v 70 km zobrazený diagram oka z ktorého je možno vidieť kvalitu prenášaného signálu. Pri 70 km v porovnaní s 30 km je oko menej otvorené, má väčšie kolísanie oneskorenia a aj väčšiu ISI.



Obrázok 5.9: Graf porovnania intenzitných modulácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.2 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

Bloková schéma DWDM-PON topológie pre DCF kompenzáciu je zobrazená na Obrázku 5.10.



Obrázok 5.10: Bloková schéma intenzitných modulácií s DCF kompenzáciou

V nasledujúcich tabuľkách sú zobrazené hodnoty BER a Q faktoru po DCF kompenzácií chromatickej disperzie.

Tabuľka 5.7: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

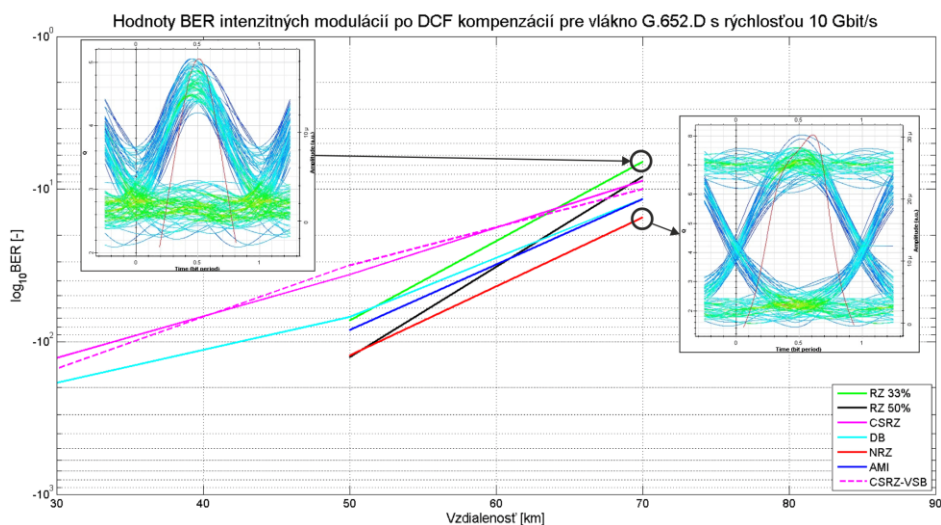
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ- VSB
10	0	0	0	0	0	0	0
50	2,15E-73	3,1E-127	4,7E-37	1,8E-124	7,25E-85	1,43E-69	2,56E-32
70	2,17E-7	4,92E-09	1,44E-09	4,53E-16	2,27E-12	2,4E-12	1,06E-10

Po vykompenzovaní chromatickej disperzie vyšli hodnoty BER pre dĺžku trasy 10 km u všetkých modulácií nulové. Najväčší Q faktor pri tejto vzdialenosti ako je vidieť z Tabuľky 5.8 je má modulácia NRZ. Pri dĺžke trasy 70 km sú BER hodnoty v porovnaní s nekompenzovanými hodnotami menšie. Najlepšie hodnoty BER mala modulácia NRZ a teda bola aj najviac odolná voči nelineárnym efektom a PMD. V porovnaní modulácií bez kompenzácie a po DCF kompenzácií sa zväčšila prenosová vzdialenosť modulácií NRZ, AMI a DB až na 70 km. Hodnoty BER tu dosahovali ešte hranice vhodných na kvalitný prenos.

Tabuľka 5.8: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ- VSB
10	93,4	117,75	61,3	148,06	120,84	41,59	64,83
50	18,08	24	12,66	23,7	19,48	17,6	11,77
70	5,05	5,72	5,93	8,03	6,91	6,91	6,35

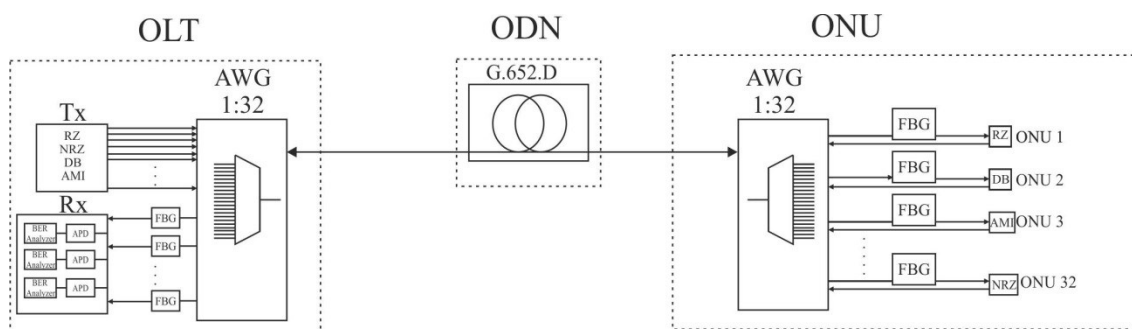
Obrázok 5.11: zobrazuje porovnanie modulácií pre všetky dĺžky trasy. Ako je vidieť modulácie AMI, DB, NRZ, RZ 33%, RZ 50% mali hodnoty BER najlepšie. V prípade modulácií RZ 33%, RZ 50%, NRZ a AMI boli hodnoty BER pri 10 km a 30 km nulové. Pri 100 km boli hodnoty BER všetkých modulácií rovné jednej. Diagramy oka pri RZ 33% a NRZ zobrazujú ešte pomerne kvalitne rozpoznateľný signál. V prípade RZ 33% možno ale pozorovať veľkú ISI. Ako je vidieť diagramy oka sú rozdielne keďže modulácia s návratom nule netrvá celú bitovú periódu.



Obrázok 5.11: Graf porovnania modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.3 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

V tejto časti sú uvedené výsledky simulácií intenzitných modulácií po FBG kompenzácií chromatickej disperzie. Bloková schéma pre DWDM-PON topológiu s FBG kompenzáciou je zobrazená na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 5.12: Bloková schéma intenzitných modulácií s FBG kompenzáciou

Teoreticky by mali modulácie dosahovať lepších hodnôt, keďže DCF malo veľký vložný útlm. Vybrané výsledky BER hodnôt a Q faktoru sú opäť uvedené v tabuľkách 5.9 a 5.10.

Tabuľka 5.9: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

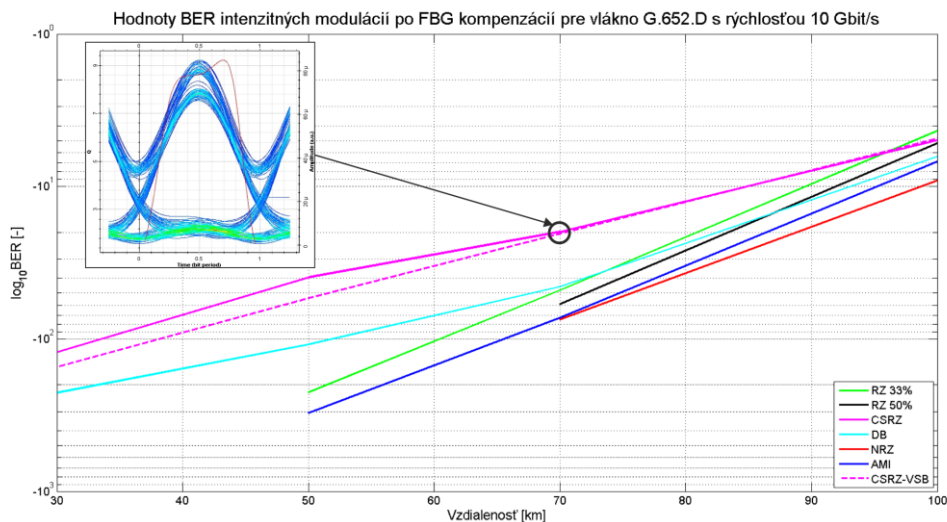
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ- VSB
10	0	0	0	0	0	0	0
50	1,9E-225	0	3,65E-40	0	2,3E-307	1,2E-109	5,59E-55
70	7,97E-49	7,44E-60	1,38E-20	8,99E-76	1,52E-73	3,78E-46	4,38E-21

Po FBG kompenzácií sa hodnoty BER pri 70 km dostali na dosť nízke hodnoty aby bola zabezpečená kvalita prenosu. Najlepšie výsledky mali modulácia RZ 50% a NRZ ktoré dosahovali BER 0 ešte pri 50 km. Pri Q faktore sú výsledky modulácií podobné ako pri BER. Pri 10 km a 70 km bol najvyšší Q faktor pri moduláciách NRZ a AMI. Pri 50 km mali najväčší Q faktor RZ 50% a NRZ.

Tabuľka 5.10: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	112,78	129,16	60,26	147,16	131,96	40,32	76,88
50	32,09	39,3	13,19	40,34	37,45	22,21	15,56
70	14,6	16,27	9,21	18,38	18,1	14,21	9,33

Pri porovnaní modulácií na všetkých dĺžkach (Obrázok 5.13) je vidieť, že najodolnejšie modulácie pre väčšie trasy sú NRZ, AMI, RZ 50%, RZ 33% a DB. Naopak mierne zaostali modulácie CSRZ a CSRZ-VSB. Ďalej je možné v obrázku vidieť diagram oka pre moduláciu CSRZ, ktorá mala pri 70 km najväčšiu hodnotu BER. Napriek tomu, ako vidieť z diagramu oka je kvalita signálu dostačujúca. Pri 100 km sa hodnoty BER modulácií pohybovali okolo 10^{-5} a pri NRZ to bolo až 10^{-10} . Potvrdil sa teda teoretický predpoklad že po vykompenzovaní chromatickej disperzie pomocou FBG sa dosiahlo lepších hodnôt BER u všetkých modulácií a to aj na prenosovej trase dĺžky 100 km, hoci tieto hodnoty boli pri tejto dĺžke vysoké na zabezpečenie kvalitného prenosu na DWDM-PON sieti. Najviac odolná proti nelinearitám a PMD bola v tomto prípade modulácia NRZ.



Obrázok 5.13: Graf porovnania modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky tras

5.3.4 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s

V tejto časti sú zobrazené výsledky BER hodnôt a Q faktoru pre 20 Gbit/s. V Tabuľke 5.11 sú uvedené hodnoty BER pre vybrané vzdialenosti a v Tabuľke 5.12 sa nachádzajú hodnoty Q faktorov.

Tabuľka 5.11: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	3,47E-08	3,03E-07	5,6E-7	4,92E-7	6,89E-38	2,74E-16	1,19E-5
50	0,001	1	1	0,0009	0,00034	0,00016	1
70	0,0009	1	1	1	1	0,00016	1

Z uvedených výsledkov BER je vidieť, že najlepšie hodnoty dosahovali modulácie AMI a DB ale len pri 10 km. Pri väčších vzdialenostiach boli hodnoty BER pre všetky modulácie vysoké až rovné jednej. Modulácie AMI a DB majú teda s pomedzi uvedených najlepšíu disperznú toleranciu a účinné potláčajú pôsobenie nelineárnych efektov.

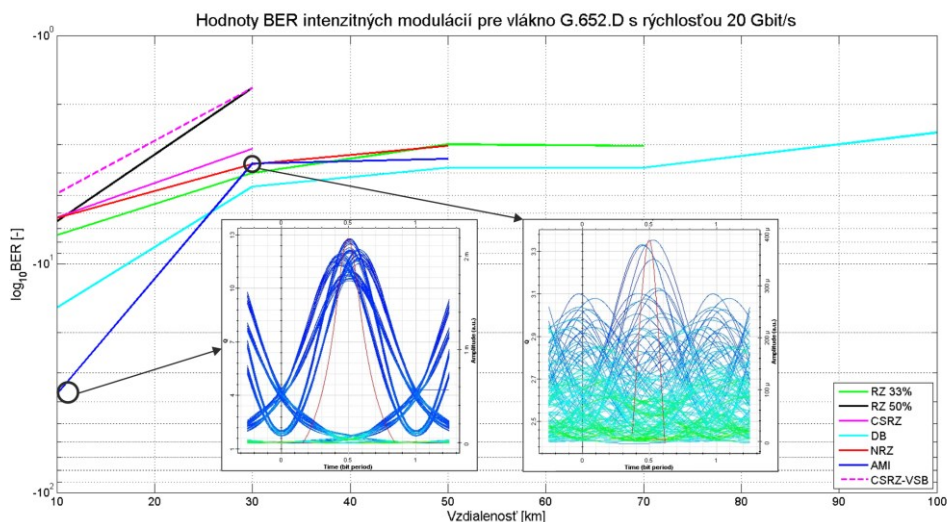
Pri výsledkoch Q faktoru opäť vynikajú AMI a DB modulácie pri 10 km podobne ako pri BER hodnotách. Modulácia DB mala najväčší Q faktor pri veľkých vzdialenostiach s pomedzi modulácií, hoci bola kvalita signálu už zlá.

Tabuľka 5.12: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	5,39	4,96	4,87	4,9	12,8	8,1	4,14
50	3,06	0	0	2,98	3,35	3,58	0
70	3	0	0	0	0	3,58	0

Na obrázku 5.14 je porovnanie hodnôt BER intenzitných modulácií pre všetky vzdialenosti. Vyplýva z neho že najlepších výsledkov dosiahli modulácie AMI a DB. Naopak najhoršie modulácie boli CSRZ-VSB, RZ 50% a CSRZ, ktoré pri 50 km už neboli detekovateľné. Modulácia DB mala hodnotu BER menšiu ako 1 ešte aj pri 100 km, hoci už pre

správnou detekciu nevhodná. Diagramy oka zobrazené v obrázku predstavujú kvalitu signálu AMI modulácií pri 10 km a 30 km. Ako je vidieť pri 30 km je signál pomerne kvalitný, oko je dostačujúco otvorené. Pri 30 km je však už oko uzatvorené a nie je možné detegovať signál.



Obrázok 5.14: Graf porovnania intenzitných modulácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.5 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Nasledujúce tabuľky zobrazujú hodnoty intenzitných modulácií po vykompenzovaní chromatickej disperzie pomocou DCF vlákien pri prenosovej rýchlosti 20 Gbit/s.

Tabuľka 5.13: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	1,7E-144	2,7E-213	0	1,8E-268	3,4E-128
50	2,15E-14	5,10E-11	7,08E-08	3,53E-24	2,79E-29	8,01E-35	5,08E-08
70	4,70E-04	1	9,80E-04	3,00E-05	3,12E-07	9,74E-06	1,50E-03

Hodnoty BER sa po vykompenzovaní chromatickej disperzie u jednotlivých modulácií znížili. Pri vzdialenosti 10 km mali najlepšie hodnoty modulácie RZ 33%, RZ 50%, AMI a DB.

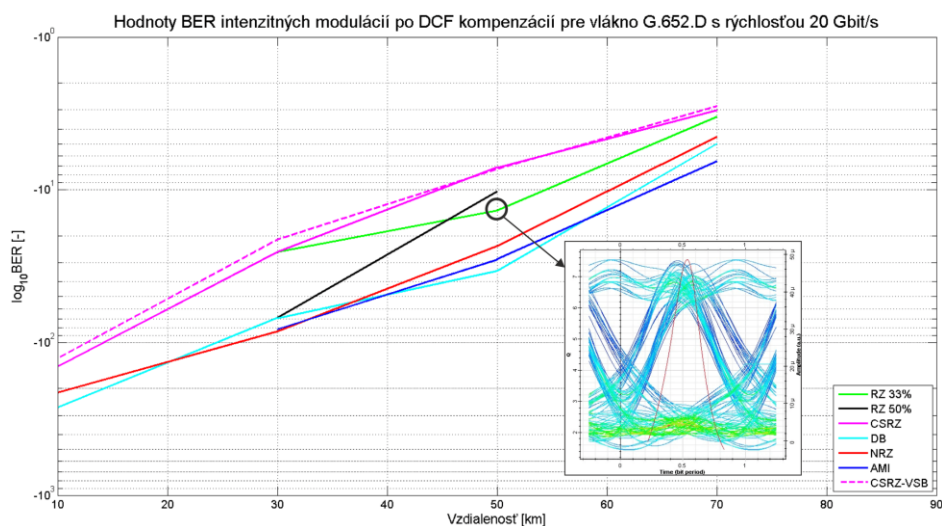
Pre väčšie vzdialenosti vyšli hodnoty BER lepšie pri moduláciách NRZ, AMI a DB. Pri 70 km boli BER hodnoty pri všetkých moduláciách pod štandardnou hodnotou 10^{-12} .

Q faktor mal najväčšie hodnoty pri 10 km u modulácií RZ 33% a AMI. Pri 70 km boli hodnoty Q faktoru nízke na správnu detekciu signálu. Najhoršie dopadla modulácia RZ 50% ktorá mala Q faktor nulový.

Tabuľka 5.14: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	43,24	39,52	25,55	31,15	40	35	24,05
50	7,55	6,46	5,23	10,07	11,16	12,25	5,29
70	3,26	0	3,06	4,01	4,98	4,27	2,92

Pri porovnaní jednotlivých modulácií na ďalšom obrázku pre všetky dĺžky trasy možno vidieť že po vykompenzovaní CD sú na tom najlepšie modulácie AMI, DB a NRZ. Tieto modulácie sú teda odolnejšie na nelineárne efekty a PMD. Pri dĺžke trasy 100 km bola u všetkých modulácií nameraná hodnota BER = 1. V obrázku je ďalej zobrazený diagram oka v 50 km pre moduláciu RZ 33% ktorá dosiahla hodnotu $2,15E-14$. Z diagramu oka je vidieť že je dostatočné otvorené na správnu detekciu hoci je ovplyvnené kolísaním oneskorenia a ISI. Najmenej odolnými moduláciami boli v tejto časti modulácie CSRZ a CSRZ-VSB.



Obrázok 5.15: Graf porovnania modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.6 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

V tomto prípade sú uvedené opäť výsledky BER hodnôt jednotlivých modulácií po vykompenzovaní chromatickej disperzie pomocou FBG.

Tabuľka 5.15: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	9E-147	8,2E-268	0	7,2E-247	7,5E-135
50	1,28E-30	2,47E-16	4,22E-10	6,16E-34	3,67E-37	6,18E-37	8,11E-10
70	2,69E-5	0,0002	1,55E-5	1,4E-11	1,04E-22	3,72E-16	3,99E-6

Podobne ako pri DCF kompenzácií tak aj pri FBG vyšli pri 10 km najlepšie modulácie RZ 33%, RZ 50% a AMI. Pri väčších dĺžkach trasy začali prevládať modulácie AMI, DB a NRZ. Tie mali nízke hodnoty BER aj pri 70 km. V porovnaní s DCF kompenzáciou sa teda dosiahla väčšia vzdialenosť dosahu kvalitného signálu. Jednoduché RZ modulácie sú teda vhodnejšie pri kompenzovaní na krátke trasy.

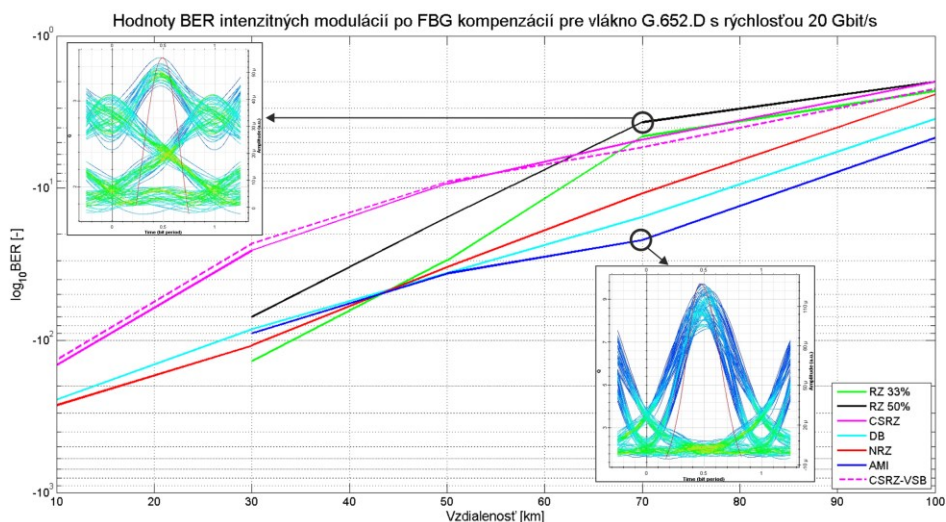
V prípade hodnôt Q faktoru boli na tom najlepšie modulácie RZ 33% a AMI pri 10 km. Pri vzdialenosti 70 km prevládali modulácie AMI a DB pri ktorých bol Q faktor ešte na pomerne dobrej úrovni.

Tabuľka 5.16: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	47,34	40,47	25,76	34,94	40,9	33,53	24,68
50	11,43	8,11	6,1	12,08	12,67	12,63	5,98
70	4,02	3,5	4,12	6,64	9,72	8,05	4,42

V porovnaní modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky na Obrázku 5.16 je vidieť že najlepšou a teda najodolnejšou moduláciou je pri väčších vzdialenostiach AMI modulácia. Pri nižších vzdialenostiach majú dobré hodnoty aj modulácie RZ a DB. Najhoršie yopadli pri vzdialenosti do 50 km modulácie CSRZ a CSRZ-VSB. Diagramy oka pri 70 km

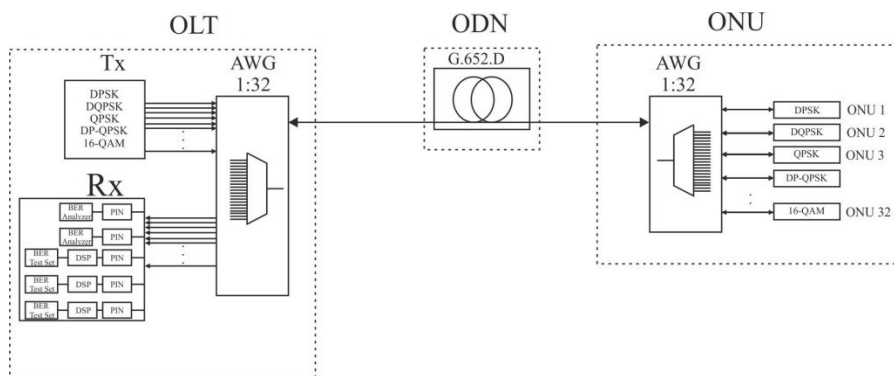
zobrazujú najlepšiu hodnotu BER pri modulácii AMI a najhoršiu hodnotu BER pri modulácii RZ 50%. Diagram oka AMI, ako je vidieť aj z hodnoty BER, poukazuje na dobrú kvalitu signálu. Pri RZ 50% je diagram oka značne degradovaný a signál nebude dobre detegovaný.



Obrázok 5.16: Graf porovnania modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.7 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s

Pri pokročilých moduláciách podobne ako pri intenzitných bol meraný parameter BER a v prípade DPSK a DQPSK modulácií aj Q faktor. Bloková schéma DWDM-PON topológie pokročilých modulácií je zobrazená nižšie.



Obrázok 5.17: Bloková schéma pokročilých modulácií

Pri moduláciách QPSK, DP-QPSK a 16-QAM bol meraný namiesto Q faktoru parameter EVM. Výsledky sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách.

Tabuľka 5.17: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP- QPSK	16-QAM
10	3,25E-6	0,0004	4,48E-12	0	0	0	0
50	0,001	0,01	0,021	0,013	0,02	0	0
70	1	1	1	0,66	0,07	0	0

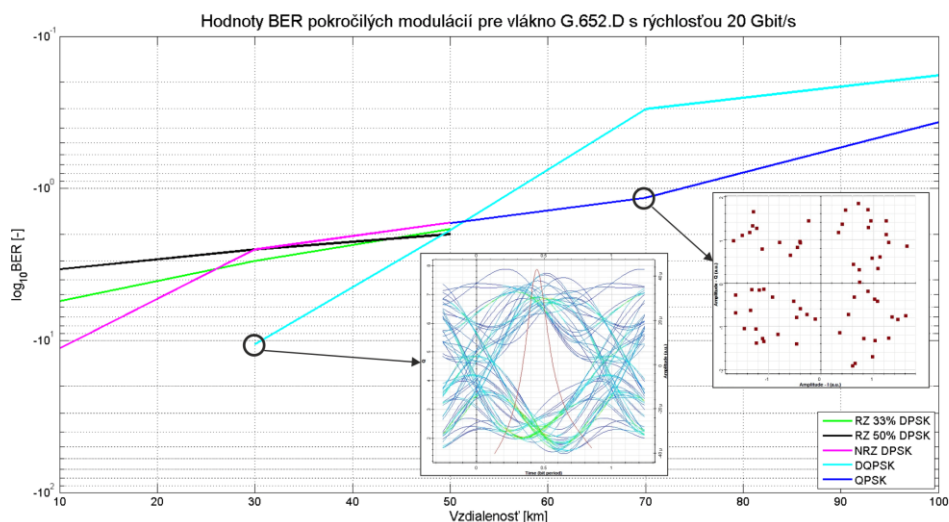
Ako možno vidieť z Tabuľky 5.17 hodnoty BER pre pokročilé modulácie sa značne líšia. Najhoršie výsledky pre 10 km mali modulácie RZ 33% DPSK a RZ 50% DPSK, kde boli hodnoty BER pomerne zle. Naopak ďalšie modulácie mali hodnoty BER nulové. Pre väčšie vzdialenosti sa hodnoty BER zväčšili aj u modulácií DQPSK a QPSK. DP-QPSK a 16-QAM modulácie mali hodnoty BER stále nulové pre všetky vzdialenosti. Možno teda povedať že pre vyššie rýchlosti a veľké vzdialenosti majú tieto modulácie vyššiu odolnosť voči disperziám a nelineárnym efektom. Q faktor bol u možných meraných modulácií najväčší u DQPSK a ďalej u NRZ DPSK. Parameter EVM bol najväčší pri QPSK od 44% do 54% a naopak najmenší pri DP-QPSK kde to bolo od 4,47% do približne 5%. Pri modulácií 16-QAM bol EVM od 8% do 11%.

Tabuľka 5.18: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP- QPSK	16-QAM
10	4,5	3,33	6,76	44,45	51,81	4,47	10,75
50	3,03	2,22	1,83	2,24	44,73	4,94	6,66
70	0	0	0	0,91	54,34	4,70	8,86

Na Obrázku 5.18 je porovnanie modulácií kde hodnoty BER vyšli iné ako nulové. Ako je vidieť DPSK modulácie dosahovali do vzdialenosti 50 km, avšak hodnoty BER tu boli príliš vysoké. DQPSK modulácia mala parameter BER do 30 km nulový a pri 50 km už príliš vysoký na kvalitný prenos. BER QPSK modulácie bol pri 10 km a 30 km nulový a od 50 km sa zhoršoval. Pri DQPSK v 30 km je znázornený diagram oka, kde je signál vplyvom disperzií a ďalších nežiaducich efektov rozkmitaný no aj napriek tomu detekovateľný. Pri QPSK modulácií je v 70 km zobrazená ukážka konšteláčného diagramu, kde jednotlivé vzorky bodov sú značne rozptýlené pomimo svojich pozícií a sú teda zlé detekovateľné.

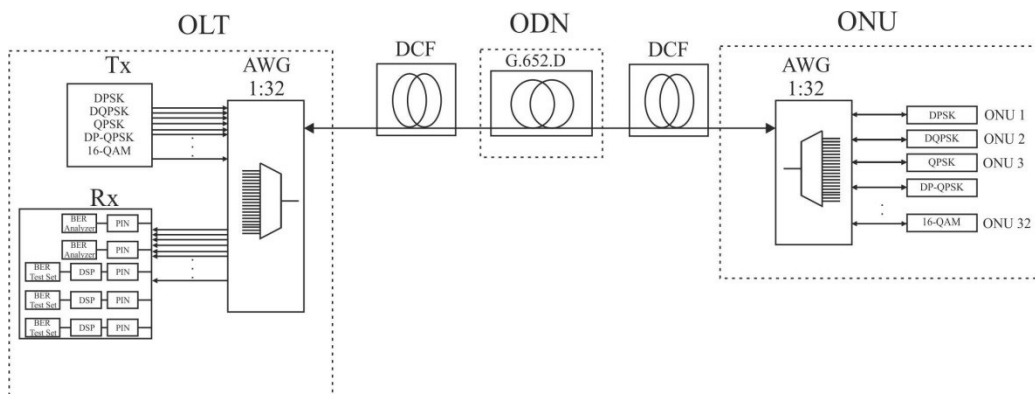
Najlepších hodnôt teda dosiahli v tomto prípade modulácie DP-QPSK a 16-QAM. Ďalšie modulácie s pomerne dobrými výsledkami boli DQPSK a QPSK. Modulácie DPSK pre zadanú rýchlosť a dĺžky neboli vyhovujúce.



Obrázok 5.18: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.8 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Výsledky pokročilých modulácií po DCF kompenzácií chromatickej disperzie predstavujú zlepšenie hodnôt BER najmä pri moduláciách DPSK a DQPSK. Pri moduláciách DP-QPSK a 16-QAM nebola kompenzácia nutná, keďže ich hodnoty BER sa rovnali nule aj bez kompenzácie. Jednotlivé výsledky sú zobrazené v tabuľkách pod blokovou schémou simulácie.



Obrázok 5.19: Blokova schéma pokročilých modulácií s DCF kompenzáciou

Tabuľka 5.19: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	2,15E-77	4,3E-192	1,1E-282	0	0	0	0
50	1,81E-10	4,57E-11	2,2E-116	4,9E-40	0	0	0
70	1	1	0,01	3,19E-5	0,27	0	0

Po vykompenzovaní chromatickej disperzie sa pri 10 km dosiahla výborná kvalita signálu u modulácii DPSK. Najlepšiu hodnotu spomedzi troch typov DPSK mala modulácia NRZ DPSK. Táto modulácia bola najlepšou aj na 50 km spomedzi ostatných DPSK a aj DQPSK. Modulácia QPSK mala hodnotu BER = 1 aj pri 50 km, čo pre porovnanie s nekompenzovanou trasou DWDM-PON topológie v predošlej časti znamenalo vylepšenie dosahu kvalitného signálu. QPSK predstavovala spomedzi týchto modulácií po vykompenzovaní najlepšiu toleranciu voči PMD a nelineárnym efektom. Pri 70 km a 100 km boli modulácie DPSK, DQPSK a QPSK nedostačujúce.

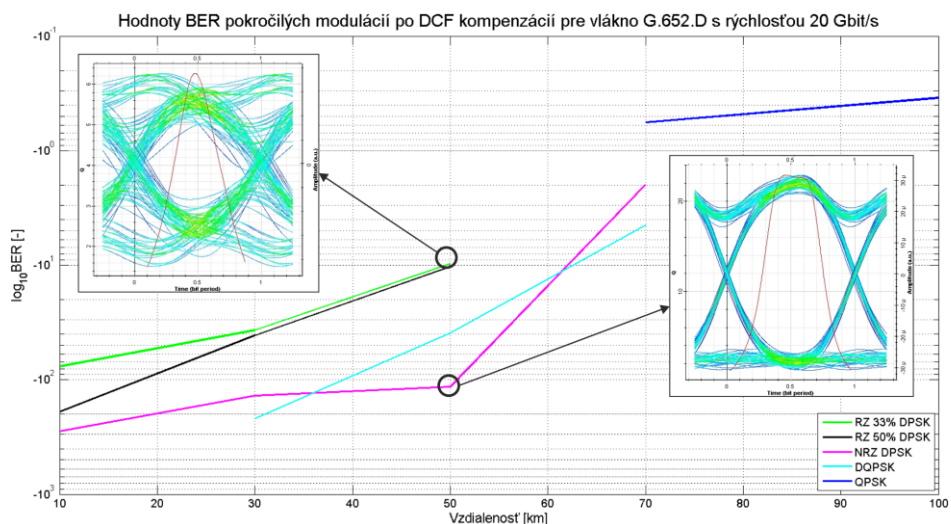
Tabuľka 5.20: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]			
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM	
10	18,58	25,54	35,9	74,28	62,03	4,52	9,75	
50	6,27	6,48	22,9	14,14	13,28	3,22	9,83	
70	0	0	2,3	4	77,5	3,94	9,97	

Po kompenzácií chromatickej disperzie sa nutne zväčšili aj Q faktory daných modulácií, kde dosahovali do 50 km dobré hodnoty. Pre 70 km a 100 km boli tieto hodnoty nulové, respektíve veľmi malé. EVM hodnoty sa pri QPSK pohybovali od 13% až do 77,5%. Pri DP-QPSK sa amplitúdová chyba vektoru pohybovala od 3,22% až do skoro 5%. Pri 16-QAM bola QVM zhruba okolo 10 %.

Na Obrázku 5.20 je opäť uvedené porovnanie modulácií pri ktorých vyšli BER hodnoty väčšie ako 0. Možno tu vidieť že modulácie NRZ DPSK a DQPSK boli do 70 km lepšie v porovnaní s ostatnými DPSK. Najlepšie hodnoty mala na tomto obrázku QPSK modulácia, ktorá mala aj pri 50 km BER hodnotu 0. V obrázku sú zobrazené aj diagramy oka pre NRZ DPSK a 33% DPSK. Pri porovnaní týchto dvoch diagramov je vidieť že signál ma pri NRZ

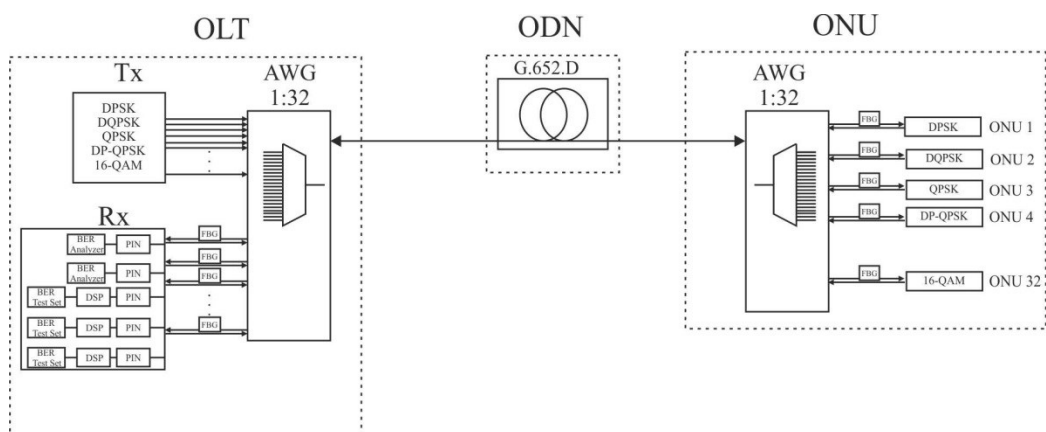
DPSK hladší priebeh a nie je tak rušený ako pri RZ 33% DPSK modulácií. Pri RZ 33% DPSK je značná intersymbolová interferencia a kolísanie oneskorenia. no aj napriek tomu je oko dostatočne otvorené pre správnu detekciu signálu na hodnote okolo $BER 10^{-10}$.



Obrázok 5.20: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.9 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Podobne ako pri intenzitných moduláciách tak aj pri pokročilých je FBG kompenzácia umiestnená na konci trasy ako zobrazuje nasledujúca bloková schéma.



Obrázok 5.21: Bloková schéma pokročilých modulácií s FBG kompenzáciou

Vykompenzovaním chromatickej disperzie pomocou FBG sa dospelo k nasledujúcim výsledkom zobrazených nižšie. Kompenzovanie modulácií DP-QPSK a 16-QAM opäť nebolo nutné keďže mali hodnotu BER nulovú.

Tabuľka 5.21: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	3,77E-90	7,9E-168	0	0	0	0	0
50	2,98E-18	1,44E-15	2,98E-18	2E-139	0	0	0
70	3,84E-5	0,002	2,5E-7	2,49E-32	0	0	0

Hodnoty BER sa pri DPSK moduláciách znížili po FBG kompenzácií viac ako po DCF. Pri 50 km dosahovali všetky modulácie kvalitných hodnôt BER. DQPSK modulácia mala dostatočne nízku hodnotu BER aj pri 70 km zatiaľ čo DPSK modulácie mali BER hodnotu už vysokú. Pri QPSK modulácií bola hodnota BER nulová aj pri 70 km, čo predstavuje zlepšenie naproti predošlej kompenzácií pomocou DCF. Lepšiu odolnosť voči PMD, nelineárnym efektom a šumom mali po vykompenzovaní modulácie QPSK, DQPSK a NRZ DPSK.

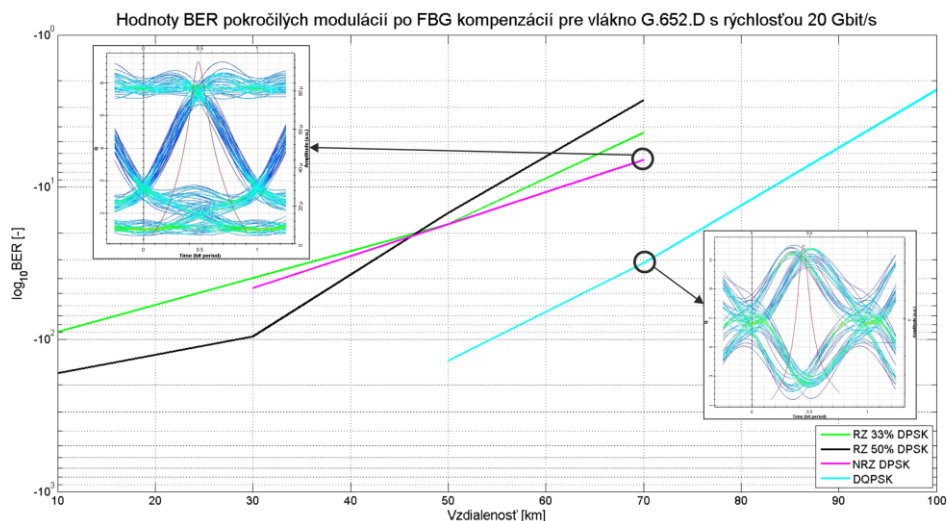
EVM hodnoty sa pri QPSK pohybovali okolo 20% až 30%, pri modulácií DP-QPSK okolo 5% a pri 16-QAM okolo 7%. Parameter Q faktor pri odpovedajúcich moduláciách bol aj pri 50 km dostatočne veľký.

Tabuľka 5.22: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	13,23	27,5	38,65	73,7	33,48	5,72	6,35
50	8,63	7,89	8,61	28,43	20,33	4,22	7,65
70	3,95	2,86	5,01	11,86	20,12	4,96	7,49

Obrázok nižšie porovnáva modulácie s hodnotou BER väčšou ako nula. Tu je vidieť že najlepšie výsledky dosiahli, ako už bolo spomenuté modulácie DQPSK a NRZ DPSK. Pri týchto moduláciách sú v 70 km zobrazené diagramy oka. Pri NRZ DPSK je diagram oka napriek už nižšej hodnote BER pomerne dobrý a je rozpoznateľný signál. Pri DQPSK je signál

na základe diagramu oka dobre detekovateľný. Oko je otvorené dostatočne hoci je znateľné mierne kolísanie oneskorenia. Pri 100 km majú všetky zobrazené modulácie hodnoty BER vysoké.



Obrázok 5.22: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.10 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s

V tejto časti boli zaznamenávané totožné parametre ako pri 20 Gbit/s. Výsledku sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách.

Tabuľka 5.23: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	0,007	0,04	0,001	0,0015	0	0	0
50	1	1	1	1	0,42	0	0
70	1	1	1	1	0,45	0	0

Hodnoty BER ako je vidieť z tabuľky boli pre modulácie DPSK a DQPSK nedostačujúce už pri vzdialenosti 10 km. Naopak modulácie QPSK, DP-QPSK a 16-QAM mali hodnoty BER = 0. Pri 70 km modulácia QPSK už taktiež dosiahla vysokú hodnotu BER. Modulácie DP-QPSK a 16-QAM mali nulové hodnoty BER aj pri 70 km. Možno teda povedať

že sú najodolnejšie pre vysoké rýchlosti a dĺžky. DPSK a DQPSK modulácie sú v tomto prípade veľmi rušené disperziami a nelineárnymi efektmi.

V tabuľke 5.24 sú zobrazené hodnoty Q faktoru a parameter EVM. Q faktory dosahujú pri 10 km nízkych hodnôt a pri väčších vzdialenostiach je ich hodnota nulová. EVM hodnoty mali najnižšie modulácie DP-QPSK a 16-QAM. Najvyššie hodnoty boli pri modulácií QPSK. DP-QPSK modulácia patrí teda medzi najodolnejšie na disperzie a nelineárne efekty.

Tabuľka 5.24: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	2,41	1,7	2,98	3,45	39,93	3,47	8,73
50	0	0	0	0	60,86	4,48	5,22
70	0	0	0	0	60,72	5,53	7,83

5.3.11 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Po vykompenzovaní chromatickej disperzie pomocou DCF boli namerané nasledujúce hodnoty.

Tabuľka 5.25: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	1,81E-10	5,8E-108	7,81E-47	0	0	0	0
50	0,0001	4,57E-11	2,61E-13	8,85E-11	0	0	0
70	1	1	1	0,5	0	0	0

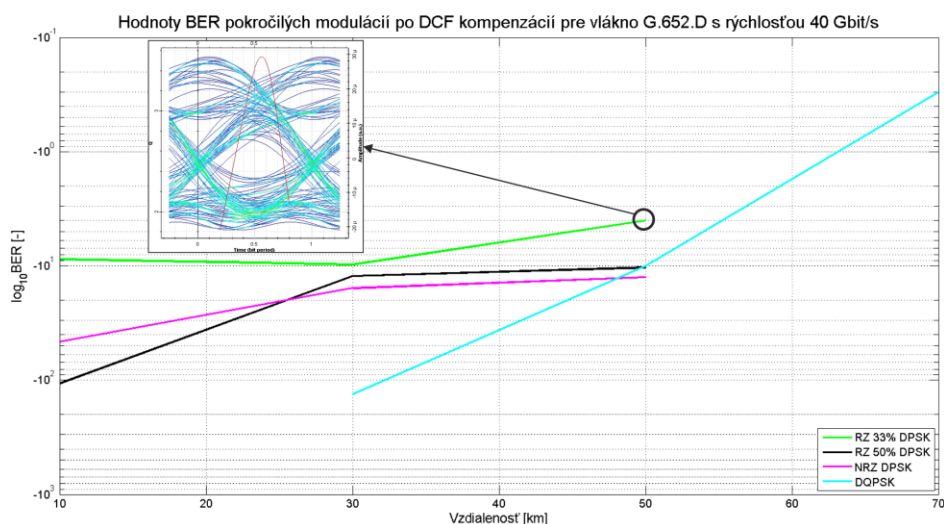
Hodnoty BER pri DPSK a DQPSK moduláciách sa po vykompenzovaní chromatickej disperzie zvýšili. Pri 10 km dosahovala hodnota BER pri DQPSK hodnotu 0. DP-QPSK a 16-QAM mali hodnoty aj BER kompenzácie nulové takže nebolo nevyhnutné ich kompenzovať. Pre väčšie vzdialenosti konkrétne 50 km mali hodnoty BER výborné modulácie QPSK a aj modulácia NRZ DPSK. Pri 70 km a 100 km boli hodnoty BER nedostačujúce pri DPSK a aj DQPSK moduláciách.

Pri Q faktore boli opäť hodnoty pri 10 km vynikajúce. Pri 50 km bol Q faktor pri moduláciách okrem RZ 33% DPSK pomerne dobrý. Pri 70 km a 100km bol Q faktor nulový respektíve veľmi malý. Pri EVM parametre dosahovala najlepšie hodnoty modulácia 16-QAM. Najhoršie hodnoty boli pri QPSK modulácií. V porovnaní EVM bez kompenzácie sa hodnoty pri QPSK znížili, pri DP-QPSK naopak zvýšili. Pri 16-QAM sa hodnoty EVM pohybovali od 3,73% do 16,79%.

Tabuľka 5.26: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	6,27	22,03	14,31	77,45	14,35	9,23	6,12
50	3,53	6,48	5,23	6,86	9,52	9,96	3,73
70	0	0	0	2,05	17,34	10,53	16,79

Pri zobrazení modulácií ktorých BER hodnoty boli vyššie ako nulové možno vidieť, že najlepšiu odolnosť po vykompenzovaní s pomedzi týchto modulácií mala DQPSK. Naopak najhoršie dopadla RZ 33% DPSK, pri ktorej je v 50 km zobrazený aj diagram oka. Na tomto diagrame je možnosť vidieť rozkmitaný diagram oka s veľkým rušením čo sa odzrkadľuje aj na hodnote BER.



Obrázok 5.23: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.3.12 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

V tejto časti sa nachádzajú hodnoty BER po FBG kompenzácií pri prenosovej rýchlosti 40 Gbit/s.

Tabuľka 5.27: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	1,09E-09	7,6E-125	1,41E-48	0	0	0	0
50	0,01	0,000063	7,99E-6	1,12E-34	0	0	0
70	1	1	0,001	4,07E-5	0	0	0

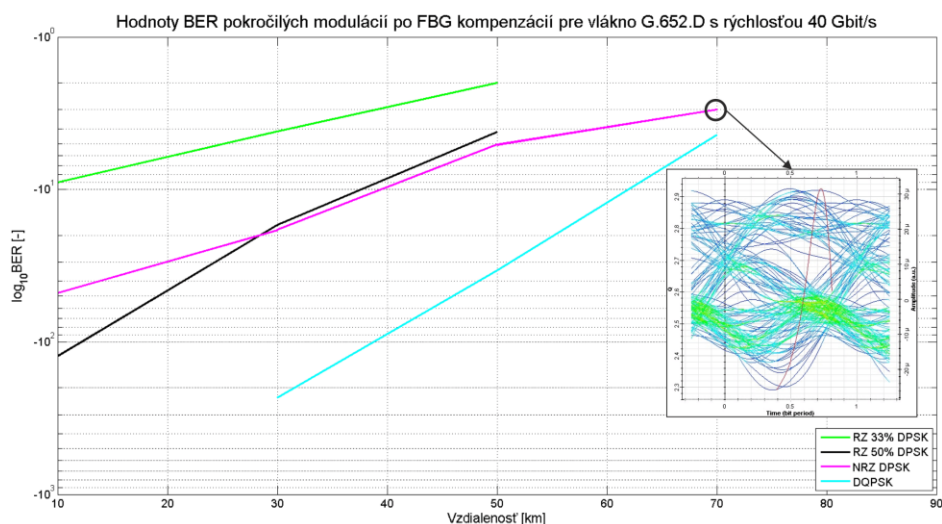
Hodnoty BER ako je vidieť z Tabuľky 5.27 boli pri 10 km nulové pri moduláciách QPSK a DQPSK. Dobrých hodnôt dosiahli aj modulácie RZ 50% DPSK a NRZ DPSK. Naopak najhoršie dopadla modulácia RZ 33% DPSK. Pri vzdialenosti 50 km mali všetky DPSK modulácie už vysoké hodnoty BER. DPSK modulácie sú teda po vykompenzovaní vhodné pre krátke trasy. Pre dlhšie je vhodné použiť zložitejšie modulácie, ktoré sú odolnejšie.

V Tabuľke 5.28 sú zobrazené hodnoty Q faktoru a EVM. Q faktor podobne ako BER bol pri moduláciách DPSK v 10 km dostatočne vysoký. Pri vyšších vzdialenostiach mali najlepší Q faktor modulácie NRZ DPSK a DQPSK. V prípade EVM boli najvyššie hodnoty pri QPSK modulácií. Tieto hodnoty boli vyššie v porovnaní s DCF kompenzáciou. Pri DP-QPSK boli hodnoty o približne 5% do 16,8%. EVM pri 16-QAM sa pohybovalo od 6,72 % do 13,28%. V porovnaní s DCF kompenzáciou boli v tomto prípade tieto hodnoty mierne vyššie.

Tabuľka 5.28: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	5,97	23,73	14,59	77,78	50,90	5,01	6,72
50	2,26	3,83	4,29	12,88	53,18	3,73	13,28
70	0	0	2,93	4,32	59,93	16,8	7,07

Graf zobrazený v nasledujúcom obrázku porovnáva modulácie s hodnotami väčšími ako $BER = 0$. Z neho vyplýva, že opäť najodolnejšou moduláciou na nelineárne efekty a PMD je s pomedzí uvedených DQPSK. Naopak najhoršou je RZ 33% DPSK. V 70 km mala modulácia NRZ DPSK menšiu hodnotu BER ako 1. Pri zobrazení diagramu oka tomto mieste môžeme vidieť, že správne detegovanie tohto signálu je obťažné. Najodolnejšie modulácie pre prenosovú rýchlosť 40 Gbit/s sú teda 16-QAM, DP-QPSK, QPSK a DQPSK.



Obrázok 5.24: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.4 Výsledky simulácií pre optické vlákno G.654.B v zostupnom smere

Táto časť uvádza výsledky simulácií pre optické vlákno G.654.B v zostupnom smere. Opäť sú tu uvedené pre prehľadnosť tabuľky s výsledkami pre prenosové rýchlosti 10 Gbit/s a 20 Gbit/s a dĺžky trás 10 km, 50 km, 70 km v prípade intenzitných modulácií. Pri 40 Gbit/s a 100 Gbit/s mali všetky intenzitné modulácie hodnotu $BER = 1$ respektíve pri 10 km veľmi vysokú na kvalitný prenos. Výsledky pokročilých modulácií sú uvedené pre prenosové rýchlosti 20 Gbit/s a 40 Gbit/s a dĺžky trás 10 km, 50 km a 70 km. Ďalšie výsledky sú uvedené v prílohách na DVD.

5.4.1 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s

Nasledujúce tabuľky zobrazujú výsledky BER a Q faktoru pre prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s.

Tabuľka 5.29: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	8,21E-13	3,48E-76	2,8E-205	1,02E-98	3,19E-20
50	2,65E-07	1,60E-07	0,002	3,55E-05	6,85E-17	3,61E-08	0,001
70	1,58E-05	0,001	0,001	0,0003	0,0009	5,63E-05	0,001

Hodnoty BER zobrazené v Tabuľke 5.29 poukazujú na veľmi dobre výsledky v prípade vzdialenosti 10 km. Najlepšie BER (BER= 0) dosiahli modulácie RZ 33% a RZ 50%. Pre väčšie vzdialenosti mali najlepšie hodnoty BER modulácie RZ 33% a DB. Možno teda povedať že boli spomedzi vybraných najodolnejšie na vplyv disperzií a ďalších rušivých faktorov.

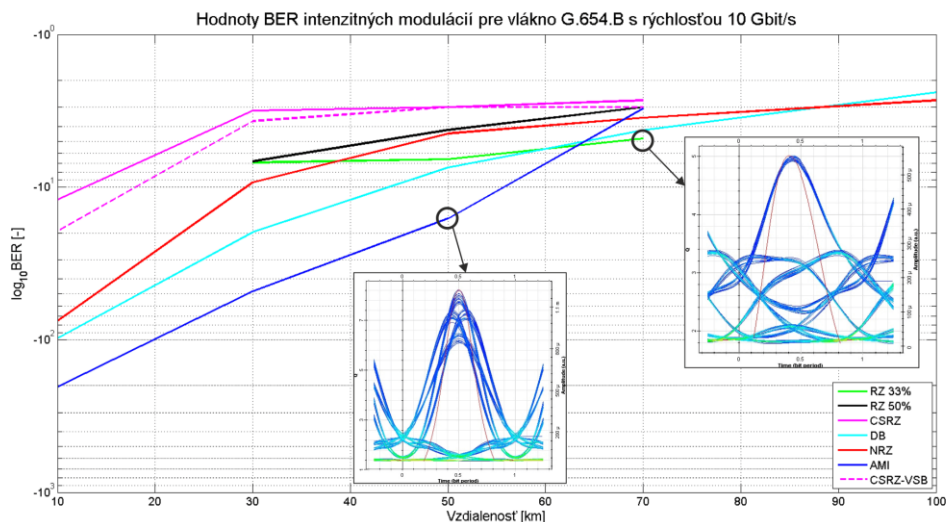
Pri výsledkoch Q faktoru je vidieť že najlepšiu hodnotu dosiahli pre 10 km modulácie RZ 33% a RZ 50%. Najmenší Q faktor mali modulácie CSRZ a CSRZ-VSB. Pri 50 km vynikala hodnota Q faktoru len pri modulácií AMI, ktorá mala navyše aj hodnotu BER na kvalitnej úrovni pre detekciu.

Tabuľka 5.30: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	69,15	76,16	7,03	18,43	30,54	21,05	9,1
50	5,01	3,84	2,82	3,91	8,22	5,34	2,78
70	4,11	2,95	2,76	3,37	3,09	3,79	2,96

Na obrázku 5.25 je zobrazené porovnanie všetkých intenzitných modulácií pre všetky dĺžky trasy. Najodolnejšími moduláciami sú AMI a DB. Ďalej tu možno zaradiť aj RZ 33% a NRZ. Najhoršie výsledky Ber mali modulácie CSRZ a CSRZ-VSB. Modulácie NRZ a DB boli ešte detekovateľné pri dĺžke 100 km ale ich hodnoty BER boli príliš vysoké na kvalitný prenos. Diagram oka pri AMI modulácií zobrazuje kvalitu signálu pri 50 km. Ako je vidieť oko je ešte dobre otvorené a kvalita signálu je na dostačujúcej úrovni. Pri diagrame oka RZ 33% pri

70 km možno vidieť kvalitu signálu na nižšej úrovni no najlepšej spomedzi modulácií na danej dĺžke.



Obrázok 5.25: Graf porovnania intenzitných modulácií pre všetky dĺžky trasy

5.4.2 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

V tejto časti sú zobrazené výsledky simulácií po DCF kompenzácií chromatickej disperzie pre prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s.

Tabuľka 5.31: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	0	0	0	0	0
50	1,28E-60	2,3E-108	7,45E-51	1,1E-127	6,7E-125	6,52E-78	2,22E-36
70	4,46E-08	4,23E-13	4,96E-13	1,92E-18	7,19E-15	1,80E-11	5,76E-12

Z hodnôt BER je vidieť, že po vykompenzovaní chromatickej disperzie mali všetky modulácie pri 10 km výborné výsledky. Pri 50 km sú výsledky BER u všetkých modulácií taktiež veľmi dobré. Modulácie sa začínajú odlišovať pri 70 km, kde za menej odolné na PMD

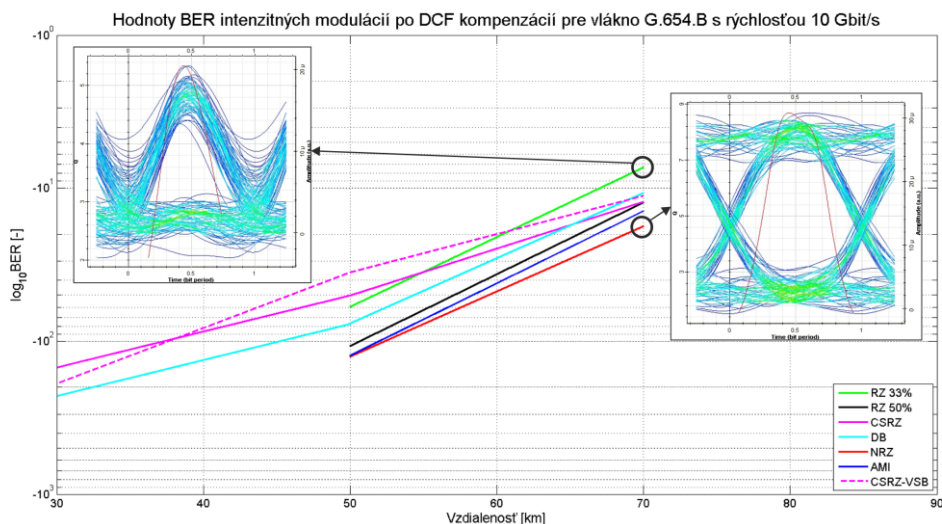
a nelineárne efekty po DCF kompenzácií možno označiť RZ 33% a DB. Tieto modulácie mali BER pod hodnotou 10^{-12} .

Tieto odolnosti modulácií možno potvrdiť aj pri výsledkoch Q faktoru, kde pri vzdialenostiach do 70 km mali modulácie vysoké hodnoty. Pri 70 km mali najmenšie hodnoty Q faktoru spomínané modulácie RZ 33% a DB.

Tabuľka 5.32: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	91,19	104,11	73,89	119,82	126,51	41,77	70,37
50	16,37	22,08	14,94	24	23,74	18,64	12,53
70	5,34	7,15	7,12	8,68	7,68	6,61	6,78

Na Obrázku 5.26 možno vidieť že všetky modulácie po DCF kompenzácií dosiahli pri 100 km hodnoty BER = 1. Pri vzdialenostiach 10 km a 30 km mali modulácie RZ 33%, RZ 50%, NRZ a AMI hodnoty BER rovné nule. Diagramy oka pri 70 km zobrazujú najlepšiu a najhoršiu moduláciu v danej vzdialenosti. Najlepšimi moduláciami sú teda v tomto prípade NRZ, AMI a RZ 50%.



Obrázok 5.26: Graf porovnania intenzitných modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.4.3 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

Nasledujúce tabuľky zobrazujú výsledky BER a Q faktoru po vykompenzovaní CD pomocou FBG kompenzácie.

Tabuľka 5.33: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

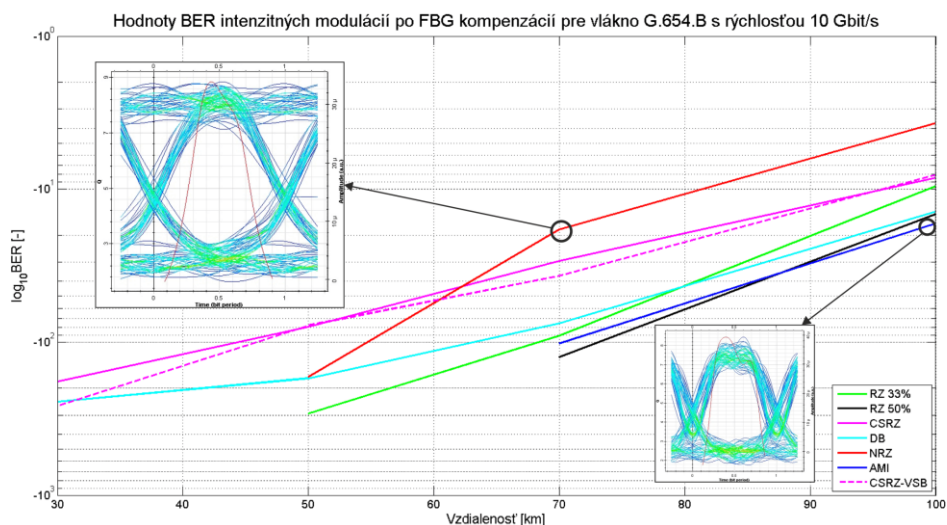
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	0	0	0	0	0
50	2E-292	0	6,21E-80	3,9E-169	0	7,1E-173	1,82E-78
70	1,07E-91	7,6E-127	2,69E-30	4,69E-19	7,3E-103	3,58E-76	1,49E-37

Z výsledkov BER zobrazených v Tabuľke 5.33 možno usúdiť že všetky modulácie sú po vykompenzovaní CD dostatočne odolné na kvalitný prenos. To možno potvrdiť aj z hodnôt Q faktoru zobrazených v Tabuľke 5.34, ktoré sú dostatočne vysoké pre správne zistenie informácie s prenášaného signálu.

Tabuľka 5.34: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	93,38	119,49	69,61	158,6	142,48	39,5	83,58
50	36,52	43,43	18,88	51,02	42,12	28	18,7
70	20,27	23,92	11,36	27,69	21,5	18,43	12,74

Na obrázku nižšie možno pozorovať, že hodnoty BER pri 100 km boli pri moduláciách AMI, RZ 50% a DB ešte pomerne kvalitné, čo je vidieť aj na diagrame oka pri AMI modulácií. Diagram oka pri NRZ modulácií v 70 km možno porovnať s predchádzajúcou kompenzáciou kde mal zobrazený signál podobne kvalitný diagram.



Obrázok 5.27: Graf porovnania intenzitných modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.4.4 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s

V tejto časti sú uvedené výsledky BER a Q faktoru intenzitných modulácií pre prenosovú rýchlosť 20 Gbit/s.

Tabuľka 5.35: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s

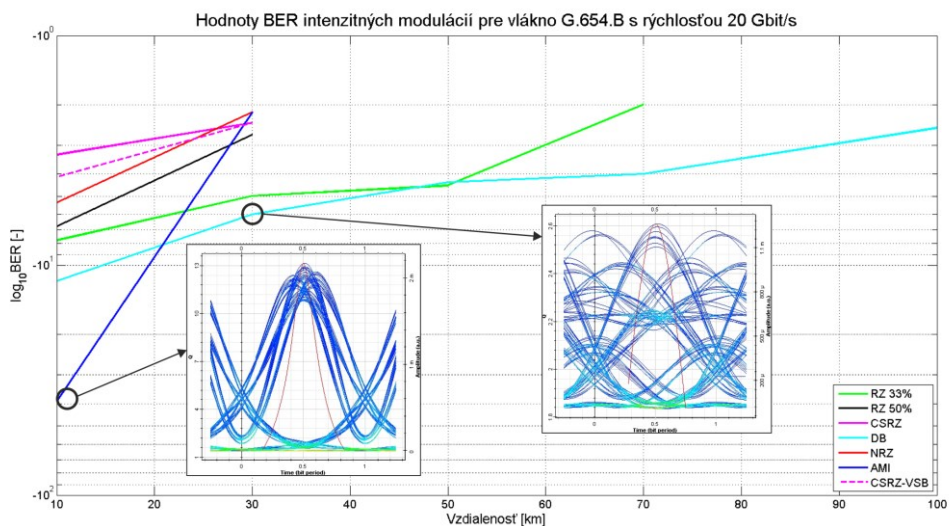
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	1,70E-08	1,63E-07	0,0005	4,55E-06	6,36E-40	1,91E-12	7,60E-05
50	3,19E-05	1	1	1	1	4,53E-05	1
70	0,01	1	1	1	1	0,0001	1

Hodnoty BER pri rýchlosti 20 Gbit/s a vzdialenosti 10 km dosahovali dobrých výsledkov len pri moduláciách AMI a DB. Pri väčších vzdialenostiach už boli hodnoty BER vysoké u všetkých modulácií. Pri výsledkoch Q faktoru taktiež možno vidieť že najvyššie hodnoty boli pri 10 km u modulácií AMI a DB. V tomto prípade teda modulácie AMI a DB sú ešte odolné pri 10 km na rušivé efekty.

Tabuľka 5.36: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	5,51	5,09	3,19	4,43	13,15	6,91	3,69
50	3,83	0	0	0	0	3,91	0
70	2,1	0	0	0	0	3,69	0

V prípade porovnania modulácií na všetkých dĺžkach trasy vidieť, že všetky modulácie boli pri 30 km a viac veľmi ovplyvňované disperziami. To možno vidieť aj z diagramu oka modulácie DB, ktoré je značne rozkmitané. Pri 10 km bola najlepšou moduláciou AMI čo je zase vidieť z diagramu oka v tomto bode. Najhoršie dopadli modulácie CSRZ, CSRZ-VSB a NRZ.



Obrázok 5.28: Graf porovnania intenzitných modulácií pre všetky dĺžky trasy

5.4.5 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Použitím DCF na vykompenzovanie CD pri 20 Gbit/s sa dosiahlo nasledujúcich výsledkov BER a Q faktoru zobrazených v tabuľkách.

Tabuľka 5.36: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

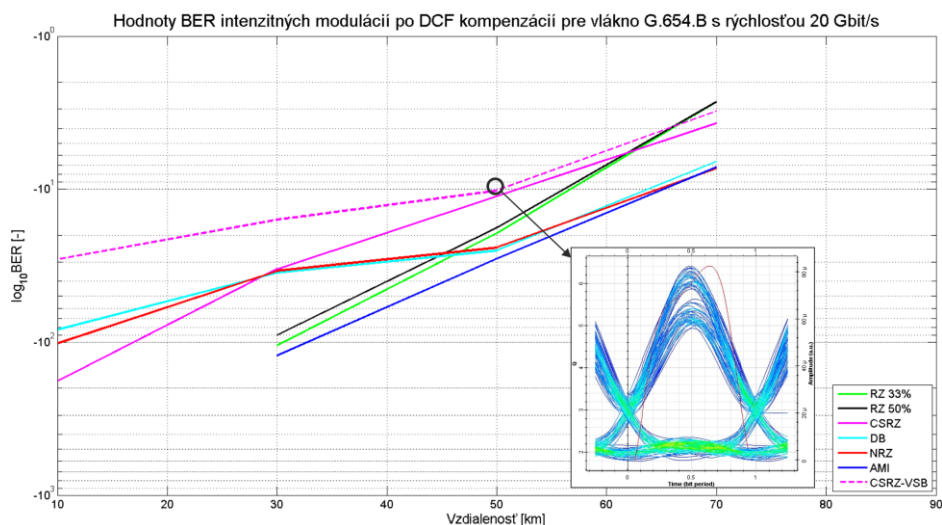
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	5,4E-181	2,0E-102	0	1,66E-83	1,99E-29
50	3,82E-20	1,07E-18	7,20E-12	7,29E-25	2,67E-29	5,54E-26	6,07E-11
70	0,002	0,002	0,0002	4,95E-08	5,92E-08	2,43E-07	0,0008

Po vykompenzovaní CD sa odolnosť na PMD a nelineárne efekty uvedených modulácií zvýšila. Všetky modulácie až na CSRZ-VSB dosahovali pri 50 km nízkych hodnôt BER. Pri 10 km boli najlepšie modulácie RZ 33%, RZ 50% a AMI. Pri 70 km sa hodnoty BER dostali už na vysoké hodnoty. Lepšie na tom boli modulácie NRZ, AMI a DB pri ktorých sa BER pohybovali okolo 10^{-8} . Podobné výsledky boli dosiahnuté aj pri Q faktore, kde boli dostatočne vysoké hodnoty ešte na 50 km.

Tabuľka 5.37: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	46,97	40,95	28,65	33,8	39,35	34,95	27,47
50	9,11	8,74	6,73	12,27	11,16	12,45	6,4
70	2,85	2,85	3,41	5,32	5,29	5,02	3,09

Ako možno vidieť z dole uvedeného obrázka, najlepšimi moduláciami teda boli AMI, DB, NRZ. Najhoršiu odolnosť mala modulácia CSRZ-VSB. Práve pri tejto modulácii je v 50 km uvedený diagram oka na ktorom je signál ešte pomerne málo rušený. Pri 100 km mali všetky modulácie hodnotu BER = 1.



Obrázok 5.29: Graf porovnania intenzitných modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.4.6 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

V nasledovných tabuľkách sú uvedené opäť výsledky BER a Q faktoru pre prenosovú rýchlosť 20 Gbit/s po použití FBG kompenzácie.

Tabuľka 5.38: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

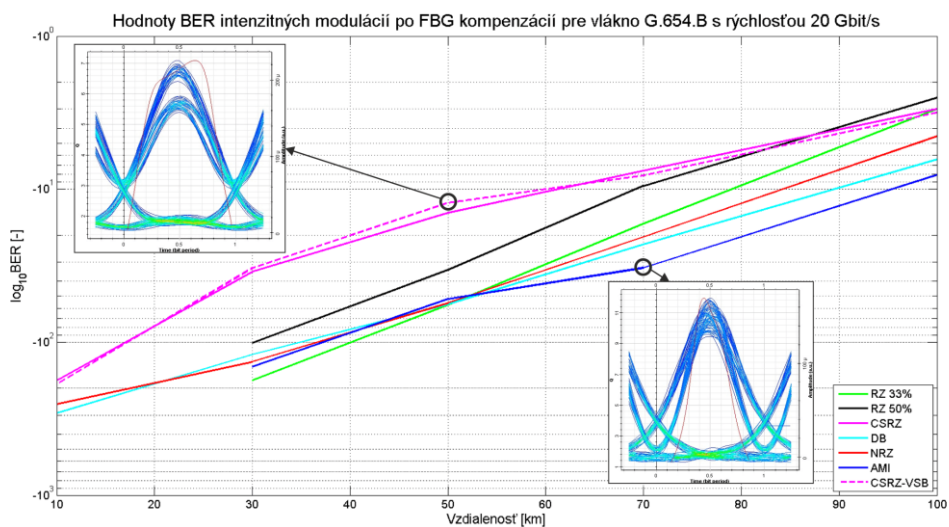
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	9,9E-180	9E-256	0	4,9E-292	9,7E-189
50	4,13E-58	1,64E-34	5,46E-15	3,83E-56	6,41E-53	2,40E-57	4,92E-13
70	1,42E-17	2,90E-10	2,55E-08	3,07E-21	2,29E-33	1,44E-23	7,24E-09

Odolnosť modulácií po vykompenzovaní CD pomocou FBG narástla. Uvedené modulácie dosahujú lepších výsledkov aj oproti DCF kompenzácií. Pri 70 km možno pozorovať najlepšie hodnoty pri moduláciách RZ 33%, NRZ, AMI a DB. Hodnoty Q faktoru dosiahli vyšších boli taktiež na dostatočne veľkých úrovniach. Najmenšiu hodnotu pri 70 km mali modulácie CSRZ a CSRZ-VSB.

Tabuľka 5.39: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	53,19	44	28,55	34,14	39,9	36,5	29,27
50	16,02	12,19	7,7	15,73	15,25	15,91	7,09
70	8,44	6,19	5,42	9,37	11,95	9,93	5,61

V porovnaní modulácií pre všetky dĺžky trasy uvedeným v grafe na Obrázku 5.30 je vidieť že opäť najlepšie hodnoty BER mali AMI, DB, NRZ a RZ 33%. Tieto modulácie sú teda dostatočne odolné na PMD a nelineárne efekty do dĺžky 70 km. Pri 100 km sa hodnoty BER pri moduláciách AMI, DB a NRZ pohybovali na úrovniach od 10^{-5} po 10^{-9} . Diagram oka pri najhoršej modulácii v 50 km (CSRZ-VSB) predstavuje pomerne dobrú kvalitu signálu. Pri 70 km a diagrame oka najlepšej modulácie v tej vzdialenosti (AMI) vidieť dobre otvorené oko s miernym kolísaním oneskorenia a ISI.



Obrázok 5.30: Graf porovnania intenzitných modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.4.7 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s

Pri simulácií pokročilých modulácií pre vlákno G.654.B boli namerané nasledujúce výsledky zobrazené v tabuľkách.

Tabuľka 5.40: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	0,0008	0,0005	6,90E-11	0	0	0	0
50	0,027	0,001	0,01	0,5	0	0	0
70	1	1	1	0,5	0	0	0

Hodnoty BER pri 10 km mali najlepšie modulácie DQPSK, DP-QPSK a 16-QAM. DP-QPSK a 16-QAM modulácie mali BER rovné 0 pre všetky dĺžky trasy a možno ich teda v tomto prípade označiť za najodolnejšie na disperzie a nelineárne efekty. QPSK modulácia mala až pri 100 km hodnotu BER vysokú (BER = 0,26). DPSK modulácie mali pre všetky vzdialenosti vysoké BER okrem NRZ DPSK pri 10 km, kde bola hodnota BER = 6,9E-10.

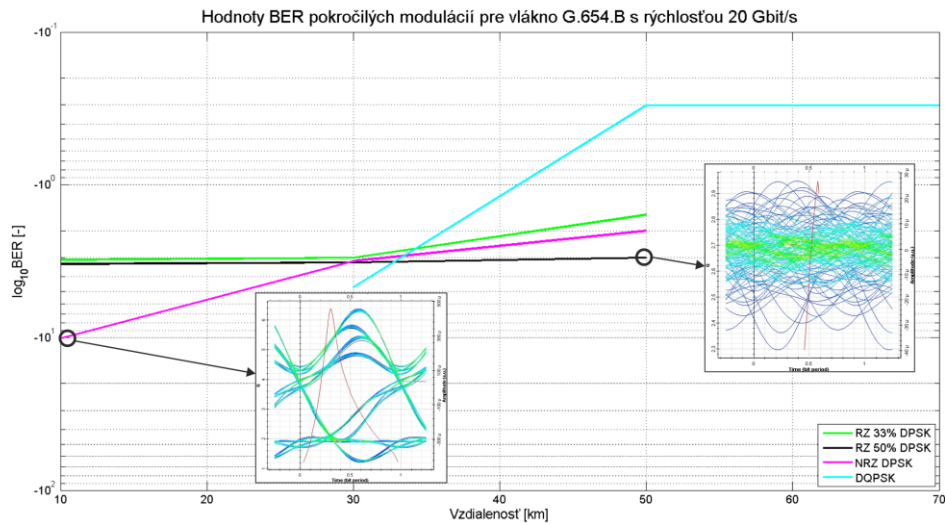
Hodnoty Q faktoru mali pri 10 km najväčšie NRZ DPSK a DQPSK. Pri vyšších vzdialenostiach boli hodnoty príliš nízke. EVM hodnoty mala najnižšie modulácia DP-QPSK, ďalej nasledovala 16-QAM nakoniec s najvyššími EVM QPSK. Možno teda povedať že DP-QPSK bola v tomto prípade najlepšou moduláciou.

Tabuľka 5.41: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	3,12	3,25	6,37	42,07	6,11	6,3	6,27
50	1,89	2,94	2,28	1,07	25,29	4,96	9,84
70	0	0	0	1,05	30,89	4,85	8,53

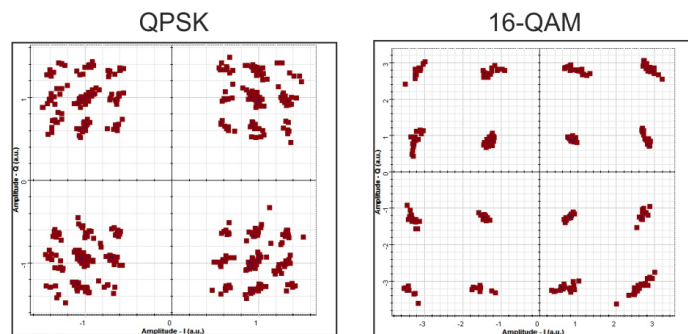
Nasledujúci obrázok zobrazuje porovnanie modulácií pri ktorých BER vyšlo väčšie ako nulové. Je tu vidieť že DPSK modulácie majú do 30 km najhoršie hodnoty. Naopak modulácia

DQPSK mala do 30 km najlepšie hodnoty spomedzi uvedených. Pri väčších vzdialenostiach boli hodnoty BER príliš vysoké u všetkých modulácií.



Obrázok 5.31: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií pre všetky dĺžky trasy

Pre ukážku je na nasledujúcom obrázku zobrazený konštelčný diagram modulácií QPSK a 16-QAM pri vzdialenosti 50 km. Na ňom možno potvrdiť že najväčšie hodnoty EVM má QPSK, keďže jednotlivé vzorky nie sú presne zoskupené na svojich miestach. Pri 16-QAM sa jednotlivé vzorky len mierne vychýľujú zo svojich ideálnych pozícií.



Obrázok 5.32: Konštelčné diagramy pre QPSK a 16-QAM pri 50 km

5.4.8 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Nasledujúce tabuľky zobrazujú výsledky pokročilých modulácií pre prenosovú rýchlosť 20 Gbit/s po vykompenzovaní CD pomocou DCF.

Tabuľka 5.42: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	2,79E-14	0	0	0	0	0	0
50	0,002	7,01E-12	9,32E-12	1,35E-48	0	0	0
70	1	1	0,003	2,14E-05	0	0	0

Pri 10 km boli hodnoty BER rovné nule pri všetkých moduláciách okrem RZ 33% DPSK, kde bola hodnota vyššia no dostatočná pre kvalitný prenos. Modulácie QPSK, DP-QPSK a 16-QAM dosahovali hodnôt BER = 0 aj bez kompenzácie. Pri 50 km sa hodnoty pri DPSK a DQPSK moduláciách zvýšili. Najväčšiu mala RZ 33% DPSK. Pri 70 km a 100 km boli hodnoty pri moduláciách DPSK a DQPSK už príliš vysoké.

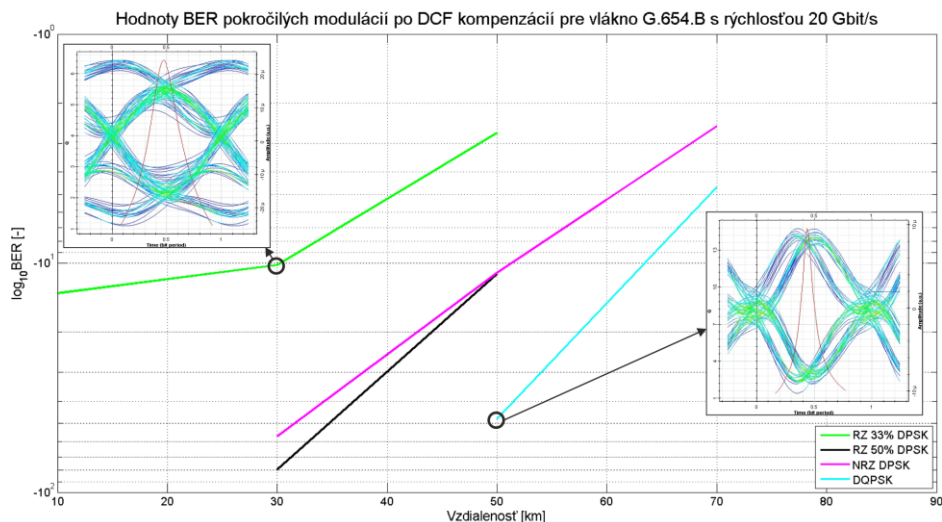
Hodnoty Q faktoru boli najvyššie pri 10 km. Pri 50 km mala najmenšiu hodnotu tak ako v prípade BER modulácia RZ 33% DPSK. Pri EVM výsledkoch dopadla najlepšie modulácia DP-QPSK. Pri QPSK možno pozorovať po vykompenzovaní CD zníženie hodnôt EVM. Modulácia 16-QAM mala v tomto prípade najvyššie hodnoty.

Tabuľka 5.43: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]			
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM	
10	7,51	58,42	57,25	80,41	4,65	4,27	25,35	
50	2,8	6,75	6,71	9,41	7,18	2,82	9,67	
70	0	0	2,7	4,18	6,33	3,7	8,47	

Na obrázku nižšie je opäť uvedené porovnanie modulácií DPSK a DQPSK. Najodolnejšími moduláciami na PMD a nelineárne efekty po vykompenzovaní CD sú z nich

DQPSK, RZ 50% DPSK a NRZ DPSK. Najhoršie hodnoty BER mala modulácia RZ 33%, kde v 30 km je znázornený diagram oka.



Obrázok 5.33: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.4.9 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Nasledujúce časť udáva výsledky pokročilých modulácií po vykompenzovaní CD pomocou FBG.

Tabuľka 5.44: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	6,11E-15	0	0	0	0	0	0
50	2,17E-07	1,83E-33	4,42E-22	1,5E-237	0	0	0
70	0,002	7,50E-09	1,37E-09	1,26E-53	0	0	0

Pri vykompenzovaní CD pomocou FBG sa hodnoty BER naproti výsledkom pri DCF znížili u moduláciách DPSK a DQPSK. Pri 10 km ako je vidieť z Tabuľky 5.44 sú hodnoty rovné nule, okrem RZ 33% DPSK. Pri 50 km sú hodnoty pri RZ 50% DPSK NRZ, DPSK

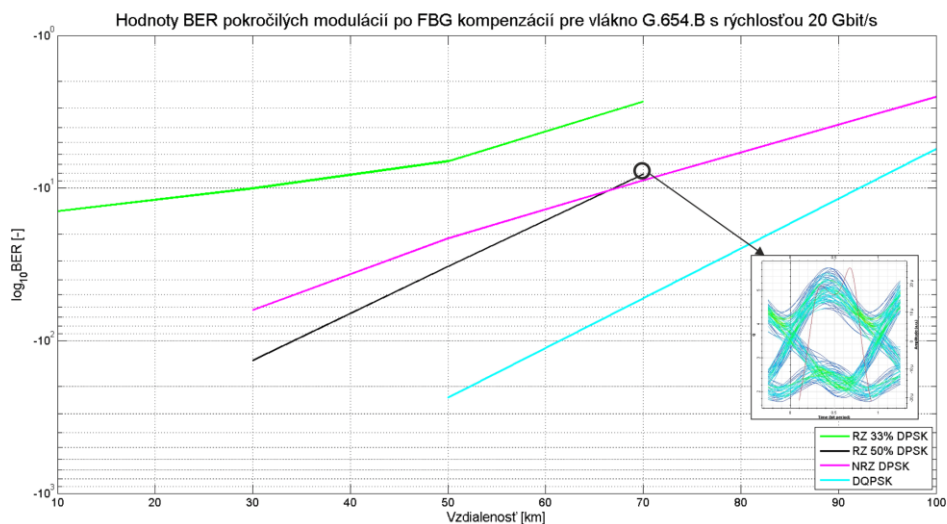
a DQPSK tak isto na nízkych hodnotách. Opäť modulácia RZ 33% DPSK je v tomto prípade najhoršia. Pri 70 km má vysoké hodnoty z modulácií DPSK a DQPSK už len druhá menovaná.

Q faktor jednotlivých modulácií sa zhoršil až pri 70 km. Najlepšiu hodnotu tu mala modulácia DQPSK. Pri EVM opäť možno pozorovať, že hodnoty pri QPSK sa po vykompenzovaní CD znížili. Najvyššie EVM mala v tomto prípade 16-QAM.

Tabuľka 5.45: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	7,71	55,24	82,88	64,31	6,99	4,6	12,81
50	5,05	11,99	9,56	34,50	4,76	8,38	11,08
70	2,87	5,65	5,93	6,00	6,97	4,8	7,88

Pri porovnaní na grafe v nasledujúcom obrázku je vidieť že opäť najodolnejšími moduláciami z tých ktoré mali vyššie hodnoty BER ako nula sú modulácie DQPSK, NRZ DPSK a RZ 50% DPSK. V porovnaní s DCF sa pri kompenzácií FBG dosiahlo vyšších vzdialeností, kde modulácie DQPSK a NRZ DPSK mali hodnotu BER menšiu ako jedna ešte pri vzdialenosti 100 km. Diagram oka zobrazuje kvalitu signálu pri 70 km modulácie RZ 50% DPSK. Je na ňom vidieť zhoršenie signálu vplyvom ISI a kolísaním oneskorenia.



Obrázok 5.34: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.4.10 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s

Výsledky pokročilých modulácií v nasledujúcej časti sú pre vlákno G.654.B s prenosovou rýchlosťou 40 Gbit/s.

Tabuľka 5.46: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	0,0003	1	0,03	3,50E-03	0	0	0
50	1	1	1	1	0,48	0	0
70	1	1	1	1	0,49	0	0

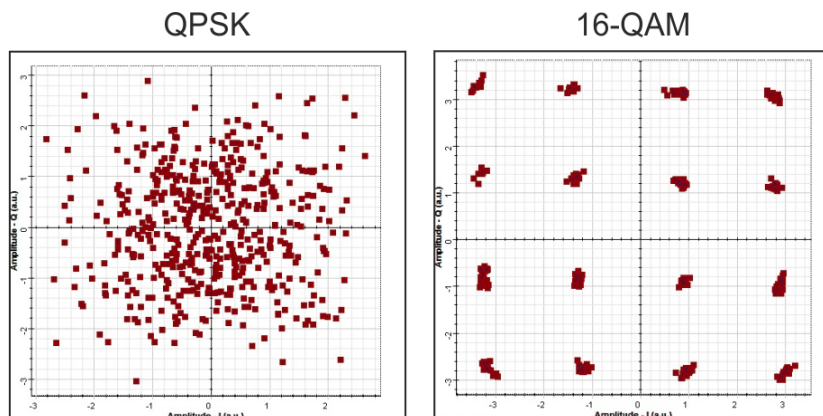
Z Tabuľky 5.46 je vidieť že v prípade vzdialenosti 10 km mali najlepšie hodnoty modulácie QPSK, DP-QPSK a 16-QAM. Modulácie DPSK a DQPSK mali vysoké hodnoty BER a pri väčších vzdialenostiach až rovné jednej. Modulácia QPSK sa zhoršila od 30 km, pri ktorých už mala vysoké hodnoty. Modulácia 16-QAM mala hodnoty BER pre všetky vzdialenosti nulové a predstavuje teda najodolnejšiu moduláciu pre túto prenosovú rýchlosť. Modulácia DP-QPSK mala hodnoty BER rovné nule až do vzdialenosti 100 km kde hodnota vyskočila na hodnotu 0,02.

V ďalšej tabuľke sú zobrazené hodnoty Q faktoru a EVM. V prípade Q faktoru boli všetky hodnoty pri uvedených moduláciách veľmi nízke respektíve až nulové. Pri EVM možno vidieť že najväčšie hodnoty mala QPSK modulácia. Z hľadiska EVM bola DP-QPSK najlepšou moduláciou. 16-QAM mala od DP-QPSK vyššie hodnoty.

Tabuľka 5.47: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	3,35	0	1,74	2,69	20,65	3,21	10,23
50	2,53	0	0	0	63,48	8,4	10,2
70	0	0	0	0	63,31	6,38	10,33

Pri konštruktívnych diagramoch na nasledujúcom obrázku možno vidieť a potvrdiť parametre EVM pri 70 km, kde pri QPSK je vysoké percento EVM a teda informáciu zo signálu nie je možné rozpoznať. Pri 16-QAM modulácií ktorá má nízke percento EVM možno vidieť že jednotlivé vzorky sú na skoro presne na svojich ideálnych pozíciách.



Obrázok 5.35: Konštruktívne diagramy QPSK a 16-QAM pre dĺžku trasy 70 km

5.4.11 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Po vykompenzovaní CD pomocou DCF boli získané nasledovné hodnoty jednotlivých parametrov.

Tabuľka 5.48: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	0,001	1,7E-163	6,85E-37	0	0	0	0
50	1	0,006	1,98E-05	5,86E-15	0	0	0
70	1	1	1	1,30E-02	0	0	0

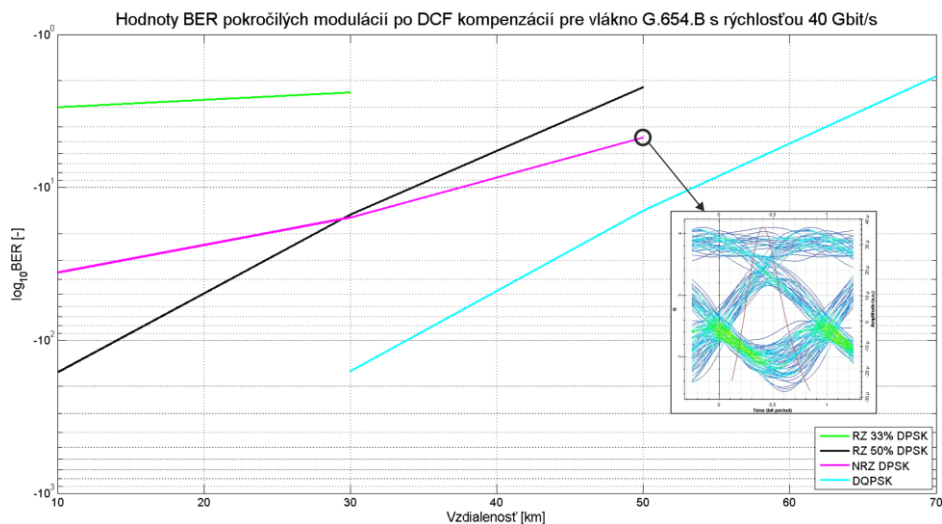
Pri 10 km po DCF kompenzácií sa zlepšili hodnoty BER pri moduláciách RZ 50% DPSK, NRZ DPSK a DQPSK. Hodnota modulácie RZ 33% DPSK bola vysoká pre kvalitný prenos. Pri QPSK sa hodnoty pri všetkých vzdialenostiach vykompenzovali až na BER = 0. Pri 50 km DPSK modulácie dosahovali zlých výsledkov. DQPSK modulácia mala ešte pomerne nízku hodnotu BER. Pri 70 km mali modulácie DPSK a aj DQPSK vysokých hodnôt BER.

Pri výsledkoch Q faktoru je vidieť, že najlepší pri 10 km mala modulácia DQPSK a následne RZ 50% DPSK. Pri vyšších vzdialenostiach Q faktor rapidne klesal. Parametre EVM dosiahla najlepšie modulácia DP-QPSK. Po vykompenzovaní CD možno vidieť pri QPSK zníženie percenta EVM.

Tabuľka 5.49: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	2,97	27,22	12,62	81,61	5,62	1,86	8,14
50	0	2,46	4,09	7,82	7,66	3,75	6,17
70	0	0	0	2,22	11,24	3,65	31,49

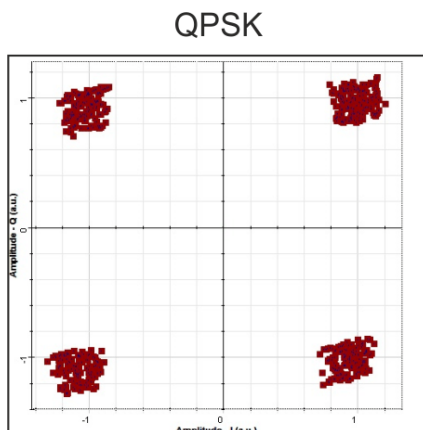
Najodolnejšou moduláciou pri porovnaní všetkých modulácií s vyšším BER ako nula je opäť DQPSK modulácia. To možno vidieť aj na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 5.36: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

Na ďalšom obrázku je uvedený konštelčný diagram pre moduláciu QPSK vo vzdialenosti 70 km po DCF kompenzácií. Ako je vidieť vykompenzovaním QPSK sa

jednotlivé vzorky zoskupili pri svojich ideálnych pozíciách, čo sa odzrkadlilo aj na hodnote BER.



Obrázok 5.37: Konštelčný diagram QPSK pre dĺžku trasy 70 km po DCF kompenzácií

5.4.12 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

Výsledky pokročilých modulácií po vykompenzovaní CD pomocou FBG sú zobrazené a popísané nižšie.

Tabuľka 5.50: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP- QPSK	16-QAM
10	0,001	7,9E-174	1,91E-37	0	0	0	0
50	0,003	5,95E-05	2,30E-06	1,70E-67	0	0	0
70	1	0,003	0,001	2,55E-13	0	0	0

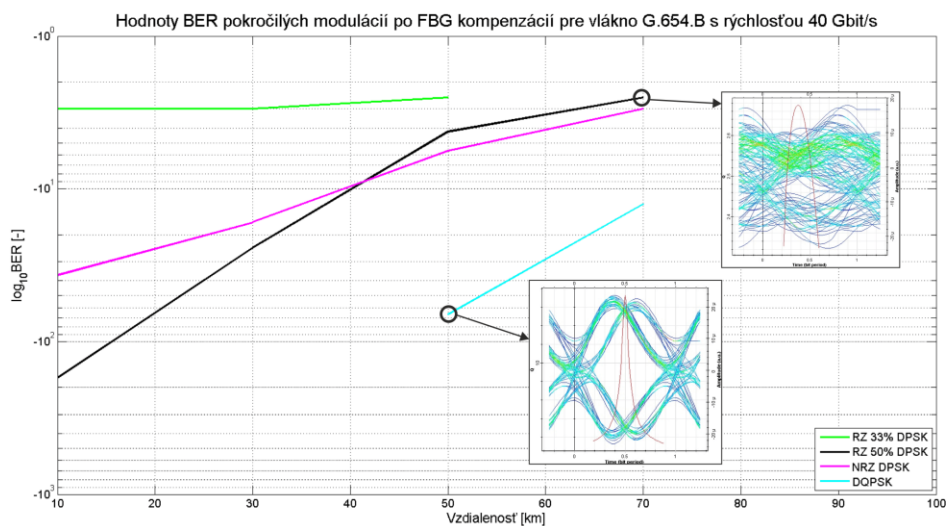
Z výsledkoch v Tabuľke 5.50 je vidieť, že najhoršie obstála modulácia RZ 33% DPSK. Tá mala pri všetkých vzdialenostiach vysoké hodnoty BER. Pri 10 km mali modulácie RZ 50% DPSK a NRZ DPSK kvalitných hodnôt. Pri vyšších vzdialenostiach však boli už hodnoty BER vysoké. Modulácia DPQSK mala aj pri 70 km pomerne nízku hodnotu BER.

Hodnoty Q faktorov mala najvyššie spomedzi všetkých uvedených modulácia DQPSK. Pri EVM sa dosiahlo nižších hodnôt pri všetkých moduláciách v porovnaní s DCF kompenzáciou. Najnižšie hodnoty mala opäť modulácia DP-QPSK.

Tabuľka 5.51: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	3,03	28,08	12,72	74,23	4,33	3,48	8,67
50	2,62	3,84	4,57	19,00	6,93	4,03	5,95
70	0	2,67	3,02	7,24	9,48	4,9	13,78

Na nasledujúcom obrázku je vidieť že v porovnaní s DCF kompenzáciou sa zvýšili maximálne dosiahnuté vzdialenosti pri DPSK moduláciách. Modulácia DQPSK mala pri 30 km nulovú hodnotu BER. Z grafu možno vidieť a potvrdiť že spomenuté najhoršie výsledky dosiahla modulácia RZ 33% DPSK.



Obrázok 5.38: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.5 Výsledky simulácií pre optické vlákno G.656 v zostupnom smere

V tejto podkapitole sú uvedené výsledky simulácií pre optické vlákno G.656 v zostupnom smere. Podobne ako v predchádzajúcich prípadoch, aj tu sú uvedené pre prehľadnosť tabuľky s výsledkami pre prenosové rýchlosti 10 Gbit/s a 20 Gbit/s a dĺžky trás 10 km, 50 km, 70 km v prípade intenzitných modulácií. Pri 40 Gbit/s a 100 Gbit/s mali všetky intenzitné modulácie hodnotu BER = 1 respektíve pri 10 km a 30 km veľmi vysokú na kvalitný prenos. Výsledky pokročilých modulácií sú uvedené pre prenosové rýchlosti 20 Gbit/s a 40 Gbit/s a dĺžky trás 10 km, 50 km a 70 km. Ďalšie výsledky sú uvedené v prílohách na DVD

5.5.1 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s

Nasledujúce tabuľky zobrazujú výsledky BER a Q faktoru pre prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s.

Tabuľka 5.52: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	8,46E-62	0	0	7,6E-254	3,48E-96
50	1,69E-43	7,03E-21	1,84E-5	7,18E-15	1,63E-17	5,74E-37	5,8E-07
70	1,92E-6	9,72E-5	0,0004	3,46E-10	2,05E-15	3,76E-21	0,00012

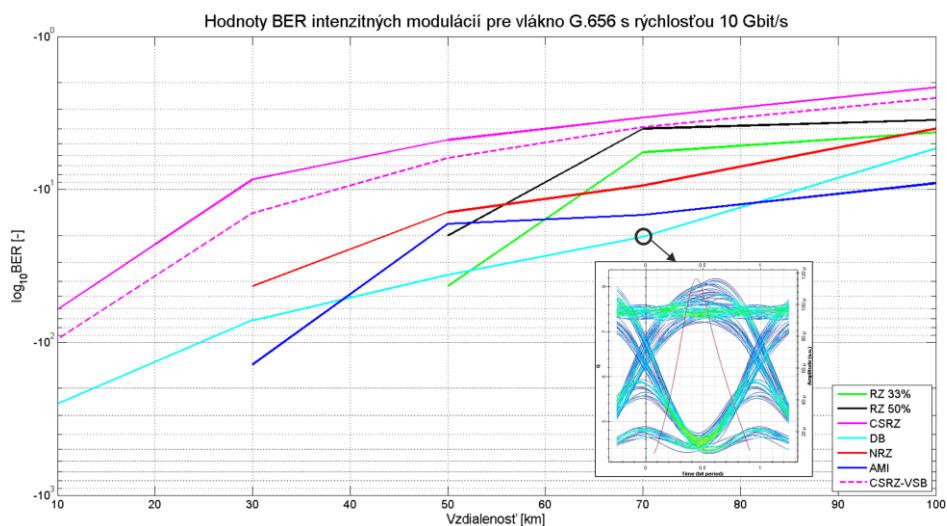
Pri hodnotách BER v Tabuľke 5.52 možno vidieť pri vzdialenosti 10 km poskytovali všetky modulácie dostatočne veľkú odolnosť na disperzie. Pri 50 km mali zlé výsledky modulácie CSRZ a CSRZ-VSB. Pre vyššie vzdialenosti boli najlepšie modulácie AMI a DB.

Pri výsledkoch Q faktoru to bolo podobne ako v prípade BER. Najlepšie hodnoty pre vyššie vzdialenosti mali modulácie AMI a DB.

Tabuľka 5.53: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	114,163	118,02	16,53	66,13	81,85	34,01	20,76
50	13,77	9,29	4,09	7,68	8,41	12,64	4,83
70	4,61	3,72	3,26	6,12	7,8	9,35	3,62

Z grafu porovnania na nasledujúcom obrázku je vidieť že pre kratšie trasy dosahovali dobrých výsledkov modulácie RZ 33% a RZ 50%. Pre väčšie vzdialenosti boli odolnejšie modulácie DB a AMI.



Obrázok 5.39: Graf porovnania intenzitných modulácií pre všetky dĺžky trasy

5.5.2 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

V tejto časti sú zobrazené výsledky simulácií po vykompenzovaní CD pomocou DCF pre prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s.

Tabuľka 5.54: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	0	0	0	0	0
50	2,2E-169	1,6E-286	6,32E-92	1,2E-295	1,9E-261	4,4E-150	2,49E-95
70	1,15E-28	1,15E-36	4,38E-31	3,32E-64	1,98E-38	1,09E-32	2,64E-28

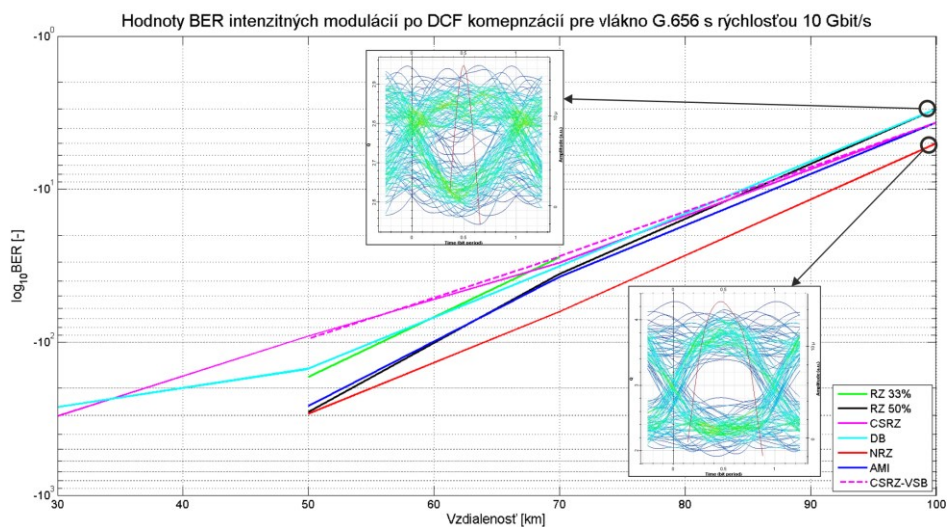
Pri hodnotách BER možno vidieť, že všetky boli po vykompenzovaní dostatočne vysoké pre kvalitný prenos ešte aj pri 70 km. Tieto modulácie teda možno nasadiť spolu s DCF kompenzáciou aj na trasy okolo 70 km a pre prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s. Pri výsledkoch Q

faktoru v Tabuľke 5.55 majú všetky modulácie dostatočne vysoké hodnoty. Nízke hodnoty boli až pri 100 km.

Tabuľka 5.55: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	105,73	118,51	84,95	138,54	131,22	43	64,91
50	27,7	36,15	20,29	36,72	34,52	26,06	20,67
70	11,04	12,59	11,53	16,87	12,9	11,84	10,96

Na obrázku nižšie pri porovnaní modulácií vidieť že najodolnejšou moduláciou po vykompenzovaní CD je NRZ. Najmenej odolnou na PMD a nelineárne efekty sú modulácie CSRZ a CSRZ-VSB. Pri 100 km mala najmenšie hodnoty modulácia DB. Pri diagrame oka NRZ možno pozorovať aj napriek veľkej vzdialenosti pomerne otvorené oko avšak veľmi ovplyvnené ISI a kolísaním oneskorenia.



Obrázok 5.40: Graf porovnania intenzitných modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.5.3 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

Nasledujúce tabuľky zobrazujú výsledky BER a Q faktoru po vykompenzovaní CD pomocou FBG kompenzácie.

Tabuľka 5.56: Výsledné hodnoty BER pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

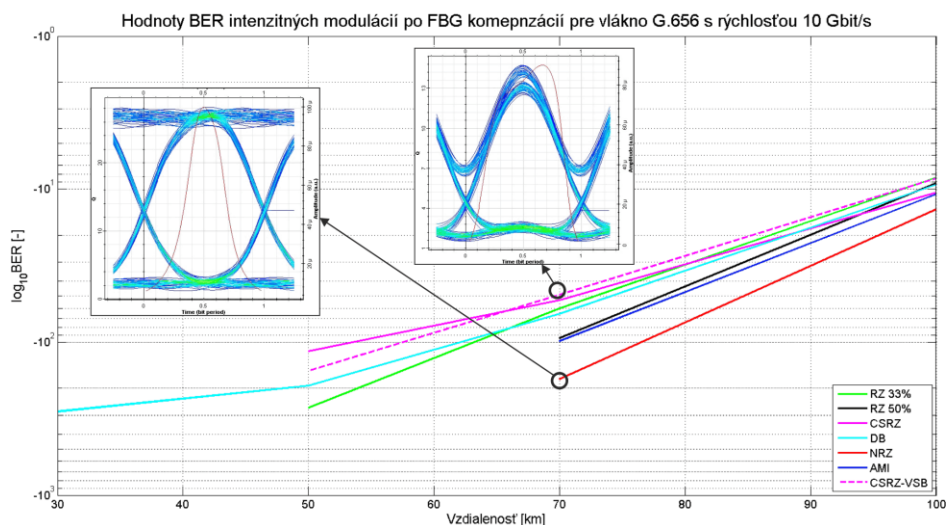
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	0	0	0	0	0
50	3,2E-269	0	6,7E-115	0	0	1,1E-193	2,6E-154
70	3,67E-61	3,23E-95	7,35E-54	4,7E-175	2,15E-99	4,88E-66	1,59E-49

Hodnoty BER v tomto prípade dosahovali veľmi dobrých výsledkov pri všetkých moduláciách. Pri vzdialenosti 50 km boli BER rovné nule pri moduláciách RZ 50%, NRZ a AMI. Pri výsledkoch Q faktoru sa dosiahlo taktiež veľmi dobrých hodnôt, ktoré zaručujú dobrú kvalitu detegovaného signálu.

Tabuľka 5.57: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 10 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	112,56	129,69	93,61	146,31	153,399	41	121,29
50	35,03	42,83	22,74	42,33	44,11	29,66	26,43
70	16,45	20,66	15,39	28,18	21,12	17,12	14,73

V porovnaní s DCF kompenzáciou sa dosiahlo lepších výsledkov čo možno vidieť aj na nasledujúcom obrázku. Pri 70 km dosahovali hodnoty najhoršej a najlepšej modulácie nízke BER, čo je vidieť aj na priložených diagramoch oka. Tie nie sú silno ovplyvňované nežiaducimi efektmi. Podobne ako pri DCF tak aj tu sú najodolnejšími moduláciami NRZ, AMI a RZ50%.



Obrázok 5.41: Graf porovnania intenzitných modulácií po FBG komepnzácii pre všetky dĺžky trasy

5.5.4 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s

Táto časť uvádza výsledky BER a Q faktoru intenzitných modulácií pre prenosovú rýchlosť 20 Gbit/s.

Tabuľka 5.58: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	7,22E-65	1,61E-24	2,63E-13	4,38E-63	1,09E-55	1,31E-53	3,26E-15
50	3,23E-5	0,002	0,001	6,16E-5	0,003	0,0002	0,001
70	0,01	0,01	0,003	0,002	0,01	0,0003	0,01

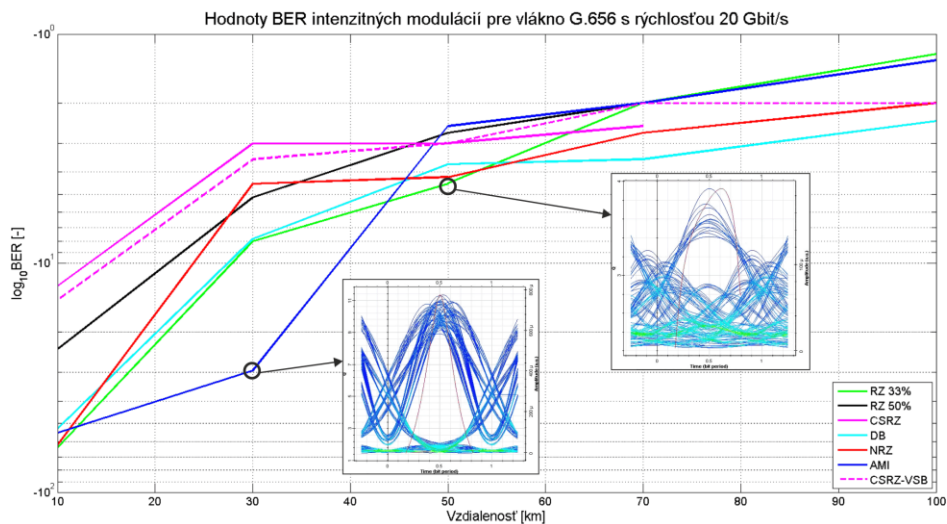
Z hore uvedenej tabuľky možno vidieť že v prípade dĺžky trasy 10 km majú modulácie ešte pomerne dobré hodnoty BER. Najlepšími moduláciami tu sú RZ 33% a NRZ. Pri väčších vzdialenostiach sú hodnoty BER pri všetkých moduláciách vysoké.

Podobne hodnoty Q faktoru majú pri 10 km najlepšie modulácie RZ 33% a NRZ. Zo zväčšujúcimi sa vzdialenosťami klesali hodnoty Q faktoru pri všetkých moduláciách na hodnoty nevhodné pre prenos.

Tabuľka 5.59: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	16,95	10,15	7,18	16,7	15,65	15,36	7,74
50	3,92	2,75	2,87	3,76	2,66	3,45	2,96
70	2,07	2,14	2,65	2,75	2,25	3,35	2,15

Z porovnania zobrazeného na nasledujúcom obrázku možno vidieť že pri 30 km bola najlepšou moduláciou AMI. Tá mala hodnotu BER ešte pomerne nízku čo potvrdzuje aj diagram oka zobrazený v grafe. Pri 50 km vynikala modulácia RZ 33% no už s vysokou hodnotou BER. Pri vzdialenosti 70 km a 100 km bola najodolnejšou moduláciou DB.



Obrázok 5.42: Graf porovnania intenzitných modulácií pre všetky dĺžky trasy

5.5.5 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Nasledujúce výsledky zobrazujú hodnoty BER a Q faktoru po použití DCF na vykompenzovanie CD pri 20 Gbit/s.

Tabuľka 5.60: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

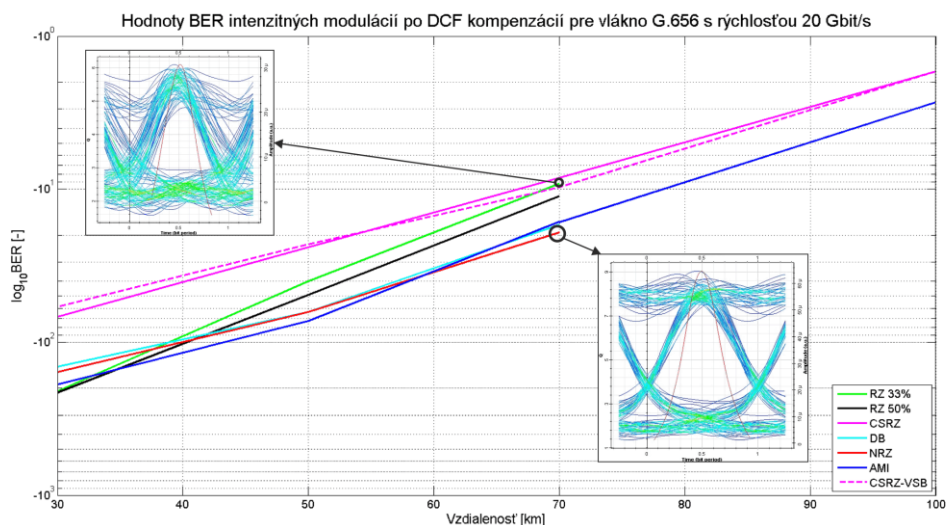
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	0	0	0	0	0
50	6,48E-41	5,12E-50	1,03E-24	3,23E-64	1,94E-73	4,29E-64	1,1E-23
70	5,41E-10	6,66E-12	3,7E-09	7,29E-20	3,75E-17	7,61E-18	1,99E-10

Z hodnôt BER zobrazených v tabuľke vyššie možno pozorovať, že pri 10 km mali všetky modulácie nulové hodnoty. Pri 50 km sa ešte všetky hodnoty BER pohybovali na dostatočne nízkej úrovni. Pre vzdialenosti 70 km a 100 km mali najlepšie výsledky modulácie NRZ, DB a AMI. To isté platilo aj pri výsledkoch Q faktoru, z ktorých možno povedať že najlepšie výsledky mali pre väčšie vzdialenosti NRZ, AMI a DB.

Tabuľka 5.61: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	53,38	54,41	39,94	41,37	45,98	44,79	49,35
50	13,34	14,82	10,18	16,87	18,08	16,86	9,94
70	6,09	6,76	5,75	9,04	8,33	8,52	6,24

Z celkového porovnania zobrazeného nižšie vidieť že najmenej odolné modulácie na PMD a nelineárne efekty boli CSRZ a CSRZ-VSB. Pri 100 km mali hodnotu 1 modulácie RZ 33%, RZ 50% a NRZ. V 70 km sú zobrazené diagramy oka pri moduláciách RZ 33% a NRZ, kde pri prvej menovanej je vidieť že diagram oka je viac ovplyvnený ako pri NRZ.



Obrázok 5.43: Graf porovnania intenzitných modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.5.6 Výsledky simulácií intenzitných modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

V nasledovných tabuľkách sú uvedené výsledky BER a Q faktoru pre prenosovú rýchlosť 20 Gbit/s po vykompenzovaní CD pomocou FBG.

Tabuľka 5.62: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

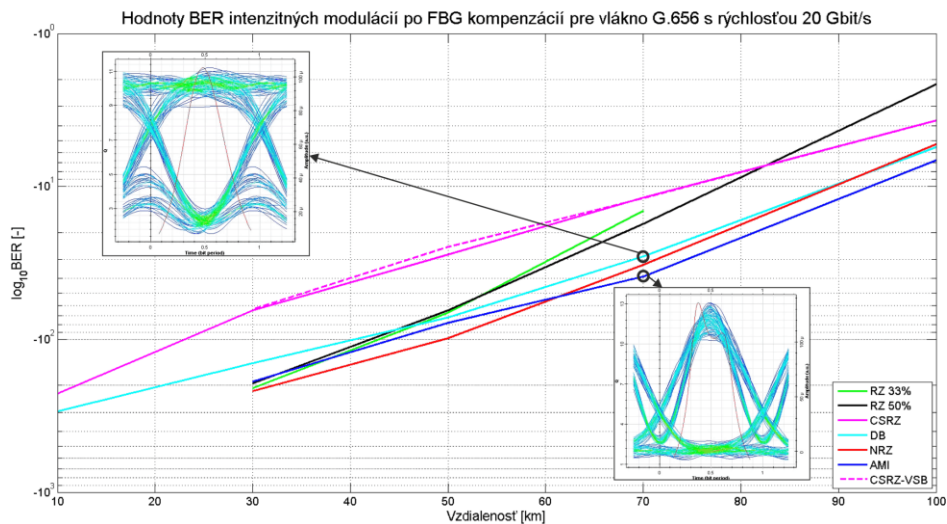
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	0	0	1,4E-228	0	0	4,4E-296	0
50	3,56E-68	1,58E-65	9,4E-29	1,54E-99	1,46E-78	1,25E-72	1,66E-25
70	3,94E-15	2,41E-18	1,53E-12	2,88E-33	1,36E-39	1,97E-29	1,03E-12

Vykompenzovaním chromatickej disperzie pomocou FBG sa hodnoty BER až do 70 km pohybovali na dostatočne nízkych úrovniach. To možno potvrdiť aj pri výsledkoch Q faktoru. Najodolnejšími moduláciami pre vyššie vzdialenosti po vykompenzovaní CD sú NRZ, AMI a DB. Pri porovnaní metód kompenzácie je vidieť že FBG dosahuje lepších výsledkov ako DCF.

Tabuľka 5.63: Výsledné hodnoty Q faktoru pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]						
	RZ 33%	RZ 50%	CSRZ	NRZ	AMI	DB	CSRZ-VSB
10	53,41	47,82	32,24	41,31	46,03	36,75	39,55
50	17,4	17,05	11,04	21,14	18,72	17,98	10,35
70	7,76	8,65	6,95	11,95	13,11	11,2	7

V porovnaní modulácií na nasledujúcom grafe je vidieť že najhoršie opäť skončili modulácie CSRZ a CSRZ-VSB. Naopak najlepšimi sú opäť modulácie NRZ, AMI a DB čo poukazujú aj diagramy oka pri druhých dvoch menovaných.



Obrázok 5.44: Graf porovnania intenzitných modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.5.7 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s

Výsledky pokročilých modulácií pre vlákno G.656 a prenosovej rýchlosti 20 Gbit/s sú zobrazené v nasledujúcich tabuľkách.

Tabuľka 5.64: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	1,77E-10	6,14E-53	2,91E-27	0	0	0	0
50	0,005	0,002	4,51E-5	6,90E-28	0	0	0
70	1	0,02	0,01	3,78E-06	0	0	0

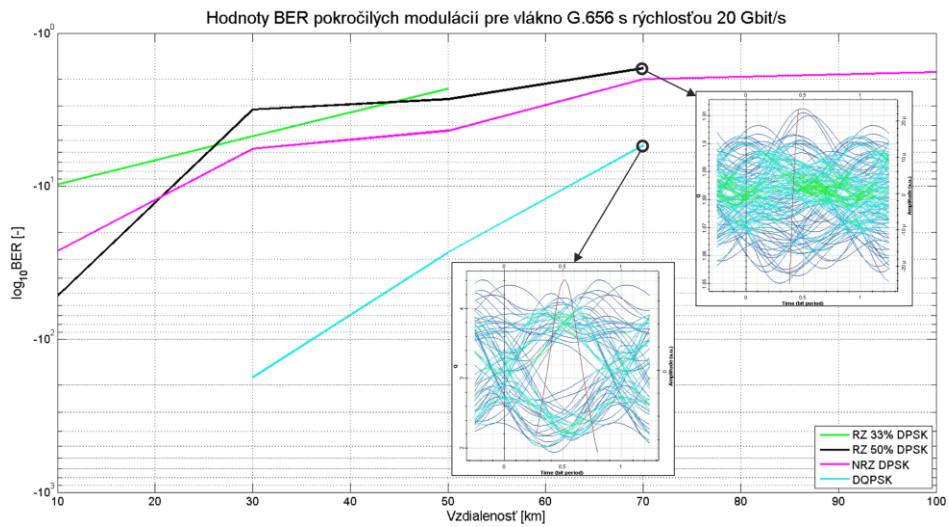
Z hodnôt BER je vidieť, že najlepšimi moduláciami boli v tomto prípade QPSK, DP-QPSK a 16-QAM. Ich hodnoty boli pri všetkých vzdialenostiach nulové. Pri 10 km mali nízke hodnoty aj modulácie DQPSK, RZ 33% DPSK a NRZ DPSK. Pri vyššej vzdialenosti DPSK modulácie mali vysoké hodnoty BER. modulácia DQPSK bola pomerne odolná ešte pri 50 km.

Najvyššie hodnoty Q faktoru mala spomedzi vybraných modulácií DQPSK. Pri parametre EVM mala najnižšie percento modulácia DP-QPSK. Nasledovala modulácia 16-QAM a QPSK.

Tabuľka 5.65: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s

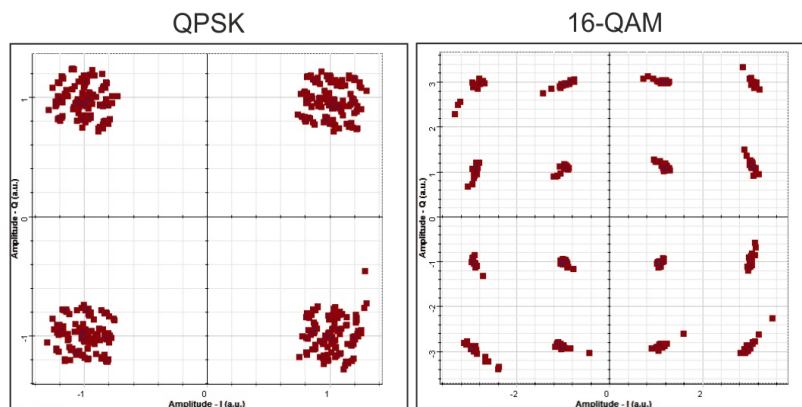
Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	6,27	15,25	10,72	72,4	5,32	5,12	6,27
50	2,5	2,65	3,87	10,9	17,86	4,73	9,84
70	0	1,91	2,19	4,48	29,78	5,31	8,53

Pri porovnaní modulácií s vyššou hodnotou BER ako 0 je vidieť, že modulácia DQPSK má najlepšiu odolnosť na disperzie a nelineárne efekty. Pri zobrazení diagramov oka modulácií RZ 50% DPSK a DQPSK vo vzdialenosti 70 km možno pozorovať, že kvalita signálu je v tomto mieste už veľmi nízka.



Obrázok 5.45: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií pre všetky dĺžky trasy

Ďalší obrázok zobrazuje konšteláčné diagramy modulácií QPSK a 16-QAM pri vzdialenosti 70 km. Ako je vidieť jednotlivé vzorky sa len málo vychýľujú zo svojich ideálnych pozícií a signál je dobre detegovaný vykazujúc hodnotu BER = 0.



Obrázok 5.46: Konšteláčné diagramy pre QPSK a 16-QAM pri 70 km

5.5.8 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Nasledujúce tabuľky zobrazujú výsledky pokročilých modulácií pre prenosovú rýchlosť 20 Gbit/s po vykompenzovaní CD pomocou DCF.

Tabuľka 5.66: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	2,75E-15	0	0	0	0	0	0
50	1,51E-5	3E-31	6,96E-39	1,62E-92	0	0	0
70	0,03	4,11E-6	2,94E-08	9,15E-19	0	0	0

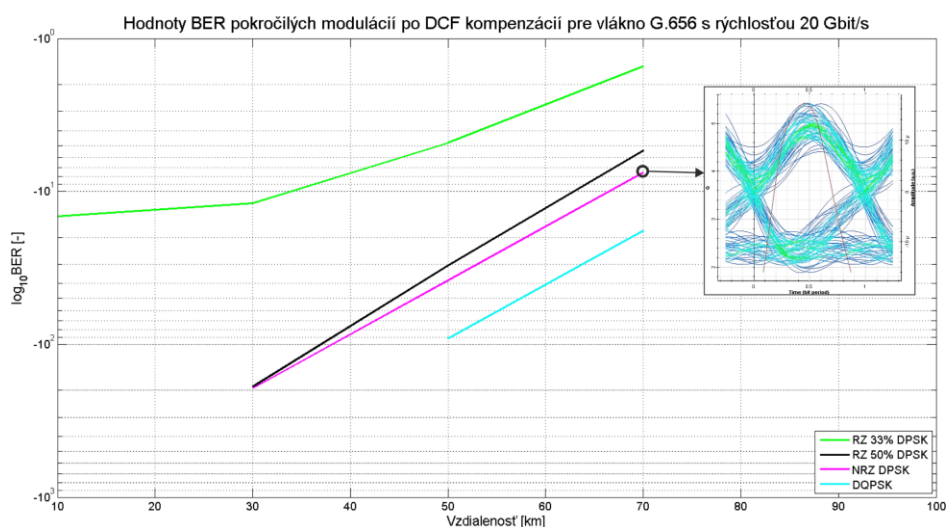
Po vykompenzovaní CD boli hodnoty BER v Tabuľke 5.66 pri 10 km u všetkých modulácií okrem RZ 33% DPSK nulové. RZ 33% DPSK modulácia mala pri 10 km dostatočne nízku hodnotu pre kvalitný prenos, ale so zväčšujúcou sa vzdialenosťou mala najhoršie hodnoty BER v porovnaní s ostatnými moduláciami.

Hodnoty Q faktoru pri 10 km boli najväčšie pri moduláciách RZ 50% DPSK a DQPSK. Celkovo mala najlepšie hodnoty modulácia DQPSK. Najnižšie percento EVM mala modulácia DP-QPSK. Vykompenzovaním CD klesli percentá EVM pri modulácií QPSK.

Tabuľka 5.67: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]			
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM	
10	7,81	79,43	66,15	80,23	5,33	3,16	8,96	
50	4,17	11,56	12,98	21,24	8,44	2,35	9,33	
70	1,77	4,45	5,42	9,19	9,32	2,53	8,56	

V porovnaní modulácií na nasledujúcom obrázku vidieť že najviac ovplyvnená modulácia je RZ 33% DPSK. Naopak najodolnejšou je modulácia DQPSK. Pri 100 km mali všetky zobrazené modulácie hodnotu BER = 1.



Obrázok 5.47: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.5.9 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Nasledujúca časť zobrazuje výsledky hodnôt pokročilých modulácií po vykompenzovaní CD pomocou FBG.

Tabuľka 5.68: Výsledné hodnoty BER pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	3,06E-14	0	0	0	0	0	0
50	7,24E-09	1,84E-60	1,14E-45	1,2E-194	0	0	0
70	0,001	1,26E-11	4,68E-14	1,79E-39	0	0	0

Ako je vidieť z uvedenej tabuľky tak pri vzdialenosti 10 km mali všetky modulácie dobré hodnoty BER. Boli dostatočne odolné na PMD a ďalšie rušivé efekty. Modulácia RZ 33% DPSK mala pri väčších vzdialenostiach vysoké hodnoty BER. Modulácie NRZ DPSK a DQPSK mali ešte pri 70 km pomerne nízke hodnoty.

Hodnoty Q faktoru boli opäť najvyššie pri DQPSK a NRZ DPSK. najmenšie hodnoty Q faktoru mala modulácia RZ 33% DPSK. Pri EVM mala najnižšie hodnoty DP-QPSK

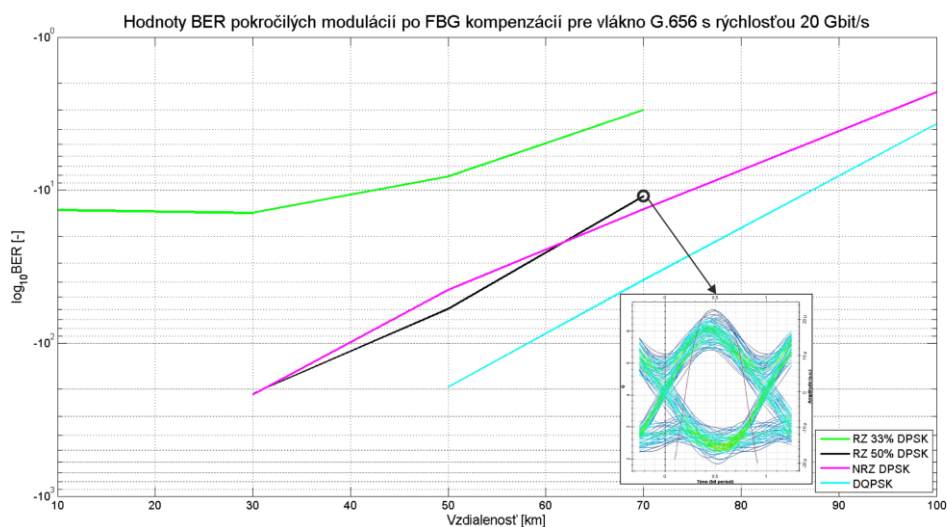
Simulácie modulačných formátov na DWDM-PON topológii

nasledovaná QPSK a nakoniec 16-QAM. DP-QPSK modulácia je na základe EVM najvhodnejšou moduláciou pre tento prípad.

Tabuľka 5.69: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 20 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	7,51	62,85	75,72	83,19	8,45	3,64	13,34
50	5,66	16,35	14,13	33,05	8,57	7,39	9,65
70	2,98	6,67	7,44	14,63	6,33	3,63	8,88

Z grafu na ďalšom obrázku vidieť diagram oka modulácie RZ 50% DPSK vo vzdialenosti 70 km. Aj napriek rušivým faktorom, ako je ISI a kolísanie oneskorenia je signál ešte dobre kvalitný pre správne detegovanie. Modulácie NRZ DPSK a DQPSK mali ešte pri 100 km hodnotu BER nižšiu ako jedna.



Obrázok 5.48: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.5.10 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s

Táto časť uvádza výsledky pokročilých modulácií pre vlákno G.656 s prenosovou rýchlosťou nastavenou na 40 Gbit/s.

Tabuľka 5.70: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	0,0006	1,21E-5	3,39E-7	6,00E-89	0	0	0
50	1	1	1	1	0	0	0
70	1	1	1	1	0,31	0	0

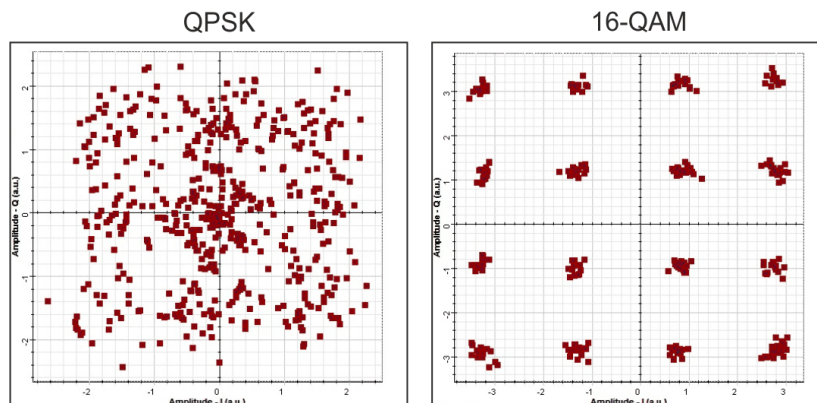
Pre zvolenú rýchlosť mali v 10 km dobré hodnoty BER len modulácie DQPSK, QPSK, DP-QPSK a 16-QAM. Pre vyššie vzdialenosti bola už aj modulácia DQPSK nevhodná. V prípade QPSK vysoká hodnota BER bola až pri 70 km. Modulácie DP-QPSK a 16 QAM mali pre všetky vzdialenosti hodnotu BER nulovú.

V prípade Q faktoru mala dostatočne vysokú hodnotu len modulácia DQPSK vo vzdialenosti 10 km. Najnižšie hodnoty EVM mala modulácia DP-QPSK. Najvyššie hodnoty modulácia QPSK. Hodnoty EVM pri 16-QAM sa pohybovali okolo 10 %.

Tabuľka 5.71: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	3,21	4,21	4,95	20,8	18,47	2,35	9,34
50	0	0	0	0	38,54	6,27	12,27
70	0	0	0	0	65,43	5,73	9,81

Konštruktívne obrázky zobrazené nižšie predstavujú kvalitu signálu pred detegovaním vo vzdialenosti 70 km. Pri QPSK ako už bolo vidno z hodnoty BER je signál veľmi rušený. Na druhej strane pri 16-QAM signál detegovaný z hodnotou BER rovnou nule.



Obrázok 5.49: Konštelčné diagramy QPSK a 16-QAM pre dĺžku trasy 70 km

5.5.11 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Nasledujúce výsledky sú namerané po vykompenzovaní CD pomocou DCF.

Tabuľka 5.72: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	0,0009	5,7E-235	1,8E-38	0	0	0	0
50	0,006	1,12E-7	4,53E-11	7,00E-40	0	0	0
70	1	1	0,0005	3,43E-06	0	0	0

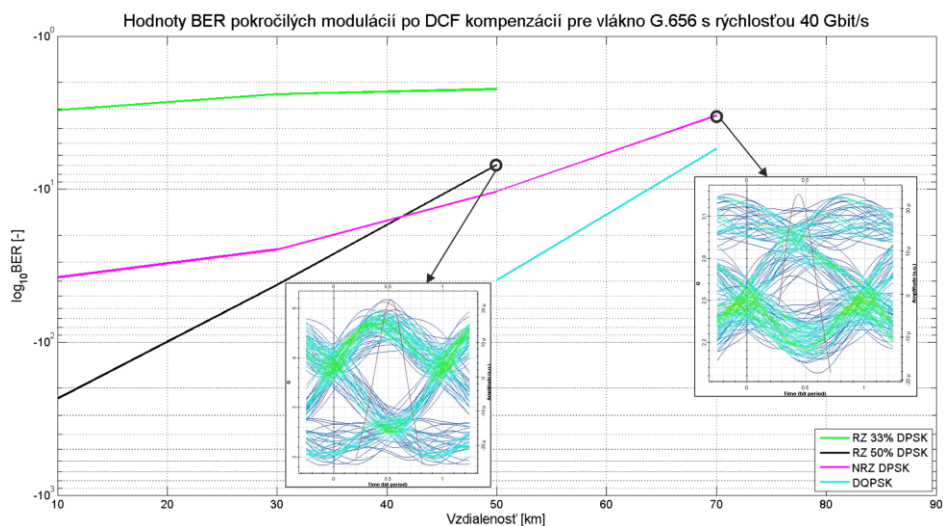
Z predchádzajúcej tabuľky je vidieť, že ani po vykompenzovaní CD modulácia RZ 33% DPSK nedosahuje dobrých výsledkov BER na trase. V prípade modulácie RZ 50% DPSK boli hodnoty BER pri 10 km dostatočne nízke. DQPSK modulácia mala pri 50 km nízke hodnoty, ale pri 70 km už boli hodnoty vysoké pre správne fungovanie prenosu. Pri QPSK sa hodnota BER po vykompenzovaní dostala na nulu pri 70 km aj 100 km.

Pri hodnotách Q faktoru možno pozorovať že najlepšie hodnoty má DPQSK modulácia a RZ 33% DPSK modulácia naopak najhoršie. Pri QPSK je vidieť že parameter EVM dosahuje po kompenzácií nižších percent. Najnižšie EVM mala opäť modulácia DP-QPSK.

Tabuľka 5.73: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s po DCF kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]		
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	3,09	32,7	12,91	74,56	4,32	2,86	9,11
50	2,48	5,17	6,47	14,28	8,65	2,57	5,27
70	0	0	3,25	4,52	9,3	2,74	17,49

Pri porovnaní modulácií s hodnotou BER vyššou ako 0 možno vidieť že najhoršou je RZ 33% DPSK. Najlepšie výsledky s pomedzi vybraných má DQPSK modulácia. Diagramy oka pri RZ 50% DPSK a NRZ DPSK zobrazujú kvalitu signál, ktorá je v týchto prípadoch horšia. Diagramy oka sú rušené ISI a kolísaním oneskorenia. V prípade NRZ DPSK je oko skoro zatvorené.



Obrázok 5.50: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po DCF kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

5.5.12 Výsledky simulácií pokročilých modulácií pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

Nasledujúca časť zobrazuje výsledky pokročilých modulácií po kompenzácií pomocou FBG.

Tabuľka 5.74: Výsledné hodnoty BER pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

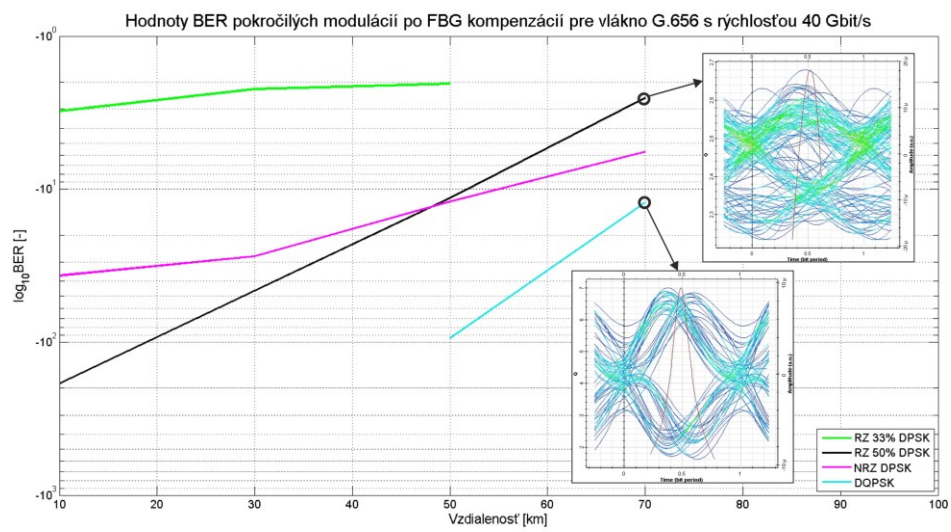
Dĺžka trasy [km]	BER [-]						
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM
10	0,0008	3,6E-187	1,82E-37	0	0	0	0
50	0,009	3,59E-12	9E-13	6,50E-95	0	0	0
70	1	0,003	2,08E-6	5,95E-13	0	0	0

Po vykompenzovaní CD pomocou FBG možno pozorovať zlepšenie výsledkov pri moduláciách RZ 50% DPSK a NRZ DPSK. Tie mali pri 50 km ešte nízke hodnoty BER. DQPSK modulácia dosahuje aj pri 70 km ešte pomerne kvalitnú hodnotu BER. Najhoršou moduláciou bola RZ 33% DPSK čo možno pozorovať aj z hodnôt Q faktoru zobrazených v nižšie v tabuľke. Najlepšie hodnoty Q faktoru mala modulácia DQPSK. EVM mali najlepšie modulácie DP-QPSK a QPSK.

Tabuľka 5.75: Výsledné hodnoty Q faktoru a EVM pre 40 Gbit/s po FBG kompenzácií

Dĺžka trasy [km]	Q faktor [-]				EVM [%]			
	RZ 33% DPSK	RZ 50% DPSK	NRZ DPSK	DQPSK	QPSK	DP-QPSK	16-QAM	
10	3,13	29,15	12,73	81,56	4,76	2,11	21,2	
50	2,48	6,85	7,04	21,95	8,04	3,99	8,3	
70	0	2,67	4,59	9,6	6,44	5,12	16,34	

Pri porovnaní modulácií na nasledujúcom obrázku vidieť podobný priebeh kriviek jednotlivých modulácií ako pri kompenzácií pomocou DCF. Rozdielne boli však hodnoty BER ktoré boli v tomto prípade nižšie. Pri modulácií RZ 50 % DPSK sa predlžil dosah, ale pri 70 km ako je vidieť aj z diagramu oka je signál už veľmi rušený. Najlepšou moduláciou bola v tomto prípade DQPSK, ktorá predstavuje po QPSK moduláciách a 16-QAM celkovo štvrtú najodolnejšiu moduláciu.



Obrázok 5.51: Graf porovnania vybraných pokročilých modulácií po FBG kompenzácií pre všetky dĺžky trasy

6 Zhrnutie a porovnanie nasimulovaných výsledkov

V tejto kapitole je uvedené zhrnutie a porovnanie nasimulovaných výsledkov. Je tu zhrnutá odolnosť modulačných formátov na základe použitého optického vlákna. Porovnanie je medzi výsledkami ktoré sú uvedené v predošlej kapitole, zvlášť pre intenzitné modulácie a zvlášť pre pokročilé.

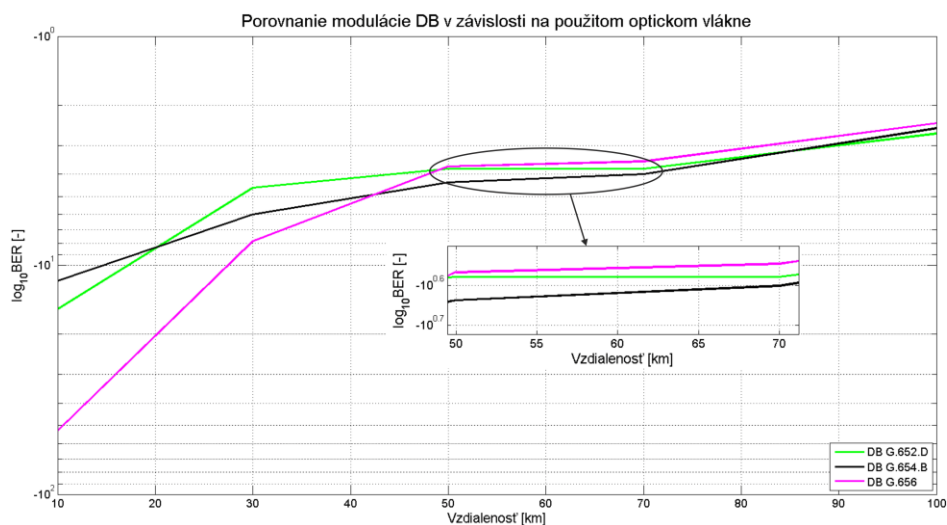
6.1 Zhrnutie výsledkov intenzitných modulácií

V tejto časti sú zhrnuté výsledky intenzitných modulačných formátov na DWDM-PON v zostupnom smere bez kompenzácie chromatickej disperzie, s kompenzáciou CD pomocou DCF a nakoniec aj pomocou FBG.

6.1.1 Zhrnutie intenzitných modulácií bez kompenzácie CD

Najmenej odolnými modulačnými formátmi boli pri všetkých troch typoch vlákien a pri prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s a aj 20 Gbit/s formáty CSRZ a CSRZ-VSB. Pri 40 Gbit/s mali skoro všetky modulácie na všetkých typoch vlákien príliš vysoké hodnoty BER vo vzdialenosti 10 km a pri väčších vzdialenostiach dosahovali hodnoty BER = 1. Výnimkou bola modulácia AMI pri vlákne G.656, ktorá mala dostatočne vysokú hodnotu pri 10 km. Z týchto vysokých hodnôt pri 10 km dosahovala celkovo nižšie hodnoty v porovnaní s ostatnými modulácia RZ 33%. Pri rýchlosti 100 Gbit/s mali najhoršie hodnoty modulácie na vláknach G.652.D a G.654.B. Pri vlákne G.656 boli pri tejto rýchlosti hodnoty vo viacerých prípadoch nižšie ako hodnota BER = 1, ale napriek tomu pre kvalitný prenos už nedostačujúce.

Pri prenosových rýchlostiach 10 Gbit/s a 20 Gbit/s boli najodolnejšími moduláciami na disperzie AMI a DB a to najmä pri väčších vzdialenostiach. Pri vzdialenostiach do 30 km mali dobré výsledky aj modulácie RZ 33% a RZ 50% v prípade prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s. Pri vlákne G.656 boli výsledky týchto modulácií výborné ešte pri 30 km a začali sa zhoršovať až pri 50 km. Na nasledujúcom obrázku je uvedené porovnanie modulácie DB pri prenosovej rýchlosti 20 Gbit/s v závislosti na použítom optickom vlákne.



Obrázok 6.1: Porovnanie DB modulácie na rozdielnych vláknach

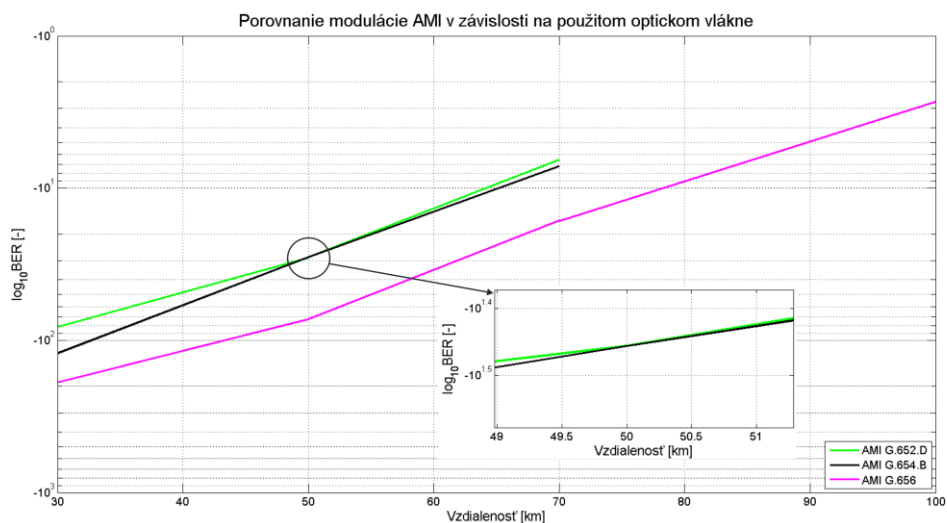
Z hore uvedeného obrázka je vidieť že pri nižších vzdialenostiach je výhodnejšie nasadenie modulácie DB na optickom vlákne G.656. Pri vyšších vzdialenostiach vykazovalo vlákno G.654.B mierne lepších hodnôt.

6.1.2 Zhrnutie intenzitných modulácií s DCF kompenzáciou

V prípade zhodnotenia výsledkov intenzitných modulácií pre 10 Gbit/s a 20 Gbit/s po DCF kompenzácií možno povedať, že aj napriek vykompenzovaniu chromatickej disperzie mali modulácie CSRZ a CSRZ-VSB opäť najmenšiu odolnosť na PMD a ďalšie nelineárne efekty. To platilo pre všetky typy vlákien. Ďalej pri rýchlosti 40 Gbit/s bola najmä modulácia CSRZ-VSB nepoužiteľná, keďže dosahovala najväčších hodnôt BER. Pri rýchlosti 100 Gbit/s mali všetky modulácie na všetkých typoch vlákien hodnotu BER príliš vysokú.

Medzi najodolnejšiu moduláciu po vykompenzovaní CD a prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s možno zaradiť NRZ pre všetky typy vlákien. Ďalej dobré hodnoty vykazovala aj modulácia AMI. Pri prenosovej rýchlosti 20 Gbit/s bola pri všetkých vláknach najodolnejšia modulácia AMI. V prípade tejto rýchlosti boli pri vláknach G.652.D a G.656 dobré výsledky aj pre moduláciu NRZ a pre prvé menované vlákno aj pre moduláciu DB. Pre prenosovú rýchlosť 40 Gbit/s boli pri vláknach G.652.D a G.656 najviac odolné modulácie AMI a DB. Pri vlákne G.654.B bola najodolnejšou moduláciou pri 40 Gbit/s AMI.

Pre porovnanie vlákien bola vybraná modulácia AMI pri prenosovej rýchlosti 20 Gbit/s, ktorá vykazovala dobrých výsledkov pri všetkých ich troch variantoch a prenosových rýchlostiach. Porovnanie sa nachádza na nasledujúcom obrázku.



Obrázok 6.2: Porovnanie AMI modulácie na rozdielnych vláknach po DCF kompenzácií

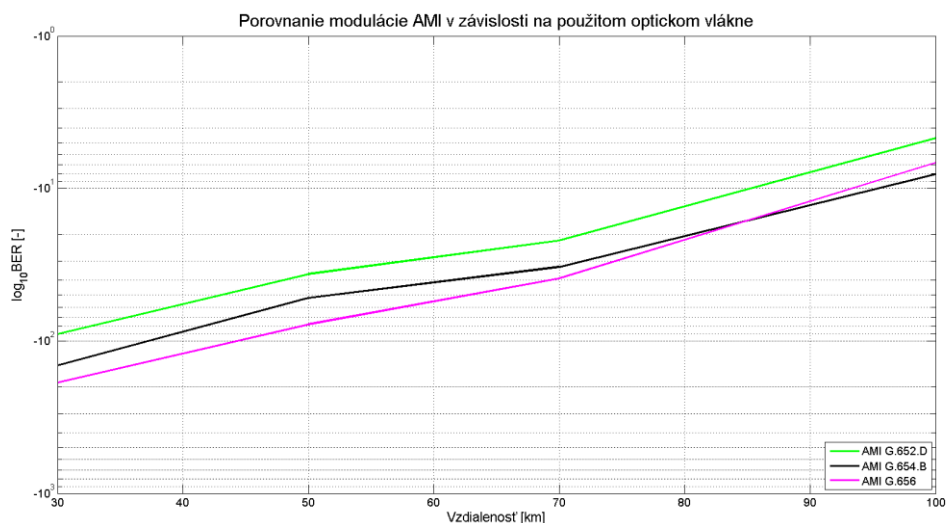
Pri porovnaní vlákien z Obrázka 6.2 možno pozorovať, že najlepšie hodnoty mala AMI modulácia na vlákne G.656. Nasledovalo vlákno G.654.B a G.652.D. S kompenzovaním CD je teda najlepšie použiť vlákno G.656.

6.1.3 Zhrnutie intenzitných modulácií s FBG kompenzáciou

Použitím FBG kompenzácie na vykompenzovanie CD sa výsledky jednotlivých modulácií naproti DCF kompenzácií zlepšili, čo bolo vidieť na hodnotách BER. Pri porovnaní modulácií pre prenosové rýchlosti 10 Gbit/s a 20 Gbit/s boli najmenej odolné opäť modulácie CSRZ a CSRZ VSB pri všetkých typoch vlákien. Pri 40 Gbit/s dopadla najhoršie modulácia CSRZ-VSB u všetkých vlákien a pri vlákne G.652.D aj modulácia RZ 50%. Pri 100 Gbit/s boli na všetkých vláknach vysoké hodnoty BER pre všetky modulácie.

Medzi najodolnejšie intenzitné modulácie možno celkovo zaradiť podobne ako pri DCF moduláciu AMI. Pri vláknach G.652.D a G.656 malá výborné výsledky pri 10 Gbit/s a 20 Gbit/s aj modulácia NRZ. Modulácie RZ 33% a RZ 50% dosahovali dobrých výsledkov pri 10 Gbit/s na kratších vzdialenostiach u všetkých optických vlákien. Pri rýchlostiach 40 Gbit/s a optických vláknach G.654.B a G.656 poskytovala aj modulácia DB dobrú odolnosť na PMD a nelinearity.

V porovnaní optických vlákien na ďalšom obrázku je opäť pre dobré výsledky zobrazená modulácia AMI s prenosovou rýchlosťou 20 Gbit/s. Najlepšie výsledky (okrem dĺžky 100 km) boli namerané na optickom vlákne G.656. Pri 100 km boli mierne lepšie výsledky pri vlákne G.656. Potvrďuje sa teda teoretický predpoklad, kde vlákna G.656 sú určené pre DWDM prenosy.



Obrázok 6.3: Porovnanie AMI modulácie na rozdielnych vláknach po FBG kompenzácií

6.2 Zhrnutie výsledkov pokročilých modulácií

V tejto podkapitole sú zhrnuté výsledky pokročilých modulácií simulovaných na DWDM-PON v zostupnom smere. Porovnanie je uvedené pre výsledky bez kompenzácie CD, s DCF aj FBG kompenzáciou a pri moduláciách QPSK, DP-QPSK, 16-QAM aj pre DSP kompenzáciu.

6.2.1 Zhrnutie pokročilých modulácií bez kompenzácie CD

Najmenšiu odolnosť na disperzie mali modulácie DPSK. Z nich skončila najhoršia RZ 33% DPSK u všetkých vlákien. V porovnaní DPSK modulácií medzi vláknami najlepšie hodnoty boli namerané na vlákne G.656.

Modulácia DQPSK dosahovala lepších výsledkov ako DPSK modulácie. DQPSK v porovnaní s DPSK využíva polovičnú symbolovú rýchlosť, čo sa odzrkadľuje práve na lepších výsledkoch. Najlepšie výsledky dosiahla DQPSK modulácia opäť na vlákne G.656. Na vlákne G.654.B boli dosiahnuté lepšie výsledky v porovnaní s vláknom G.652.D okrem prenosovej rýchlosti 20 Gbit/s, ktorá mala mierne lepšie výsledky pri G.652.D.

V porovnaní s DQPSK dosiahla lepšie výsledky modulácia QPSK. Ta bola dostatočne odolná pri prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s na všetkých optických vláknach. Pri 20 Gbit/s mala táto modulácia naďalej výbornú odolnosť na prenosovom vlákne G.656. Na prenosovom vlákne G.654.B sa pri 20 Gbit/s zhoršila až pri 100 km a najhoršia odolnosť bola na vlákne G.652.D, kde pri 50 km mala už vysoké hodnoty BER. Pri 40 Gbit/s boli výsledky lepšie pri vlákne G.656. Pri vláknach G.654.B a G.652.D táto modulácia dosahovala pri 20 km už vysokých hodnôt BER. Pri 100 Gbit/s boli vysoké hodnoty na všetkých vláknach.

Modulácie 16-QAM a DP-QPSK boli najodolnejšími moduláciami v prípade použitia všetkých vlákien. Pri DP-QPSK sa odolnosť zhoršila až pri 100 Gbit/s na všetkých použitých vláknach. Výnimkou bola rýchlosť 40 Gbit/s pri vzdialenosti 100 km kde pri vlákne G.654.B bola vysoká hodnota BER. Pri modulácii 16-QAM boli opäť výborné výsledky pri 10 Gbit/s aj 20 Gbit/s pri všetkých vláknach. Pri 40 Gbit/s mala horšie výsledky pri 100 km na optickom vlákne G.652.D. V prípade rýchlosti 100 Gbit/s mala ešte modulácia 16-QAM dobrú hodnotu pri 10 km a vláknach G.652.D a G.654.B. Pri vyšších vzdialenostiach a vlákne G.656 mala modulácia už vysokých hodnôt BER.

Pri porovnaní EVM pri simuláciách 16-QAM a DP-QPSK bolo vidieť nižšie percentá pri modulácii DP-QPSK ktorá teda predstavuje z týchto dvoch modulácií najlepšiu variantu pre dané nastavenia simulácií.

6.2.2 Zhrnutie pokročilých modulácií s DCF kompenzáciou

Modulácie DPSK po vykompenzovaní CD pomocou DCF mali vyššiu odolnosť aj pri prenosových rýchlostiach 20 Gbit/s a 40 Gbit/s. Najhoršou z modulácií DPSK bola pri všetkých vláknach RZ 33% DPSK. Pri 100 Gbit/s nebola modulácia ani po vykompenzovaní odolná na PMD a nelineárne efekty. Najlepšie výsledky dosiahla modulácia DPSK na vlákne G.656.

V prípade modulácie DQPSK sa taktiež znížili hodnoty BER. Vykompenzovaním CD bola modulácia použiteľná pre trasy do 50 km pri 40 Gbit/s pri všetkých vláknach. Pri 100 Gbit/s a trase 10 km taktiež na všetkých vláknach bolo dosiahnuté dostatočne dobrých výsledkov. Pri vyšších vzdialenostiach boli hodnoty BER vysoké. Najlepšie hodnoty mala DQPSK na vlákne G.656, nasledovalo vlákno G.654.B a nakoniec G.652.D.

Pri QPSK modulácií a vlákne G.654.B vykompenzovaním CD sa dosiahlo dobre výbornej odolnosti pre všetky dĺžky na prenosových rýchlostiach 20 Gbit/s a 40 Gbit/s. Pri 100 Gbit/s sa na tomto vlákne zvýšil dosah na 30 km. Pri vlákne G.656 sa taktiež dosiahlo lepšej odolnosti na všetkých dĺžkach pri 40 Gbit/s a pri 100 Gbit/s sa zvýšil dosah na 50 km. Najhoršie výsledky mala po vykompenzovaní QPSK na vlákne G.652.D. Tu pri 20 Gbit/s sa zvýšil dosah z 30 km na 50 km. Pri 40 Gbit/s boli dosiahnuté výborné výsledky pri všetkých dĺžkach a pri 100 Gbit/s bola dosiahnutá vzdialenosť 30 km s hodnotou BER rovnou nule. Po kompenzácií CD sa ale výrazne zmenšili hodnoty EVM pre túto moduláciu.

Pri porovnaní DP-QPSK a 16-QAM modulácií bolo po kompenzácií zistené že lepšie výsledky v prípade rýchlosti 40 Gbit/s a 100 Gbit/s dosiahla modulácia DP-QPSK. Tá mala aj menšie hodnoty EVM. Najlepšie hodnoty DP-QPSK boli na vlákne G.654.B. Pri 16-QAM bolo dosiahnutých najlepšej odolnosti na vlákne G.656, kde sa vykompenzovala rýchlosť 100 Gbit/s vo všetkých dĺžkach trasy. Nasledovalo vlákno G.654.B, ktoré malo vysokú hodnotu len pri prenosovej rýchlosti 100 Gbit/s vo vzdialenosti 100 km. Najhoršie výsledky boli opäť na vlákne G.652.D. Tu sa nezvýšila odolnosť pri 40 Gbit/s a 100km a pri 100 Gbit/s sa zvýšil dosah len na 50 km.

6.2.3 Zhrnutie pokročilých modulácií s FBG kompenzáciou

Vykompenzovaním CD pomocou FBG sa mierne zvýšili odolnosti modulácií DPSK. Najhoršou bola opäť modulácia RZ 33% DPSK. Najlepšie výsledky zo skupiny modulácií DPSK mala NRZ DPSK v prípade prenosových rýchlostí 10 Gbit/s a 20 Gbit/s. V prípade rýchlostí 40 Gbit/s mala najlepšie výsledky RZ 50% DPSK. V porovnaní vlákien najlepšie výsledky pri prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s boli namerané na vlákne G.654.B a pri rýchlostiach 20 Gbit/s a 40 Gbit/s na vlákne G.656. Pri 100 Gbit/s bola DPSK modulácia silne rušená.

DQPSK modulácia dosiahla podobnej odolnosti ako v prípade DCF. Dosah bol pri jednotlivých rýchlostiach rovnaký, mierne sa však znížili hodnoty BER na všetkých vláknach. Najlepšiu odolnosť mala modulácia DQPSK na vlákne G.656, nasledovalo vlákno G.654.B a nakoniec G.652.D.

QPSK modulácia dosiahla pri vláknach G.654.B a G.652.D totožných výsledkov ako v prípade DCF. Teda pri 40 Gbit/s bola odolnosť pri oboch vláknach na všetkých dĺžkach výborná. Pri 100 Gbit/s bola vysoká odolnosť do 70 km v prípade vlákna G.656 a pri vlákne G.654.B do 50 km. Pri vlákne G.652.D a prenosovej rýchlosti 20 Gbit/s bola odolnosť modulácie zlá až v 100 km. Pri 100 Gbit/s siahala dobrá odolnosť do 50 km.

Najlepšie výsledky mali opäť modulácie DP-QPSK a 16-QAM, ktoré mali výborne výsledky pre 20 Gbit/s aj 40 Gbit/s. Pri DP-QPSK sa vykompenzovaním CD zvýšila odolnosť aj pri 100 Gbit/s vo vzdialenosti 100 km pri vláknach G.652.D a G.654.B. Pri vlákne G.656 bola pri tejto rýchlosti a vzdialenosti hodnota BER vyššia ako 0. Pri 16-QAM a vlákne G.656 bolo vykompenzovaním FBG docielených výborných výsledkov pre všetky rýchlosti aj dĺžky trasy. Pri vláknach G.652.D a G.654.B boli vysoké hodnoty BER a teda nízka odolnosť pri rýchlosti 40 Gbit/s a vzdialenosti 100 km. Pri 100 Gbit/s bola dosiahnuteľná vzdialenosť s výbornou odolnosťou pri vlákne G.652.D 50 km a pri G.654.B 70 km. Pri modulácií DP-QPSK boli nižšie hodnoty EVM ako pri 16-QAM aj v tomto prípade.

6.2.4 Zhrnutie pokročilých modulácií s DSP kompenzáciou

Kompenzovanie CD pomocou DSP bolo využité pri moduláciách QPSK, DP-QPSK a 16-QAM. Pri modulácií QPSK a rýchlostiach 10 Gbit/s, 20 Gbit/s a 40 Gbit/s dosahovala modulácia nulových hodnôt BER pri všetkých vláknach. Pri vlákne G.652.D boli však vyššie hodnoty EVM ako pri ostatných. Pri 100 Gbit/s bola QPSK odolná do vzdialenosti 50 km pri vláknach G.652.D a G.654.B a pri vlákne G.656 boli dobré hodnoty ešte pri 70 km.

Modulácia 16-QAM dosiahla na vlákne G.654.B po DSP kompenzácií výbornej odolnosti pri všetkých rýchlostiach a vzdialenostiach. Najhoršie výsledky mala na vlákne G.652.D kde pri rýchlosti 40 Gbit/s a vzdialenosti 100 km vykazovala vysokú hodnotu BER. Ďalej pri rýchlosti 100 Gbit/s mala vysoké hodnoty BER vo vzdialenostiach 70 km aj 100 km. Na vlákne G.656 mala vysokú hodnotu BER len pri rýchlosti 100 Gbit/s a vzdialenosti 100 km. Po DSP kompenzácií modulácia DP-QPSK bola na vláknach G.652.D a G.654.B odolná na všetkých rýchlostiach a vzdialenostiach. Pri vlákne G.656 a prenosovej rýchlosti 100 Gbit/s

Zhrnutie a porovnanie nasimulovaných výsledkov

bola vysoká hodnota BER len pri vzdialenosti 100 km. V porovnaní 16-QAM a DP-QPSK mala opäť celkovo nižšie hodnoty EVM modulácia DP-QPSK.

Záver

Cieľom diplomovej práce bolo popísať disperzné javy v optických sieťach a možnosti ich kompenzácie a potlačenia. Ďalej sa práca zaoberala prehľadom a popisom modulačných formátov, ktoré boli porovnané medzi sebou aj na základe odolnosti voči vplyvom disperzií. V praktickej časti boli vykonávané simulácie jednotlivých modulačných formátov na DWDM-PON topológii, kde sa skúmala ich odolnosť voči disperziám na rôznych prenosových rýchlostiach a vzdialenostiach. V simuláciách sa navyše menili štandardy optických vlákien a spôsoby kompenzácie chromatickej disperzie.

V prvej kapitole tejto práce bol uvedený úvod do optických sietí. Nachádzajú sa v ňom popísané jednotlivé rozdelenia a najmä prístupové siete, ktoré sa čoraz viac dostávajú bližšie ku koncovému účastníkovi. Tie boli dôležité hlavne z hľadiska významu, že jednotlivé simulácie sa vykonávali práve na ich pasívnej variante DWDM-PON.

Vo vypracovaní disperzných javov sú uvedené jednotlivé disperzie a ich teoretický a matematický popis. Disperziami najviac ovplyvňujúce optický prenos sú chromatická a polarizačne módová disperzia. Chromatická disperzia zložená s materiállovej, vlnovodovej a profilovej disperzie je predvídateľný a dobre kompenzovateľný jav. Polarizačne módová disperzia predstavuje jav, ktorý vzniká náhodne v závislosti na indexu lomu a nemožno ju úplne vykompenzovať ale len potlačiť.

V popisoch kompenzácií disperzií sú uvedené jednotlivé možnosti na základe typu kompenzovanej disperzie. Ide najmä o popis možnosti kompenzácie pre chromatickú disperziu a polarizačne módovú disperziu. V prípade chromatickej disperzie jedným zo spôsobov najviac využívaných kompenzácií sú špeciálne vlákna s veľmi veľkou zápornou disperziou. Ďalej sú veľmi využívané kompenzácie pomocou braggovských mriežok. Tie poskytujú výhodu najmä v konštantnom vložnom útlme po celej dĺžke vlákna. V prípade polarizačne módovej disperzie sa využíva kombinácia optickej a optoelektronickej kompenzácie, ktorá účinne potláča túto disperziu. V súčasnosti narastá záujem najmä o elektronickú kompenzáciu CD a PMD, ktorá pomocou sledovania výstupov a adaptívnych algoritmov je schopná nastaviť elektronický obvod tak, aby sa daná disperzia vykompenzovala prípadne potlačila.

Odolnosť optickej siete voči disperziám je závislá aj na použitom modulačnom formáte. Modulačné formáty boli predmetom štvrtej kapitoly. Tieto formáty boli rozdelené na dve skupiny, a to na intenzitné a pokročilé. S uvedeného popisu intenzitných modulačných formátov je zrejmé, že ich tolerancia k disperziám je dobrá pre krátke trasy a nižšie prenosové rýchlosti. Pokročilé formáty predstavujú odolnejšiu variantu modulácií a ich disperzná tolerancia je väčšia v porovnaní s intenzitnými pre vysoké prenosové rýchlosti a dlhšie trasy. Ich odolnosť zvyšuje aj umožnenie prenášať viacero bitov na jeden symbol.

Praktická časť sa zaoberala simuláciami jednotlivých modulačných formátov na DWDM-PON topológii. Simulácie sa vykonávali v software Optiwave Optisystem. Z výsledkov simulácií pri intenzitných moduláciách možno povedať že boli vhodné najmä pre

rýchlosti 10 Gbit/s, 20 Gbit/s a v prípade kompenzácie CD aj pri 40 Gbit/s. Najlepšie výsledky mali celkovo modulácie AMI a DB, pri ktorých sa potvrdil teoretický predpoklad podľa čoho sú vďaka zníženej spektrálnej šírke viac odolné voči disperzii. Dobré výsledky mali v prípade prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s a krátkych vzdialenostiach aj modulácie RZ 33% a RZ 50%. V prípade kompenzácie CD pomocou DCF sa dosiahlo veľmi dobrých výsledkov okrem modulácií AMI a DB aj pri modulácií NRZ. V porovnaní DCF kompenzácie s FBG kompenzáciou bolo zistené, že použitím FBG kompenzácie sa dosiahlo lepších výsledkov jednotlivých modulácií. To je dané tým, že DCF vlákna majú väčší vložný útlm a dokonale kompenzované je len úzke pásmo frekvencie. Najhoršie výsledky mali pri intenzitných moduláciách vo všetkých prípadoch modulácie CSRZ a CSRZ-VSB. V porovnaní optických vlákien na ktorých sa všetky simulácie vykonávali boli najlepšie hodnoty na štandarde G.656, ktorý je priamo určený pre DWDM prenosy. Ďalej nasledovalo vlákno G.654.B s minimálnym útlmom a nakoniec vlákno G.652.D.

Z výsledkov simulácií pri pokročilých moduláciách možno konštatovať, že najhoršími moduláciami z tejto skupiny boli DPSK modulácie. Tie dosahovali podobných výsledkov ako modulácie AMI a DB pri intenzitných moduláciách. Lepšie výsledky od DPSK mala modulácia DQPSK, ktorá mala dobrú odolnosť hlavne po vykompenzovaní CD pre kratšie trasy pri 40 Gbit/s aj 100 Gbit/s. Najlepšie výsledky mali modulácie DP-QPSK a 16-QAM. Tie vykazovali dobrú odolnosť aj pre dlhšie trasy na prenosovej rýchlosti 40 Gbit/s. Pri 100 Gbit/s vykompenzovaním chromatickej disperzie mali kvalitnú odolnosť až do vzdialenosti 70 km a 100 km v prípade 16-QAM. Na základe hodnôt amplitúdy chybového vektoru, kde modulácia DP-QPSK dosiahla nižších percent možno povedať, že bola v tomto prípade kvalitnejšou a odolnejšou moduláciou.

Tieto výsledky môžu slúžiť ako podklad pre ďalšie simulácie a práce v budúcnosti. Práca by sa dala rozšíriť o podrobné simulácie pokročilých modulácií na rýchlostiach 100 Gbit/s a viac. Vhodné by bolo vytvorenie práce na tému overenia uvedených výsledkov praktickým meraním na reálnej DWDM-PON sieti s použitím jednotlivých modulačných formátov.

Použitá literatura

- [1] SIMMONS, Jane M. *Optical network design and planning*. 2014, xxv, 516 pages. ISBN 978-331-9052-267
- [2] RAMASWAMI, Rajiv, Kumar N SIVARAJAN a Galen H SASAKI. *Optical networks: a practical perspective* [online]. 3rd ed. Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2009, xxxiv, 893 s. Morgan Kaufmann series in networking. ISBN 978-0-12-374092-2. Dostupné z: http://www.ece.iisc.ernet.in/photonics_web/pdf/kumar.pdf
- [3] SCHLITTER, P. *Optické přístupové sítě*. In: Access Server [online]. [cit. 2014-10-05]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072807>
- [4] TŘETINA, Vítězslav. *Moderní optické přístupové sítě*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Radim Šifta.
- [5] KEISER, Gerd. *FTTX concepts and applications* [online]. Hoboken, N.J.: IEEE, 2006, xvii, 293 p. [cit. 2014-10-05]. ISBN 978-047-1704-201.
- [6] VODRÁŽKA, V. *Optické přístupové sítě EPON a CWDM*. In: Access Server [online]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=opticke-pristupove-site-epon-a-cwdm&cisloclanku=2005070401>
- [7] HORNÍČEK, Lukáš a Miloslav FILKA. 2012. *Optická síť FTTH* [online]. [cit. 2014-10-12]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: www.elektrorevue.cz/cz/download/opticka-sit-ftth/
- [8] HAVLIŠ, Ondřej. *Pasivní optické sítě WDM-PON* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52694. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Münster.
- [9] ALLIED TELESYN. *Active vs. PON FTTx Technology Choices*. 2004 [cit. 2014-10-17]. Dostupné z: http://www.alliedtelesis.com/media/pdf/active_vs_pon_a_wp.pdf
- [10] LÁSKO, Jan. *Návrh sítě WDM-PON*. Brno, 2012 [cit. 2014-10-17]. 100 l. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/9129>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Radim Šifta.
- [11] SMRŽ, Jan. *Matematická analýza a simulace přenosových parametrů optických vláken*. Brno, 2012 [cit. 2014-11-02]. 42 l. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vladimír Tejkal.
- [12] TRÁVNÍČEK, Pavel. *PMD – Polarizační vidová disperze a vliv na přenos*. Brno, 2009 [cit. 2014-11-02]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brne. Vedoucí práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [13] BINH, Le Nguyen. *Digital processing: optical transmission and coherent receiving techniques*. Taylor & Francis Group, 2014, xxiv, 483 pages. ISBN 978-146-6506-701.

- [14] SENIOR, John M. *Optical fiber communications: principles and practice* [online]. 3rd ed. Harlow: Prentice Hall, 2009, 1, 1076 s. [cit. 2014-10-22]. ISBN 978-0-13-032681-2.
- [15] KOVÁČ, Filip. *Simulace a měření disperzí v optických přístupových sítích*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Radim Šifta.
- [16] PRÁŠIL, Jiří. *Metody řešení vlivu optické disperze na stávajících optických sítích*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Reichert.
- [17] FILIP, Tomáš. *Disperzní vlivy na vysokorychlostní přenos optickou sítí*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vladimír Tejkal.
- [18] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Chromatická disperze jednovidových optických vláken a její měření*. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/sk/pdf/chrom-disperze.pdf>
- [19] KYSELÁK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy: The optical fibre dispersion effects on multiplex transmission systems : zkrácená verze Ph.D. Thesis*. [V Brně: Vysoké učení technické], c2009, 26 s. ISBN 978-80-214-3827-9.
- [20] ABAS, M.Sc. Ahmad Fauzi. *Chromatic Dispersion Compensation in 40 Gbaud Optical Fiber WDM Phase-Shift-Keyed Communication Systems* [online]. Paderborn, 2006 [cit. 2014-22-12]. Dostupné z: <http://d-nb.info/983304157/34>. Dissertation. Universität Paderborn.
- [21] EXFO. *Chromatic Dispersion at High Bit Rates* [online]. Canada, 2012. ISBN 978-1-55342-100-9. Dostupné z: http://www.ccontrols.ch/cms/upload/content/aktionen/PDF/2013-04-05_Chromatic_Dispersion.pdf
- [22] ŠTĚPÁNEK, Ladislav. *Chromatic dispersion in optical communications* [online]. 2012. Dostupné z: http://pnerscontacts.upce.cz/26_2012/Stepanek.pdf
- [23] GAGANDEEP, Singh, Saxena JYOTI a Kaur GAGANDEEP. *Dispersion Compensation Using FBG and DCF in 120 Gbps WDM System* [online]. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology, 2014. 3: 6. ISSN 2319-5967. Dostupné z: http://www.ijesit.com/Volume%203/Issue%206/IJESIT201406_62.pdf
- [24] ANANDITA, Agarwal, Kumar MUKESH a Saxena ROHINI. *Comparison of different techniques of dispersion compensation* [online]. International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, 2013 [cit. 2015-01-07]. 2: 3. ISSN 2277-1956. Dostupné z: <http://www.ijecse.org/wp-content/uploads/2013/06/Volume-2Number-3PP-912-918x.pdf>
- [25] RAVI PRAKASH, Shukla, Kumar MUKESH, A.K. JAISWAL, a Saxena ROHINI. *Performance Analysis of Dispersion in Optical Communication link Using Different Dispersion Compensation Fiber (DCF) Models*. [online]. 2012 [cit. 2015-02-07]. 1: 2. ISSN 2277-3878. Dostupné z: <http://www.ijrte.org/attachments/File/v1i2/B0217051212.pdf>
- [26] PAEK, Un-Chul a Kyunghwan OH. *Silica Optical Fiber Technology for Devices and Components: Design, Fabrication, and International Standards* [online]. 2012 [cit. 2015-01-11]. ISBN 1118585887.

- [27] HARMANJOT, Singh. *Performance analysis of modulation formats in dispersive optical communication system*. 2008. Thesis Report. Thapar University.
- [28] SHIRASAKI, M. *Compensation of chromatic dispersion and dispersion slope using a virtually imaged phased array*. [online]. 2001 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=927385>
- [29] SEWTER, Jonathan. *Electronic equalization of polarization-mode dispersion in 40-Bb/s optical systems*. Toronto, 2005. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.138.1994&rep=rep1&type=pdf>. University of Toronto.
- [30] GENE, Joan M., Peter J. WINZER, S. CHANDRASEKHAR a Herwig KOGELNIK. *Simultaneous Compensation of Polarization Mode Dispersion and Chromatic Dispersion Using Electronic Signal Processing*. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2007, vol. 25, issue 7, s. 1735-1741 [cit. 2015-01-26]. DOI: 10.1109/JLT.2007.897751. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4267806>
- [31] BULOW, Henning, Fred BUCHALI, Axel KLEKAMP a Herwig KOGELNIK. *Electronic Dispersion Compensation*. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2008, vol. 26, issue 1, s. 158-167 [cit. 2015-01-26]. DOI: 10.1109/JLT.2007.913066. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4451201>
- [32] KRAUS, Stanislav. *Měření na DWDM systému* [online]. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. 2012 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/075.pdf
- [33] DAI, Foster F. *Electronic equalizations for optical fiber dispersion compensation*. *Optical Engineering* [online]. 2007-03-01, vol. 46, issue 3, s. 035006- [cit. 2015-02-06]. DOI: 10.1117/1.2715955. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.2715955>
- [34] CHUGHTAI, Mohsan Niaz. *Study of physical layer impairments in high speed optical networks*. [online]. Stockholm, Sweden, 201 2 [cit. 2015-02-06]. ISBN 978-91-7501-355-8. KTH School of Information and Communication Technology Kista SWEDEN.
- [35] ZHIXIN, Liu. *Design and Applications of Advanced Optical Modulation Formats for Optical Metro/Access Transmission Systems* [online]. Hong Kong, May 2012 [cit. 2015-02-10]. Thesis. The Chinese University of Hong Kong.
- [36] ŤUPA, Martin. *Polarizační vidová disperze – PMD*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [37] Recommendation ITU-T G.652. *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. Telecommunication standardization sector of ITU, 11/2009. Dostupné z: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=10389>

- [38] Recommendation ITU-T G.653. *Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. Telecommunication standardization sector of ITU, 07/2010. Dostupné z: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=10869>
- [39] Recommendation ITU-T G.656. *Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport*. Telecommunication standardization sector of ITU, 07/2010. Dostupné z: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=10871>
- [40] WINZER, Peter J. a Ren-Jean ESSIAMBRE. *Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2006, vol. 24, issue 12, s. 4711-4728 [cit. 2015-03-04]. DOI: 10.1109/jlt.2006.885260.
- [41] WINZER, P.J. a R.-J. ESSIAMBRE. *Advanced Optical Modulation Formats*. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2006, vol. 94, issue 5, s. 952-985 [cit. 2015-03-04]. DOI: 10.1109/jproc.2006.873438.
- [42] SHASHI, Jawla. *Intensity modulation formats in optical communication system*. [online]. 2013, Volume 4, Issue 12 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://www.ijser.org/researchpaper%5CINTENSITY-MODULATION-FORMATS-IN-OPTICAL-COMMUNICATION-SYSTEM.pdf>
- [43] KUMAR, Shiv a M DEEN. *Fiber optic communications: fundamentals and applications*. Chichester, [England]: Wiley, 2014, 1 online zdroj (573 pages). ISBN 978-1-118-68343-9.
- [44] HARIS, Muhammad. *Advanced modulation formats for high-bit-rate optical networks*. August, 2008. Dissertation Thesis. School of Electrical and computer Engineering Georgia Institute of Technology.
- [45] NOVÁK, Pavel. *Simulace pokročilých optických modulací v prostředí OPTSIM*. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Boháč Leoš, Ph.D.
- [46] AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent Digital Modulation in Communications Systems — An Introduction*. In: [online]. USA, 2001 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7160E.pdf>
- [47] LACH, Eugen a Wilfried IDLER. *Modulation formats for 100G and beyond*. *Optical Fiber Technology* [online]. 2011, vol. 17, issue 5, s. 377-386 [cit. 2015-03-17]. DOI: 10.1016/j.yofte.2011.07.012.
- [48] BREACH, Tony. *40G and 100G Overview*. In: [online]. NORDUnet A/S, 2009 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <https://ftp.nordu.net/>
- [49] GROBE, Klaus a Michael EISELT. *Wavelength division multiplexing: a practical engineering guide*. xi, 414 pages. ISBN 9780470623022.

- [50] CHIEN-YU LIN. *Digital Nonlinear Compensation for Next-Generation Optical Communication Systems Using Advanced Modulation Formats*. 2014. Dissertation genehmigt. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- [51] SOTIROPOULOS, Nikolaos, Ton KOONEN a Huug de WAARDT. *Advanced Differential Modulation Formats for Optical Access Networks*. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2013, vol. 31, issue 17, s. 2829-2843 [cit. 2015-03-24]. DOI: 10.1109/jlt.2013.2267271.
- [52] BOHÁČ Ph.D, Leoš. *Optické komunikační systémy: Disperze vláken a její kompenzace*. ČVUT Praha [cit. 2015-04-24].
- [53] DREXLER, Petr. *Techniky potlačování dvojlomných jevů v optických vláknech*. Brno, 2010. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-4164-4.pdf>. Teze habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [54] *AllWave Zero Water Peak (ZWP) Single-Mode Optical Fibers* [online]. OFS, 2014 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/item/optical--fibers/ftx-optical-fiber/zwp-single-mode-optical-fibers>
- [55] *TrueWave REACH Low Water Peak Fibers* [online]. OFS, 2014 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/item/ofs/bers-nonzero-dispersion-optical-fibers-2-1/truwave-low-water-peak-reach-fibers-1?plpver=1001>
- [56] *TeraWave Fiber* [online]. OFS, 2015 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/item/ofs/mode-optical-fibers-optimized-effective-area-fiber/terawave-fiber>
- [57] *OFS Polarization-Maintaining Dispersion Compensating Fiber* [online]. OFS, 2015 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/item/optical--fibers/optical-fibers-for-short-pulse-lasers/pm-dcf>
- [58] VANDERKA, Aleš. *Studium vlivů atmosférického prostředí na typ modulace pro atmosférické optické komunikace*. VŠB-TU Ostrava, 2013. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Látal.
- [59] KOLÁŘ, Jakub. *Počítačový návrh a simulace pasivní optické sítě v prostředí Optiwave*. VŠB-TU Ostrava, 2012. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Látal.
- [60] DOROCIÁK, Petr. *Vliv polarizační disperze na chybovost optického kanálu*. 2008. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5151. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Kyselák.
- [61] BOBEK, Petr. *Systém pro zpracování dat z měřících přístrojů*. Zlín, 2010. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13750/bobek_2010_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Tomáš Dulík.
- [62] *Broadband Network Optical*. NTT ELECTRONICS CORPORATION. [online]. Dostupné z: http://www.ntt-electronics.com/en/products/electronics/wdm_cast.html

Zoznam príloh

Súčasťou DP je DVD.

Adresárová štruktúra priloženého DVD:

Namerané hodnoty/

Grafy/

Schémy simulácií v Optiwave/