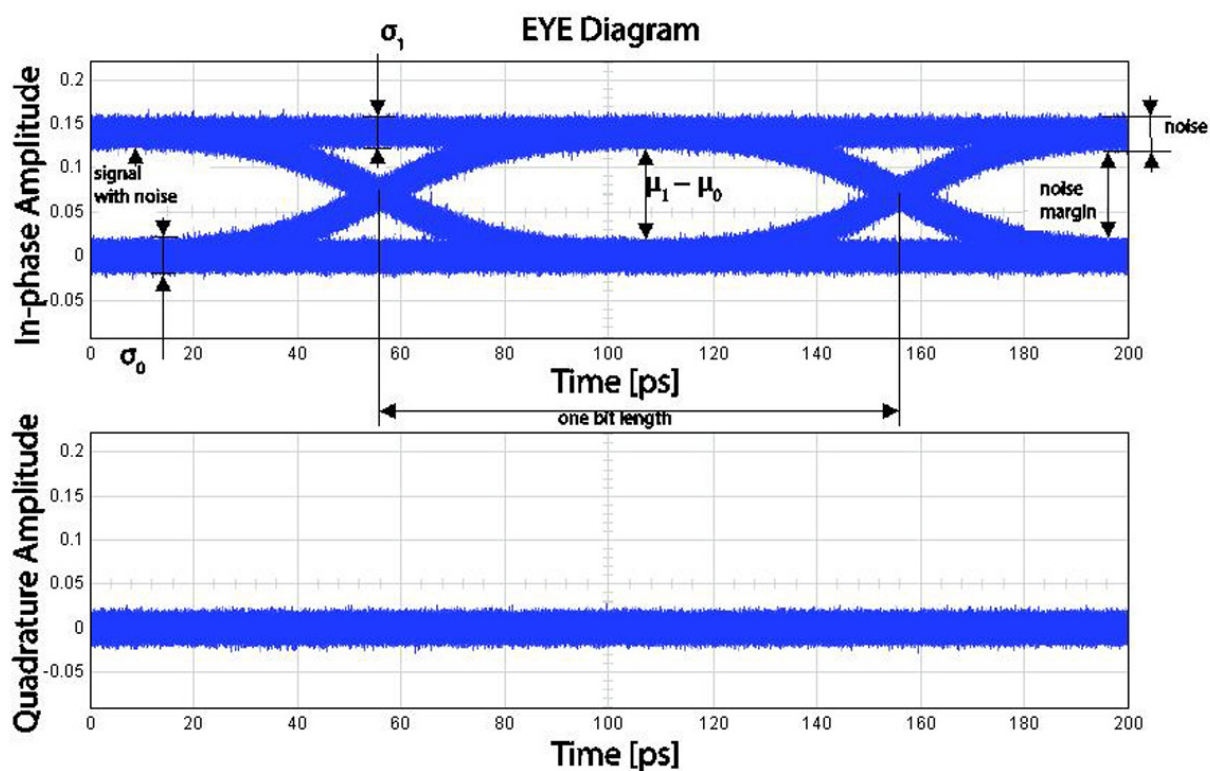


POKROČILÉ TECHNIKY OPTICKÉHO SPRACOVANIA SIGNÁLOV V OPTICKOM PRENOŠOVOM MÉDIU

Ing. Filip Čertík, PhD.
doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.



**POKROČILÉ TECHNIKY OPTICKÉHO SPRACOVANIA
SIGNÁLOV V OPTICKOM PRENOŠOVOM MÉDIU**

**Ing. Filip Čertík, PhD.
doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.**

Všetky práva vyhradené. Nijaká časť textu nesmie byť použitá na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo nakladateľstva.

© Ing. Filip Čertík, PhD., doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.

Recenzenti: prof. Ing. Milan Dado, PhD.
Ing. Norbert Majer, PhD.

ISBN 978-80-227-4513-0

Ing. Filip Čertík, PhD. – doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.

POKROČILÉ TECHNIKY OPTICKÉHO SPRACOVANIA SIGNÁLOV V OPTICKOM PRENOSOVOM MÉDIU

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave v Nakladateľstve STU, Bratislava,
Vazovova 5, v roku 2015.

Edícia monografií

Rozsah 90 strán, 60 obrázkov, 3 tabuľky, 5,426 AH, 5,593 VH, 1. vydanie,
edičné číslo 5884, vydané v elektronickej forme;

Schválilo Vedenie fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.

85 – 259 – 2015

ISBN 978-80-227-4513-0

Anotácia

Monografia sa zaoberá analyzovaním pokročilých techník spracovania signálu, ako sú modulačné a kódovacie techniky v optických prenosových systémoch. V úvode sú definované lineárne a nelineárne vplyvy optického prenosového média, charakteristika a princíp generovania viacstavových modulácií a charakteristika vybraných typov kódovacích techník. Monografia prináša rozsiahly prehľad súčasného stavu riešenej problematiky v oblasti zvýšenia prenosovej rýchlosti, dosahu a prenosovej kapacity optických prenosových systémov. Ďalej je predstavený vytvorený simulačný model pre optický prenosový systém, kde sú opísané možnosti analýzy a hodnotenia prenášaných optických signálov. Podrobne sú analyzované jednotlivé bloky pre generovanie optických signálov, ich kódovanie a modulovanie. Postupne sú tiež analyzované bloky pre simuláciu lineárnych a nelineárnych vplyvov prostredia optického vlákna a ich vplyv na prenášaný optický signál. Vytvorená simulácia je potom porovnaná s vplyvmi reálnych systémov. V poslednej časti je zobrazená analýza a návrh vybraného systému. V závere sú načrtnuté možné smery budúceho výskumu.

Kľúčové slová: modulačné techniky, kódovacie techniky, optické prenosové médium, simulačný model, parametre optického vlákna.

Annotation

This monograph deals with analysis of advanced signal processing techniques such as modulation and coding techniques in optical transmission systems. First, the characteristics of linear and nonlinear optical transmission medium effects are presented and the generating principle of multi-state modulation techniques and characteristics of selected types of coding techniques are presented. The monograph includes extensive overview of the state of art in the fields of increasing transmission rate, range and transmission capacity of optical transmission systems. Furthermore, the design and the simulation model for the optical transmission system are presented, where we disclose the possibility of analysis and evaluation of transmitted optical signals. Detailed analysis of each block of generating optical signals, their coding and modulation is shown. Next, we show the analysis of blocks for the simulation of linear and nonlinear fiber optic environmental influences and their impact on the transmitted optical signal. Created simulation is then compared with the effects of real systems. The last part displays the analysis and design of the selected system. The thesis also shows possible directions for future research at the end.

Keywords: modulation techniques, coding techniques, optical transmission medium, a simulation model of optical fibers.

Obsah

ZOZNAM SYMBOLOV	7
ZOZNAM SKRATIEK	10
1 ÚVOD	13
2 TEORETICKÉ A PRAKTICKÉ PREDPOKLADY	14
2.1 VLASTNOSTI OPTICKÉHO PRENOSOVÉHO MÉDIA	14
2.1.1 <i>Lineárne vplyvy</i>	15
2.1.2 <i>Nelineárne vplyvy</i>	18
2.2 VLASTNOSTI MODULAČNÝCH TECHNÍK V OPTICKOM PRENOSOVOM MÉDIU	22
2.2.1 <i>Modulačné formáty</i>	22
2.2.2 <i>Modulačné techniky</i>	23
2.2.3 <i>Mach-Zehnder modulátor MZM a realizácie modulačných techník</i>	25
2.3 DETEKČNÉ A OPRAVNÉ TECHNIKY KÓDOVANIA ZAMERANÉ NA OPTICKÉ PRENOSOVÉ SYSTÉMY	29
2.3.1 <i>Cyklické blokové kódy</i>	31
2.3.1 <i>Bose Chaudhuri Hocquenghem kódy BCH</i>	31
2.3.2 <i>Reedove-Solomonove kódy RS</i>	32
2.3.3 <i>Low Density Parity Check kódy LDPC</i>	33
3 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	35
3.1 EFEKTÍVNE VYUŽITIE PRENOSOVEJ ŠÍRKY PÁSMO	36
3.2 VYUŽITIE POKROČILÝCH MODULAČNÝCH A KÓDOVACÍCH TECHNÍK	37
3.3 VIACJADROVÉ OPTICKÉ VLÁKNA	38
3.4 ŠPECIÁLNE TVAROVANIE IMPULZOV SOLITÓNY	39
4 CIELE MONOGRAFIE	40
5 METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA	41
5.1 HODNOTENIE PRENÁŠANÝCH SIGNÁLOV	41
5.2 SIMULÁCIA ROZLIČNÝCH TECHNÍK POKROČILÉHO SPRACOVANIA SIGNÁLU A VIACKANÁLOVÝCH WDM SYSTÉMOV	44
5.3 SIMULÁCIA NEGATÍVNYCH VPLYVOV V PROSTREDÍ JEDNOMÓDOVÉHO OPTICKÉHO VLÁKNA	54
5.3.1 <i>Simulácia vplyvu chromatickej disperzie CD</i>	55
5.3.2 <i>Simulácia vplyvu polarizačne módovej disperzie PMD</i>	57
5.3.3 <i>Simulácia vplyvu štvorvlnového zmiešavania FWM</i>	59
5.3.4 <i>Simulácia vplyvu vlastnej fázovej modulácie SPM a krížovej fázovej modulácie XPM</i>	61
5.3.5 <i>Simulácia vplyvu Brillounovho a Ramanovho stimulovaného rozptylu</i>	63
6 ANALÝZA DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV A ICH VYHODNOTENIE	65

6.1 ANALÝZA NEGATÍVNEHO PROSTREDIA OPTICKÉHO VLÁKNA PROSTREDNÍTVOM SIMULAČNÉHO MODELU A JEHO OVERENIE	65
6.2 ANALÝZA VÝSLEDKOV V OBLASTI MODULAČNÝCH TECHNÍK PRE POUŽITIE V PROSTREDÍ OPTICKÉHO VLÁKNA.....	68
6.3 ANALÝZA VÝSLEDKOV V OBLASTI KÓDOVACÍCH TECHNÍK PRE POUŽITIE V PROSTREDÍ OPTICKÉHO VLÁKNA.....	70
6.4 NÁVRH REALIZÁCIE MODULAČNÝCH A KÓDOVACÍCH TECHNÍK	73
7 PÔVODNÉ VEDECKÉ PRÍNOSY	75
8 KONKRÉTNE ZÁVERY PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY	76
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	77
ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ AUTORA.....	85
RIEŠENÉ VÝSKUMNÉ ÚLOHY	89
PRÍLOHA PARAMETRE SMF VLÁKNA G.652:	90

Zoznam symbolov

α	specific attenuation coefficient	špecifický koeficient tlmenia
α_r	primitive n^{th} root of Galois Field	primitívny n -tý koreň Galoisovho poľa
α_p	specific attenuation coefficient of pump wave	špecifický koeficient tlmenia pre pumpovú vlnu
a	total signal attenuation	celkové tlmenie signálu
A	signal amplitude	amplitúda signálu
A_{eff}	optical fiber effective area	efektívna oblasť optického vlákna
$a(z,t)$	optical signal intensity course	priebeh intenzity optického signálu
β_1	first order dispersion coefficient	disperzný koeficient prvého rádu
β_2	second order dispersion coefficient	disperzný koeficient druhého rádu
β_3	third order dispersion coefficient	disperzný koeficient tretieho rádu
c	speed of light in vacuum	rýchlosť svetla vo vákuu
c_i	codeword	kódové slovo
$c(x)$	polynomial of code data	polynóm kódových dát
d	Hamming distance	Hammingova vzdialenosť
d_e	degeneracy factor	degeneračný faktor
d_{min}	minimum Hamming distance	minimálna Hammingova vzdialenosť
DGD	DifferentialGroup Delay	diferenciálne skupinové oneskorenie
D_{CD}	chromatic dispersion coefficient	koeficient chromatickej disperzie
D_{PMD}	polarization mode dispersion coefficient	koeficient polarizačne módovej disperzie
E	electric field vector of the mode	vektor elektrického poľa módu
ϵ_0	vacuum permittivity	permitivita vákuua
f	signal frequency	frekvencia signálu
f_m	modulation frequency	modulačná frekvencia
R_b	bit rate	bitová rýchlosť
$g(x)$	generating polynomial	generujúci polynóm

GVD	Group Velocity Delay	skupinové oneskorenie
G	generating matrix	generujúca matica
g_B	Brillouin scattering gain coefficient	zisk koeficientu Brillouinovho rozptylu
g_R	Raman scattering gain coefficient	zisk koeficientu Ramanovho rozptylu
$H(\omega)$	transfer function	prenosová funkcia
$I(t)$	signal intensity	intenzita signálu
$i(x)$	polynomial of information data	polynóm informačných dát
k	information word length	dĺžka informačného slova
K	information block length	dĺžka informačného bloku
L	optical fiber length	dĺžka optického vlákna
L_{er}	erbium doped optical fiber length	dĺžka erbiom dopovaného optického vlákna
L_{eff}	effective optical fiber length	efektívna dĺžka optického vlákna
n	codeword length	dĺžka kódového slova
n_r	refractive index	index lomu
n_{r0}	linear refractive index	lineárny index lomu
n_2	nonlinear refractive index	nelineárny index lomu
N	code block length	dĺžka kódového bloku
NF	noise figure	šumové číslo
P	optical power	optický výkon
P_i	input optical power	vstupný optický výkon
P_o	output optical power	výstupný optický výkon
$P_{sat}(\lambda)$	pump wave saturation power	saturovaný výkon pumpovej vlny
\mathbf{P}_{pol}	polarization vector	polarizačný vektor
P_{th_SBS}	power boundary by Stimulated Brillouin Scattering	hranica výkonu pre vznik stimulovaného Brillouinovho rozptylu
P_{th_SRS}	power boundary by Stimulated Raman Scattering	hranica výkonu pre vznik stimulovaného Ramanovho rozptylu

R_x	received data	prijaté dáta
$s(t)$	signal in time t	signál v čase t
s_k	syndrome	syndróm
t	time	čas
t_r	number of correctable errors	počet opraviteľných chýb
T_b	time of the bit interval	dĺžka trvania bitového intervalu
T_x	transmitted data	vysielané dáta
X_i	locator of i-th error	lokátor i-tej chyby
Y_i	value of i-th error	hodnota i-tej chyby
Q	quality factor	faktor kvality
z	distance	vzdialenosť
Φ	phase	fáza
λ	wavelength	vlnová dĺžka
ω	signal angular frequency	uhlová frekvencia signálu
w_c	number of ones in a column	počet jednotiek v stĺpci
w_r	number of ones in a row	počet jednotiek v riadku
μ	signal level	úroveň signálu
σ	derivation of signal level	odchýlky od úrovne signálu
γ	nonlinear Kerr coefficient	Kerrov nelineárny koeficient
$\Delta\tau_{CD}$	total signal extension due chromatic dispersion	celkové rozšírenie signálu vplyvom chromatickej disperzie
$\Delta\tau_{PMD}$	total signal extension due polarization mode dispersion	celkové rozšírenie signálu vplyvom polarizačne módovej disperzie
$\Delta\Phi$	phase shift	fázový posun
η	FWM efficiency	účinnosť FWM
η_p, η_s	optical wave evaluative sections	pomerové prierezy optickej vlny
q	number of bits in symbol	počet bitov v symbole
$\chi^{(1)}$	linear susceptibility	lineárna susceptibilita
$\chi^{(2)}$	the second-order susceptibility	susceptibilita druhého rádu
$\chi^{(3)}$	the third-order susceptibility	susceptibilita tretieho rádu

Zoznam skratiek

16QAM	16 Quadrature Amplitude Modulation	16-kvadratúrna amplitúdová modulácia (kľúčovanie)
ASK	Amplitude Shift Keying	amplitúdové kľúčovanie
BER	Bit Error Rate	bitová chybovosť
BCH codes	Bose Chaudhuri Hocquenghem	Bose Chaudhuri Hocquenghem kódy
CD	Chromatic Dispersion	chromatická disperzia
CW	Continuous Wave	spojitá vlna
DCF	Dispersion Compensating Fiber	vlákno kompenzujúce disperziu
DFB	Distributed FeedBack laser	laser so spätno-väzobnou distribúciou
DPSK	Differential Phase Shift Keying	diferenciálne fázové kľúčovanie
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying	diferenciálne kvadratúrne fázové kľúčovanie
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	husté vlnovodížkové multiplexovanie
ER	extinction ratio	pomer zhasínania
ECC	Error Correction Codes	kódy opravujúce chyby
FEC	Forward Error Correction	dopredná oprava chýb
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	erbiom dopované vláknové zosilňovače
FSK	Frequency Shift Keying	frekvenčné kľúčovanie
FWM	Four Wave Mixing	štvorvlnové zmiešavanie
ISI	Inter Symbol Interference	medzysymbolová interferencia
LDPC codes	Low Density Parity Check codes	kódy s nízkou hustotou paritnej kontroly
LH	Long-Haul	dlhé vzdialenosti
MCF	Multi Core Fiber	viacjadrové vlákno
MD	Mode Dispersion	módová disperzia
MZI	Mach-Zehnder Interferometer	Machov-Zehnderov interferometer

MZM	Mach-Zehnder Modulator	Machov-Zehnderov modulátor
NLSE	Nonlinear Schrödinger equation	nelineárna Schrödingerova rovnica
NRZ	Non Return to Zero	bez návratu k nule
OOK	On / Off Keying	kľúčovanie zapnúť/vypnúť
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	optický odstup signál-šum
OTH	Optical Transport Hierarchy	optická transportná hierarchia
PDM	Polarization mode Division Multiplexing	polarizačne módové multiplexovanie
PMD	Polarization Mode Dispersion	polarizačne módová disperzia
PolSK	Polarization Shift Keying	polarizačné kľúčovanie
PON	Passive Optical Network	pasívna optická sieť
PSK	Phase Shift Keying	fázové kľúčovanie
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexor	nekonfigurovateľný add-drop multiplexor
RS codes	Reed-Solomon codes	Reedove-Solomonove kódy
RZ	Return To Zero	s návratom k nule
SBS	Stimulated Brillouin-Scattering	stimulovaný Brillouinov rozptyl
SDM	Space Division Multiplexing	priestorové multiplexovanie
SPM	Self Phase Modulation	vlastná fázová modulácia
SRS	Stimulated Raman-Scattering	stimulovaný Ramanov rozptyl
ULH	Ultra-Long-Haul	ultra dlhé vzdialenosti
WDM	Wavelength Division Multiplexing	vlnovodľzkové multiplexovanie
XPM	Cross Phase Modulation	krížová fázová modulácia
TDM	Time Division Multiplexing	časové multiplexovanie
UDWDM	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing	ultra husté vlnovodľzkové multiplexovanie

1 Úvod

Od prvého objavu v roku 1966 enormne vzrástli požiadavky na optické vlákno. Jeho využitie je v dnešnej dobe veľmi široké. So vzrastajúcim dátovým tokom cez internet, elektronickým obchodom, počítačovými sieťami, multimédiami, hlasovou prevádzkou, dátami a videom vzniká potreba prenosového média s možnosťou vysporiadať sa s takýmto veľkým množstvom informácií. Optické vlákna, s ich enormnou prenosovou šírkou pásma, sa ukázali byť riešením. Optické prenosové systémy sa pôvodne využívali na prenos cez diaľkové a chrbticové siete, pričom postupne táto technológia preniká cez metropolitné siete až do prístupových sietí. So zvyšujúcimi sa nárokmi, ako sú vyššia prenosová rýchlosť a kapacita systémov, kladenými na optické prenosové systémy je prenos v základnom pásme nedostačujúci. Vytváranie nových optických sietí nemusí byť vždy realizovateľné, či už z ekonomickej, alebo praktickej stránky (rôzne povolenia). Preto sa používajú už existujúce optické siete, ktoré pri nízkych prenosových rýchlostiach vykazujú len malé vplyvy znehodnotenia prenosu, ale s narastajúcimi rýchlosťami lineárne a nelineárne javy prenosového prostredia značne zvyšujú svoj negatívny vplyv a vzniká potreba tieto problémy riešiť.

Okrem iných je jednou z vhodných možností použitie modulácií a kódovacích techník. Rozličné pokročilé modulačné techniky sú schopné prispôbiť signál pre dané prenosové médium tak, aby bol optický systém optimalizovaný a dosahoval vysoké prenosové rýchlosti a veľkú kapacitu. Vhodne zvolené kódovacie techniky umožňujú dekódovať signál pri vyššom šume sieťou a znížiť nároky pre optické prijímače. Vhodná kombinácia modulačných a kódovacích techník by umožnila prenos viacstavových modulácií, ktoré vyžadujú väčší odstup signálu od šumu, a zvýšila by tak celkovú prenosovú rýchlosť a kapacitu pre optické prenosové systémy. Pri nasadení vhodnej kombinácie modulačných a kódovacích techník je nutné takýto systém analyzovať. Z toho dôvodu je dôležité navrhnuť a simulovať pokročilé techniky spracovania signálu s ohľadom na danú prenosovú cestu, ktorá obsahuje lineárne aj nelineárne vplyvy prostredia optického vlákna. Takáto simulácia umožňuje získať hranice prenosových rýchlostí a dosahu optického systému pre zvolené pokročilé techniky spracovania signálu a pre vytvorenú prenosovú cestu s nastavenými parametrami a jednotlivé výsledky porovnať pred nasadením do reálnej prevádzky.

2 Teoretické a praktické predpoklady

2.1 Vlastnosti optického prenosového média

Monografia sa zameriava na prenos na diaľkové a metropolitné siete. Jedným z používaných médií sú jednomódové a mnohomódové optické vlákna, ktoré vykazujú veľkú kapacitu a možnosť prenosu vysokorýchlostných signálov oproti klasickým metalickým vedeniam. Pri analýze sme zistili, že mnohomódové vlákna nie sú vhodné na prenos vysokorýchlostných signálov a ich limit je do 1 Gbit/s v dôsledku módovej disperzie. Z toho dôvodu sa výskum zameriava na jednomódové vlákna, ktoré majú lepšie vlastnosti ako mnohomódové, no pri vyšších rýchlostiach vykazujú straty spôsobené nepriaznivými vplyvy optického vlákna.

Pri analýze uvažujeme, že každé optické vlákno reprezentuje frekvenčne závislú prenosovú sústavu. Optický impulz šíriaci sa v takejto prenosovej sústave môže byť opísaný pomocou nelineárnej Schrödingerovej rovnice NLSE (Nonlinear Schrödinger Equation) a je získaná z Maxwellových rovníc. Riešením rovnice NLSE získame parametre optického vlákna, a teda vplyvy ovplyvňujúce prenos, pričom jedným z riešení rovnice je Gaussov impulz [SAL91]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a(z,t)}{\partial z} = & -\frac{\alpha}{2} a(z,t) - \beta_1 \frac{\partial a(z,t)}{\partial t} - j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a(z,t)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a(z,t)}{\partial t^3} + j\gamma |a(z,t)|^2 a(z,t) \\ & - j\gamma T_R \frac{\partial |a(z,t)|^2}{\partial t} a(z,t) - \frac{\gamma}{\omega_0} \frac{\partial |a(z,t)|^2 a(z,t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.1)$$

kde $a(z,t)$ udáva smer intenzity optického signálu vo vlákne, z vyjadruje smer šírenia optického signálu, t je čas, α je špecifické tmenie optického vlákna, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ predstavujú disperzné koeficienty prvého, druhého a tretieho rádu a γ je Kerrov nelineárny koeficient.

Každý výraz rovnice predstavuje určitý vplyv, akým prostredie optického vlákna ovplyvňuje prenášaný optický signál. Práve pomocou tejto rovnice a použitím príslušných výrazov možno s veľkou presnosťou modelovať a simulovať vplyvy vyskytujúce sa v optickom vlákne. Hore uvedené výrazy sú rôznorodého charakteru, a preto ich môžeme rozdeliť na dve základné skupiny [SAL91, CUC06]:

- lineárne vplyvy, ktoré závisia od vlnovej dĺžky,
- nelineárne vplyvy, ktoré závisia od intenzity optického žiarenia.

2.1.1 Lineárne vplyvy

Majoritné straty optického signálu sú vo väčšej miere zapríčinené disperziou a stratami optického výkonu, nazývanými tlmenie. Tlmenie limituje výkon optického prenosového signálu, pričom možno použiť optické vlákna s malým tlmením prípadne zväčšiť dosah systému pomocou regenerátorov a optických zosilňovačov. Napriek použitiu zariadení zvyšujúcich dosah systému je prenosová cesta limitovaná disperziou, ktorá nám limituje prenosovú rýchlosť systému a vzdialenosť medzi regenerátormi, čo má za dôsledok zníženie celkového dosahu systému [CUC06].

Tlmenie

Najdôležitejšou charakteristikou optických vlákien je tlmenie. Tlmenie predstavuje prenosové straty. Je to vlastne strata výkonu, ktorá závisí od dĺžky prenosovej cesty. Rozvoj optických vlákien nastal až vtedy, keď ich prenosové straty boli menšie, ako straty metalických vedení (t. j. menej ako 5 dB/km). Celkové tlmenie signálu a [dB] je definované pre určitú vlnovú dĺžku a vyjadruje sa vzťahom [CUC06]:

(2.2)

$$a[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_0}$$

kde P_i predstavuje vstupný výkon a P_0 predstavuje výstupný výkon optickej trasy.

Veľkosť tlmenia optického signálu pre určitú vlnovú dĺžku je daná súčtom jednotlivých častí tlmenia [SAL91]:

- Rozptyl, ktorý zapríčiňuje vyžiarenie časti optického žiarenia do iného smeru, ako zamýšľaného.
- Absorpcia, ktorá má za dôsledok zmenu optického žiarenia na tepelnú energiu.
- Ohyb, ktorý má za príčinu vyžiarenie časti optického výkonu do plášťa.

Disperzia

Ďalší zdroj lineárnych vplyvov vyskytujúcich sa v optickom prenosovom médiu môže byť disperzia. Vo všeobecnosti má disperzia za následok rozšírenie optického impulzu v čase a fázový posun na konci optického vlákna. Na odstránenie alebo

kompenzovanie disperzie potrebujeme poznať typ disperzie a jej fyzikálnu podstatu, ktorú chceme odstrániť. Disperziu môžeme rozdeliť na:

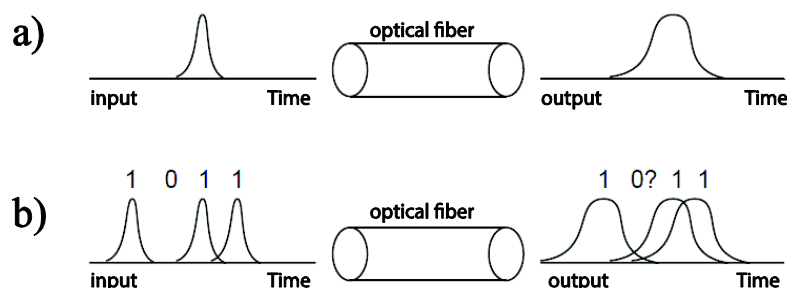
- módobú disperziu MD (intermódová, mnohomódová),
- chromatickú disperziu CD (intramódová, spektrálna),
- polarizačnú módobú disperziu PMD.

Módová disperzia MD

Módová disperzia MD sa vyskytuje len v mnohomódových optických vláknach v dôsledku nerovnakých prenosových dráh pre jednotlivé módy optického žiarenia. Tento výskum je zameraný na telekomunikačné prenosové systémy využívajúce prenos optických signálov cez jednomódové optické vlákna, a preto v našom optickom prenosovom systéme neuvažujeme MD.

Chromatická disperzia CD

Chromatická disperzia CD vzniká ako dôsledok toho, že optický vysielač vysiela miesto impulzu s jednou vlnovou dĺžkou impulz s úzkym spektrom vlnových dĺžok. Jednotlivé vlnovodĺžkové časti impulzu sa šíria vláknom odlišnou rýchlosťou, v dôsledku čoho vzniká rozšírenie impulzu. Rozšírenie impulzu narastá so zväčšujúcou sa šírkou spektra vyžiareného zo zdroja a v určitých prípadoch môže zapríčiniť medzisymbolovú interferenciu ISI (Intersymbol interference). Vplyv ISI predstavuje formu skreslenia signálu, kde jeden symbol začne prekrývať nasledujúci symbol. Vplyv ISI má za následok tzv. spoločné „rozmazanie“ po sebe idúcich bitov. Vplyv optického vlákna na optický impulz je znázornený na obr. 2.1a) a princíp vzniku ISI je zobrazený na obr. 2.1b) [HAS12].



*Obr. 2.1. a - Prenos impulzu cez optické vlákno a jeho rozšírenie na výstupe vlákna,
 b - Prenos viacerých impulzov cez optické vlákno a vznik ISI na výstupe vlákna*

Polarizačná módová disperzia PMD

Polarizačná módová disperzia PMD predstavuje vážny problém, ktorý limituje dosiahnuteľnú vzdialenosť a prenosové rýchlosti nad 10 Gbit/s v optických prenosových systémoch. PMD je časovo závislá veličina, ktorá degraduje šírku pásma prenosového systému a jej zmiernenie alebo potlačenie je cenovo nákladné [ALL03].

Počas prenosu svetla cez jednomódové vlákno k prijímaču je jeden mód optického žiarenia zostavený z dvoch ortogonálne polarizovaných módov. Vyplýva to z princípu polarizačných stavov v optickom vlákne. Takéto rozloženie optického signálu do dvoch polarizačných rovín je znázornené na obr. 2.2. V ideálnom optickom vlákne by sa tieto dva polarizačné módy šírili rovnakou rýchlosťou, ale v reálnom prípade je optické vlákno nesymetrické, nehomogénne a nedokonalé, čo môže spôsobiť rozličnú rýchlosť šírenia týchto polarizačných módov. Tento vplyv (známy ako dvojlom) je úmerný rozdielu v relatívnych indexoch lomu dvoch možných stavov [ALL03, HEF96].



Obr. 2.2. Rozloženie optického signálu do dvoch polarizačných rovín

PMD vzniká v dôsledku nedokonalosti tvaru optického vlákna tak, že optické vlákno nie je dokonale symetricky okrúhle a mení sa pozdĺž optického vlákna. Príčinou nesymetrickosti optického vlákna sú chyby spôsobené pri výrobe optického vlákna a vonkajšie vplyvy pôsobiace na vlákno. Vonkajšie vplyvy pôsobiace na vlákno vznikajú kombináciou vplyvu prostredia (t. j. zmeny teploty, posun v zemi, atď.) a efektom kabeláže (t. j. susedné vlákna vo zväzku, ohyb vlákna, atď.) [HEF96].

2.1.2 Nelineárne vplyvy

Nelineárne vplyvy značne ovplyvňujú optické prenosové impulzy prenášané v optických vláknach. Tieto vplyvy sú dynamickej povahy (menia sa v čase), a preto je zložité ich simulovať a kompenzovať. Nelineárne vplyvy možno rozdeliť na [IAN98, SIN07]:

- Nelinearity spôsobené *Kerrovým vplyvom*. Pri tomto type vplyvu fázová rýchlosť optickej vlny závisí od jej vlastnej intenzity. Kerrov vplyv popisuje zmeny v indexe lomu vlákna, ktoré sú spôsobené elektrickým rozrušením. Vzhľadom na Kerrov vplyv, sme schopní popísať nasledujúce vplyvy:
 - vlastná fázová modulácia SPM (Self Phase Modulation),
 - krížená fázová modulácia XPM (Cross Phase Modulation),
 - štvorvlnové zmiešavanie FWM (Four Wave Mixing).
- Nelinearity spôsobené *rozptylom*, ktoré sú zapríčinené nepružnosťou rozptylu fotónu na nižšiu energiu fotónu. Môžeme povedať, že energia svetelného impulzu sa mení na iný impulz s odlišnou vlnovou dĺžkou. Poznáme dva vplyvy spôsobené rozptylom, vyskytujúce sa v optickom vlákne:
 - stimulovaný Brillouinov rozptyl SBS,
 - stimulovaný Ramanov rozptyl SRS.

Vplyv vlastnej fázovej modulácie SPM

Vplyv vlastnej fázovej modulácie SPM predstavuje dôležitý limitujúci faktor pre vysokorýchlostné komunikačné systémy využívajúce husté vlnovodľžkové multiplexovanie DWDM [HIC10]. SPM vzniká v dôsledku Kerrovho vplyvu, kde sa index lomu optického vlákna zvyšuje s narastajúcim výkonom, a tak priamo ovplyvňuje nárast nelineárneho fázového posunu. Nelineárny fázový posun znižuje prenosovú rýchlosť signálov, pričom ovplyvňované sú hlavne fázovo modulované signály. Vzťah závislosti intenzity signálu a indexu lomu je popísaný nasledujúcou rovnicou [HIC10]:

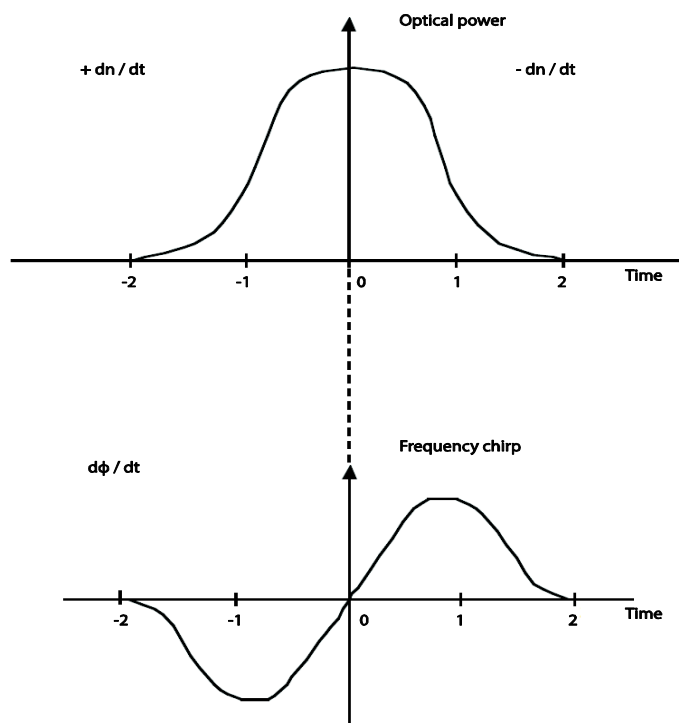
(2.3)

$$n_r = n_{r0} + n_2 I(t)$$

kde n_r predstavuje index lomu závislý od intenzity, n_{r0} je lineárny index lomu, n_2 je nelineárny index lomu a $I(t)$ predstavuje intenzitu signálu.

Vplyv SPM priamo závisí od meniaceho sa parametra n_r , ktorý mení fázu signálu prenášaného cez optické vlákno. Tento vplyv rastie s dĺžkou optického vlákna.

Zmeny vo fáze v čase spôsobujú zmeny vo frekvenčnom spektre. Táto zmena frekvencie signálu je nazývaná frekvenčný zdvih (frequency chirp). Ilustrácia závislosti zmeny frekvencie od intenzity impulzu je zobrazená na obr. 2.3 [SUL12].



Obr. 2.3. Ilustrácia frekvenčného rozšírenia v závislosti od intenzity

S narastajúcou dĺžkou vlákna začne byť vplyv SPM významný, a to hlavne v prípade, ak sa dĺžka vlákna predĺži použitím optických zosilňovačov, ako sú erbiom dopované vláknové a Ramanove zosilňovače pracujúce vo frekvenčnom okne C a L (1530 nm – 1625 nm).

Vplyv krížovej fázovej modulácie XPM

Vplyv krížovej fázovej modulácie XPM je veľmi podobný vplyvu SPM. XPM vyjadruje zmenu fázy signálu v závislosti od intenzít z kanálov odlišných vlnových dĺžok, a preto sa tento vplyv objavuje len pri použití vlnodĺžkového multiplexu WDM (Wavelength Division Multiplexing), kde cez jedno optické vlákno prenáša viac signálov na odlišných vlnových dĺžkach. V podstate vplyv XPM vyjadruje premenu výkonovej fluktuácie v jednom kanáli na určitej vlnovej dĺžke na fluktuáciu fázy na inom príbuznom kanáli odlišnej vlnovej dĺžky. Výsledkom vplyvu XPM je spektrálne rozšírenie signálu a skreslenie fázy signálu [SUL12].

Vplyv štvorvlnového zmiešavania FWM

Štvorvlnové zmiešavanie FWM predstavuje parametrickú interakciu medzi signálmi, ktoré splňajú špecifickú fázovú podmienku, ktorú nazývame sfázovanie. Tento nelineárny vplyv sa vyskytuje iba v systémoch, ktoré prenášajú viac signálov cez jedno optické vlákno pomocou technológie WDM a je klasifikovaný ako vplyv skreslenia tretieho rádu. V tomto prípade predpokladáme prenos troch lineárnych polarizovaných monochromatických signálov s uhlovou frekvenciou ω_j ($j = 1, 2, 3$) cez optické vlákno. Na vyjadrenie vplyvu FWM použijeme vektor polarizácie tretieho rádu, ktorý je daný rovnicou (2.4). Táto rovnica charakterizuje médium a je funkciou elektrického poľa. Ak túto rovnicu zjednodušíme, získame jednotlivé zložky vektora polarizácie \mathbf{P}_{pol} , pričom tri zložky majú frekvenciu vstupného poľa a ostatné majú frekvencie ω_k dané rovnicou (2.5) [AJM15].

(2.4)

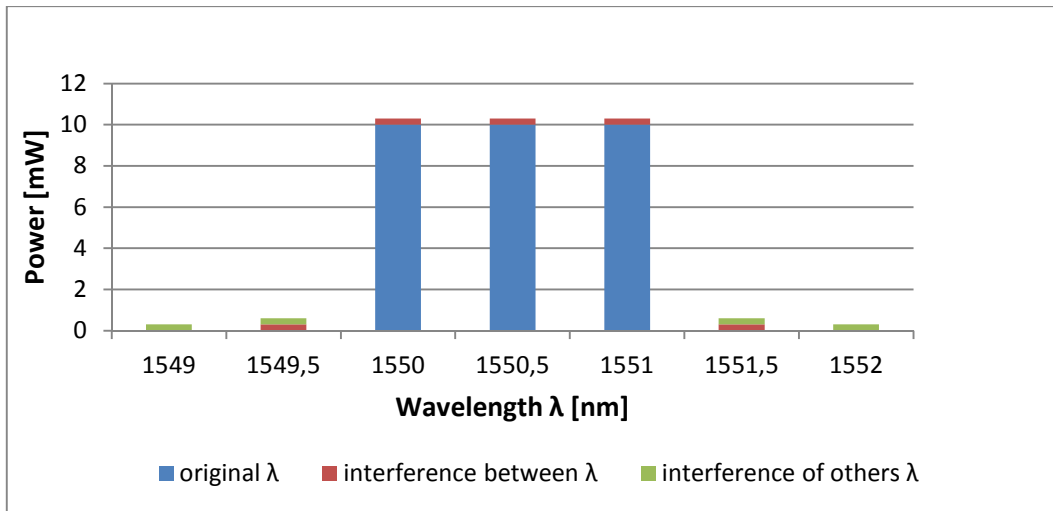
$$\overline{\mathbf{P}_{pol}} \approx \epsilon_0 \left\{ \chi^{(1)} \overline{\mathbf{E}} + \chi^{(2)} : \overline{\mathbf{E}\mathbf{E}} + \chi^{(3)} : \overline{\mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E}} \right\}$$

kde $\chi^{(1)}$ je lineárna susceptibilita, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ predstavujú susceptibilitu druhého a tretieho rádu a \mathbf{E} reprezentuje vektor módu elektrického poľa [KAR07].

(2.5)

$$\omega_k = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$$

Ako môžeme vidieť z rovnice (2.5), nelineárna interakcia generuje nové frekvenčné zložky vektora materiálovej polarizácie, ktorý sa môže prekrývať so vstupnými poľami. Aby nastal takýto prípad, musí byť splnená podmienka sfázovania. Frekvenčné komponenty, ktoré sa priamo prekrývajú so šírkou pásma vstupných signálov, spôsobia interferenciu s pôvodnými optickými signálmi, ako môžeme vidieť na obr. 2.4 [INO02].



Obr. 2.4. Princíp prenosu energie medzi susednými kanálmi vplyvom FWM

Stimulovaný Brillouinov rozptyl SBS

Stimulovaný Brillouinov rozptyl SBS vzniká kompresiou materiálov za prítomnosti elektrického poľa, ktoré vyvoláva elektro-zúženie (electrostriction). Pod vplyvom budiaceho oscilujúceho elektrického poľa s frekvenciou f_p , vzniká akustická vlna s frekvenciou f_a . Samovoľný rozptyl predstavuje energický prechod z elektrickej vlny, respektíve signálu (Pump wave) do akustickej vlny. Frekvenčný posun tejto akustickej vlny je okolo 11 GHz so spektrálnou šírkou pásma v rozmedzí približne 50 – 100 MHz (vďaka zisku koeficientu SBS) a chvenie obalu potom moduluje optické signály. Pri vytvorení akustickej vlny dochádza k interferencii s prenášanými signálmi, a tak produkuje vedľajšie zložky postranného pásma. Táto interferencia vystupuje ako zdroj podporujúci prechod energie signálu do akustickej vlny, ktorá bude zosilňovaná a bude vytvárať efekt chvenia [KUN02].

Stimulovaný Ramanov rozptyl SRS

Stimulovaný Ramanov rozptyl SRS je pozorovaný v optických vláknach pri prenose optických signálov. Svetlo rozptýlené molekulami a legovacími látkami (dopands) v jadre je excitované na vyššie energetické hladiny. Pri prechode z vyššej energetickej hladiny na nižšiu dochádza k znásobeniu fotónov v danej energetickej hladine. A tak vznikajú fotóny s rôznymi frekvenciami a energiami. Stimulovaná emisia nastáva vtedy, keď dodaná energia (pump energia) dosahuje medzné hodnoty [AUY03]. Ramanové spektrum závisí od životnosti excitovaného vibračného stavu elektrónov. Životnosť je v rozmedzí okolo

1 ns a šírka Ramanovho pásma je 1 GHz. Pri jednomódových optických vláknach je šírka Ramanovho pásma 10 THz. Vlnová dĺžka budiaceho lúča je zvyčajne 100 nm pod hodnotou znásobovanej vlnovej dĺžky. Aby sa predišlo poškodeniu vlákna tak sa redukuje vstupný efektívny výkon pomocou polarizačného multiplexovania signálov [AUY03].

2.2 Vlastnosti modulačných techník v optickom prenosovom médiu

Modulácia predstavuje úpravu signálu tak, aby signál získal odolnosť proti vplyvom vyskytujúcim sa v optickom prenosovom médiu a zároveň spĺňal požiadavky na kapacitu a prenosové rýchlosti. Existuje však niekoľko možných modulácií, pričom každá je charakteristická inými parametrami. Práve tieto parametre charakterizujúce danú moduláciu nám umožňujú vyrovnat' sa s rozličnými vplyvmi a určiť vhodnú moduláciu na navrhnutie komplexného prenosového systému [CHA06]. Jednou z prvých modulácií a štandardom pre prenos signálu cez optické prenosové médium sa stalo OOK (On/Off Keying) kľúčovanie, ktoré patrí do skupiny amplitúdového kľúčovania ASK (Amplitude Shift Keying).

2.2.1 Modulačné formáty

Tieto formáty definujú reprezentovanie jednotlivých impulzov a špecifikujú správanie sa signálu počas časového intervalu trvania bitu. Poznáme dva základné modulačné formáty [XUC03]:

- NRZ bez návratu k nule (Non Return To Zero),
- RZ s návratom k nule (Return To Zero).

Modulačný formát NRZ

NRZ je najjednoduchší modulačný formát. Pulz formátu NRZ sa generuje počas celej doby trvania jedného bitu. Táto metóda sa používa hlavne pri modulačných formátoch, ktoré pracujú so systémami ASK s priamou detekciou. Dôvody na použitie NRZ [XUC03]:

- tento variant nie je citlivý na šum fázy laserového zdroja,
- vyžaduje relatívne nízku elektrickú šírku pásma pre vysielateľ aj prijímač,
- má najjednoduchšiu konfiguráciu vysielateľa a prijímača,
- impulzy majú úzke optické spektrum.

Modulačný formát RZ

Charakteristická dĺžka trvania intervalu modulačného formátu RZ je polovičná oproti formátu NRZ. Pri unipolárnom formáte RZ je binárna jednotka reprezentovaná ako kladný impulz pre pol periódy T_b a na druhej pol perióde je nulový (vracia sa k nule). Výhody RZ:

- umožňuje zvýšenie odolnosti oproti nelineárnym efektom,
- potláča vplyv ISI,
- potláča vplyv účinku PMD v optickom vlákne,
- formát RZ zlepšuje citlivosť prijímača až o 3 dB.

Modulačný formát RZ je používaný pre diaľkové optické komunikačné systémy pracujúce pri vyšších bitových rýchlostiach [XUC03].

2.2.2 Modulačné techniky

Na prenos informácií v optickom prenosovom médiu z jedného bodu do druhého sa používajú elektromagnetické vlny s frekvenciou ~ 200 THz. Na prenos signálovej správy možno zmeniť (modulovať) jeden alebo viac parametrov elektromagnetickej vlny. Ak sa moduluje analógový signál, ide o moduláciu a ak sa moduluje digitálny signál, ide o kľúčovanie [XIO00]. Na úpravu signálu pomocou kľúčovania možno využiť niekoľko fyzikálnych parametrov a na základe použitých parametrov môžeme rozdeliť kľúčovanie na:

- ASK amplitúdové kľúčovanie (Amplitude Shift Keying),
- PSK fázové kľúčovanie (Phase Shift Keying),
- FSK frekvenčné kľúčovanie (Frequency Shift Keying),
- PolSK polarizačné kľúčovanie (Polarization Shift Keying),
- modulácia Duobinary.

Amplitúdové kľúčovanie ASK

Amplitúdové kľúčovanie (ASK), tiež nazývané OOK kľúčovanie, pracuje na princípe vysielania signálu pri vyslaní logickej jednotky a nevysielania žiadneho signálu pri vyslaní logickej nuly. Tieto úrovne signálu sa tiež nazývajú on a off úrovne a vzťah medzi nimi je daný pomerom ER zhasínania (Extinction Ratio). Hodnota ER závisí od spôsobu, akým sa signál generuje: priamo alebo externe laserovým zdrojom. V prípade externého modulovania je hodnota ER obmedzená na hodnotu ER vonkajšieho modulátora. Výhodou

klúčovania ASK je jednoduché generovanie signálu a jeho detekcia. V súčasnosti sa práve pre jednoduchosť stali tieto techniky najviac rozšírené a používané [SEA05].

Fázové klúčovanie PSK

Pri tomto type klúčovania sa už nemení amplitúda signálu, a teda je počas celého vysielania konštantná. Využíva sa tu ale zmena fázy na zakódovanie informácie. Pri signále s klúčovaním PSK treba potom uvažovať iba o koherentnej detekcii, ktorá vyžaduje lokálne oscilátory v prijímači pre porovnanie fázy prenášaného signálu s lokálnou fázou. Keďže jej technická realizácia je náročná, tak sa v praxi častejšie stretáme s podskupinou klúčovania PSK, a to diferenciálne fázovým klúčovaním DPSK. Pri klúčovaní DPSK je informácia zakódovaná vo fáze pomocou zmien dvoch po sebe idúcich bitov [XUC04].

Niektoré špeciálne binárne a viacúrovňové varianty PSK ako DBPSK alebo diferenciálna kvadratura PSK (DQPSK) umožňujú použitie priamych detekčných metód. DQPSK umožňuje ďalšie zlepšenie efektívnosti kódu pomocou štyroch rôznych fáz, pri ktorých symbolová rýchlosť je polovičná v porovnaní s DPSK. Pri DQPSK bitový tok, musí byť diferenčne zakódovaný pomocou digitálneho kódera. Detekciu signálu DPSK možno vykonať pomocou MZI (Machov–Zehnderov Interferometer), ktorý umožňuje zníženie detekčnej zložitosti v porovnaní s koherentnou detekciou [EVA11, CAR02].

Frekvenčné klúčovanie FSK

Tento typ klúčovania je založený na princípe prepínania dvoch hodnôt frekvencie laserového svetla. Obálka týchto signálov sa zložito generuje a rovnako ťažko detekuje, a preto vývoj FSK klúčovania nastal až pri vývoji vysoko prepínateľných laserov. Existuje aj klúčovanie založené na frekvenčnej zmene, známe ako disperzne podporovaný prenos DST (Dispersion Supported Transmission). Má ale nevýhodu v tom, že vysielač a prijímač musia presne parametricky zodpovedať. Preto sa tento formát v praxi nevyužíva [CHI12].

Polarizačné klúčovanie PolSK

Polarizačné klúčovanie PolSK funguje tak, že optické signály sú generované prepínaním polarizácie medzi dvoma ortogonálnymi priestormi. PolSK klúčovanie je charakterizované konštantnou signálovou obálkou, čo umožňuje lepšiu odolnosť proti nelineárnym efektom, lepšiu citlivosť v porovnaní s ASK, a napokon lepším využitím šírky pásma systému, čo je docielené používaním ortogonálnej polarizácie. Nevýhodou tejto techniky je zvýšená

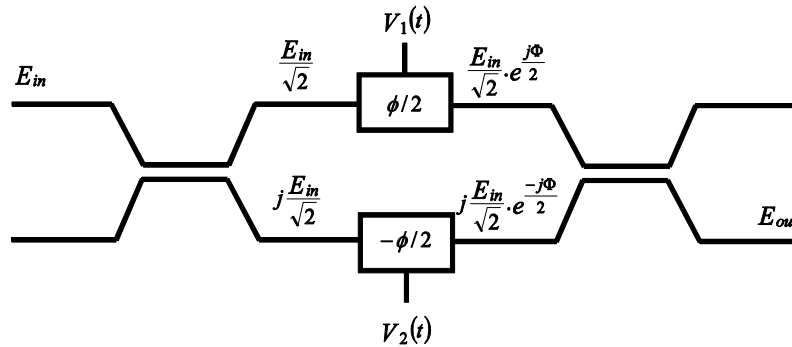
zložitosť generovania a detekcie signálu, rovnako ako aj citlivosť na polarizačné poruchy v optickom vlákne, ktorých vplyv sa zvyšuje s väčším počtom použitých kanálov [KAL99].

Modulácia Duobinary

Modulácia Duobinary je často používaná v optických systémoch s prenosovou rýchlosťou 40 Gbit/s na kanál. Jej hlavnými výhodami sú zvýšená tolerancia na CD a PMD disperziu a vysoká spektrálna účinnosť. Prvá výhoda umožňuje vysielat' vysokorýchlostný signál cez optické vlákno na veľké vzdialenosti bez potreby kompenzácie disperzie. Druhá výhoda umožňuje efektívnejšie využitie vlnovodízkových kanálov pri využití technológie WDM (užšie vzdialenosti vlnovodízkových kanálov). Obe možno pripísať faktu, že duobinary modulácia znižuje optickú šírku vysielaného bitu o faktor dva. Inými slovami, modulácia Duobinary vysielá R bitov/s signál so šírkou pásma menej ako $R/2$ Hz [SHT99]. V dôsledku porušenia Nyquistovej teórie, ktorá určuje na prenos R bitov potrebnú šírku pásma $R/2$ Hz, bude dochádzať k medzysymbolovej interferencii ISI. Modulácia Duobinary umožňuje správne detekovanie bitov aj pri vzniku ISI. Detekovanie bitov aj pri vplyve ISI umožňuje podstata modulácie Duobinary, a to spojenie dvojstavovej amplitúdovej modulácie s fázovou moduláciou [XIE04].

2.2.3 Mach-Zehnder modulátor MZM a realizácie modulačných techník

Jedným z často používaných zariadení pre moduláciu optického signálu je Machov-Zehnderov Modulátor MZM. MZM pracuje na princípe interferencie, ktorá je riadená pomocou modulácie optickej fázy. Hlavnou súčasťou MZM je 3 dB vláknový väzobný člen zabezpečujúci prepínanie vstupov tak, že iba jeden zo vstupov MZM bude použitý pre vstupujúcu postupujúcu optickú vlnu CW (Continuous Wave). Dôležitou vlastnosťou MZM je, že tu nastáva 90° fázový posun medzi priamym výstupom a skríženým väzobným výstupom. Práve tento 90° posun umožňuje fázovú rozmanitosť a implementovanie 90° optických hybridných typov kľúčovania (potrebné pre koherentné prijímače) [BER05]. Pri vytváraní MZM sa dva optické vláknové spojky ukladajú do interferometrického usporiadania s napäťovým riadením fázových posunov, ako je zobrazené na obr. 2.5 [XIE04].



Obr. 2.5. Vzťah medzi optickými poľami MZM

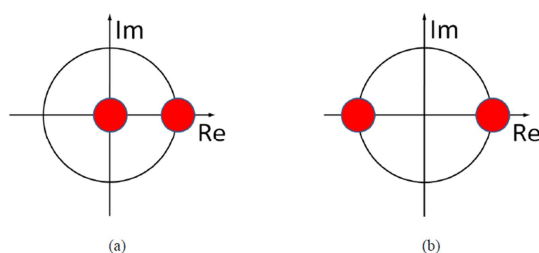
Prírastok od oboch optických polí šíriaci sa cez obidve ramená sa rovná celkovému výstupnému optickému poľu, kde pomer výstupného optického poľa ku vstupnému, a teda aj pole prenosovej funkcie sú reprezentované periodickou funkciou. Amplitúda prenosovej funkcie sa potom rovná odmocnine modulu poľa prenosovej funkcie $|E_{out}/E_{in}|^2$ a fáza prenosovej funkcie je argumentom poľa prenosovej funkcie $arg(E_{out}/E_{in})$. Dôležitým faktom je, že obidva parametre (amplitúda a fáza) signálu môžu byť modulované v závislosti od vstupných podmienok. Ďalším dôležitým využitím MZM je generovanie RZ impulzov, keď ako riadený signál privedieme sínusový signál [CAR02].

Generovanie binárnych modulácií pomocou MZM

Ako už bolo spomenuté, MZM môže byť použitý ako generátor signálov OOK alebo BPSK (Binary Phase Shift Keying) vtedy, keď na vstup privedieme elektrický dátový tok alebo ako generátor RZ33, RZ50 a RZ67 vtedy, keď na vstup privedieme elektrický taktovací signál. Binárny FSK signál môže byť vytvorený priamou moduláciou svetelného laserového zdroja elektrickým signálom. Generovanie FSK priamo metódou je limitované na relatívne nízke frekvencie modulácie odozvy laserového zdroja. Druhý spôsob pre generovanie vysokorychlostného FSK signálu je privedenie dvoch spojitéch vln CW z lasera do MZM modulátora. Výstupom z MZM bude fázovo modulovaný signál NRZ a následne demodulovaný na amplitúdovo modulovaný signál pomocou MZI. MZI interferometer je nevyvážený zavedením jedno-bitového časového oneskorenia linky. Vlnové dĺžky spojitéch vln sú starostlivo vybrané tak, aby jedna vlna dosahovala maximálny prenos MZI (konštruktívna interferencia), zatiaľ čo druhá dosahuje minimálny prenos (deštruktívna interferencia).

Pre využitie modulátora MZM na generovanie fázového kľúčovania musíme priviesť dve ortogonálne polarizované spojité vlny CW. V prvom prípade dochádza k superpozícii CW signálov, kde dochádza k vzniku signálu s fázou 0. V druhom prípade dochádza k deštruktívnemu stavu, kde vznikne signál s posunom fázy o π . Pri teoretickej úvahe by mal mať generovaný signál BPSK iba jednu úroveň intenzity, pretože žiadne amplitúdové kľúčovanie nie je prítomné [XIE04, YUC06].

Vhodné zobrazenie amplitúdy a fázy možno získať prostredníctvom konštelačného diagramu komplexnej roviny. Pre binárne intenzitou modulovaný signál (OOK) sú konštelačné body (logická „1“ a logická „0“) umiestnené na súradniciach (0,0) a (1,0) pre zdôraznenie, že žiadne fázové kľúčovanie nie je prítomné (obr. 2.6a). Pre signál BPSK sú konštelačné body umiestnené na súradniciach (1,0) a (-1,0) v dôsledku prítomnosti fázového posunu o π (obr. 2.6b) [KAL99].

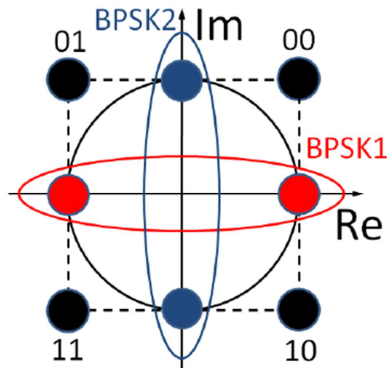


Obr. 2.6. Konštelačný diagram pre kľúčovanie: a – OOK a b – BPSK

Generovanie viacstavových modulácií pomocou MZM

Kľúčovanie QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) patrí do digitálnych fázových modulácií ale oproti kľúčovaniu BPSK požíva na prenos informácie 4 úrovne fázy. Výhodou takto modulovaného signálu je dvojnásobne vyššia spektrálna efektívnosť a o polovicu menšia symbolová rýchlosť na dosiahnutie rovnakej bitovej prenosovej rýchlosti, ako pri modulovaných signáloch BPSK a OOK. Signál QPSK môže byť generovaný pomocou fázového modulátora alebo pomocou vnorenej štruktúry využívajúcej dva modulátory MZM. Zatiaľ čo prvá možnosť vyžaduje iba jeden modulátor, a tým je podstatne ľahšie a lacnejšie implementovateľná. Nevýhoda tohto riešenia je, že tu dochádza k premene fázového šumu do šumu intenzity (amplitúdy). Z toho dôvodu je väčšina vysieláčov QPSK zostavená pomocou včlenenej štruktúry modulátorov MZM [KAH05]. V tomto prípade sa generujú dva BPSK signály, ktoré sú

vzájomne posunuté o $\pi/2$. Takáto interferencia dvoch signálov BPSK s fázovým posunutím o $\pi/2$ dáva vznik kľúčovaniu QPSK, ako je znázornené na obr. 2.7. Dva generované signály BPSK sú zobrazené červenou a modrou farbou a výsledný signál QPSK je zobrazený čiernou farbou [CAR02, KAH05].



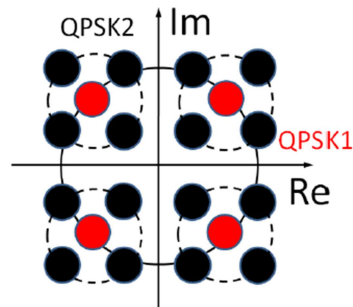
Obr. 2.7. Koncept generovania modulovaného signálu QPSK

Signál QPSK môže nadobúdať jednu zo štyroch fáz v danom čase ($0, \pi/2, \pi, 3\pi/4$), čo znamená, že každý symbol dokáže preniesť dva bity informácie. Symboly QPSK sú kódované Greyovým kódom (t. j. príľahlé symboly majú rozdielny iba jeden bit), pretože prechod medzi susednými kvadrantmi je ekvivalentný zmene stavu iba jedného z modulátorov MZM, zatiaľ čo prechod medzi protiľahlými kvadrantmi je ekvivalentný k zmene stavu oboch modulátorov MZM. Kódovanie Grayovým kódom je dôležité pre minimalizovanie bitovej chybovosti BER (Bit Error Rate), keď nastane symbolová chyba [GNA11].

Modulovaný signál 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) poskytuje dvojnásobnú spektrálnu efektívnosť oproti QPSK a znižuje potrebnú symbolovú rýchlosť na dosiahnutie ekvivalentnej celkovej rýchlosti, aj keď na úkor vyššieho potrebného optického odstupú signál/šum OSNR a horších vlastností v lineárnych a nelineárnych prenosových systémoch [GNA11, SAK08].

V súčasnosti existuje niekoľko metód na generovanie signálov 16QAM. Jedna z najvýznamnejších metód na generovanie signálov 16QAM je spojenie dvoch optických signálov QPSK s rôznymi úrovňami amplitúdy v MZI v optickej oblasti. Výhodou takto generovaného signálu 16QAM je, že nevyžaduje zložité nastavenia pre získanie viacúrovňového elektrického signálu. Princíp generovania signálu 16QAM pomocou interferencie dvoch signálov QPSK s 6 dB rozdielom v amplitúde je znázornená na

obr. 2.8. Na obrázku je zobrazený kruh s veľkou intenzitou (plná čiara) a kruh s malou intenzitou (prerušovaná čiara). Pri interferencii týchto dvoch signálov QPSK nám signál QPSK s veľkou amplitúdou určuje kvadrant, kde je mapovaný symbol 16QAM, zatiaľ čo signál QPSK s malou amplitúdou určuje fázu v rámci daného kvadrantu (červené súhvezdné body na obr. 2.8 zmiznú počas interferencie) [SAK08].



Obr. 2.8. Koncept generovania modulovaného signálu 16QAM pomocou dvoch signálov QPSK

2.3 Detekčné a opravné techniky kódovania zamerané na optické prenosové systémy

V dnešnej dobe je jedným z hlavných štandardov využívaných na prenos optického signálu cez optické siete štandard G.709. Tento štandard definuje štruktúru rámcov optickej transportnej hierarchie (Optical Transport Hierarchy OTH), ktorá na zabezpečenie integrity dát využíva doprednú opravu chýb (Forward Error Corection FEC), alebo tiež známu pod názvom kódy opravujúce chyby (Error Correcting Codes ECC). FEC je známy koncept, ktorý bol úspešne nasadený vo väčšine komunikačných systémov. Princíp spočíva v systematickom pridávaní redundantnej informácie, ktorá je použitá na opravu a detekciu chýb, ktoré sa vyskytnú pri prenose cez optické vlákno [CAN10, TOM97]. Existujú dva hlavné typy kódov pre opravu chýb:

- *konvolučný kód*, ktorý je spracovaný bit po bite,
- *blokový kód*, ktorý je spracovaný blok po bloku.

Konvolučné kódy sú založené na kódovaní signálu s konečnou impulzovou odpoveďou. Tento typ kódovania nevyžaduje rozdelenie vysielaných bitov na bloky. Konvolučné kódy môžu byť dekodované pomocou Viterbiho algoritmu, ktorá predstavuje metódu dekodovania s maximálnou spoľahlivosťou. Táto metóda je založená na nájdení najvhodnejšej novej cesty cez možné stavy prechodu. Zložitosť Viterbiho algoritmu sa

zvyšuje s počtom stavov pri dekódovaní. Preto je vhodné použiť kódy, ktoré využívajú malé množstvo nadbytočnosti [TOM97, MIZ05, GRO88].

Blokové kódy rozdeľujú dáta do blokov pevnej dĺžky a každý blok je kódovaný individuálne. Každý takýto blok môže byť vyjadrený v systematickej podobe, a tak informačné dáta ostanú v pôvodnej sekvencii, pričom sa na koniec pridáva paritný bit. V tomto prípade zložitosť dekódovania závisí hlavne od dĺžky kódu. Tento typ kódovania sa môže tiež využívať pre kanály, kde je potrebné udržiavať hlavičku dát malých rozmerov. Existuje niekoľko spôsobov dekódovania blokových kódov, ale tieto rozličné spôsoby majú rovnaké výsledky. Keďže predpokladáme, že optické siete musia mať nízku bitovú chybovosť BER (menšiu ako 10^{-12}), je vhodnejšie zamerať sa na blokové kódy [MIZ05, GRO88].

Iná možnosť je použiť opravu chýb pre paketové siete. V tomto prípade sa môže kódovanie kanála pre paketové siete uskutočniť rozličnými spôsobmi závislými od požiadaviek na oneskorenie a zložitosť. Prvou možnosťou je využitie kódovania kanála pre opravu chybných bitov kódom, ktorý je prispôbosený tak, aby vyhovoval charakteristikám kanála a zároveň zakódovať čo najviac užitočnej informácie pre zvýšenie efektívnosti kódu. Taktiež je možné takýmto kódom okrem opravy chýb detekovať chybné dáta a tak zistiť, či bol vyslaný paket správne prijatý, alebo je ho potrebné opäť vyslať. Funkcia zabezpečujúca opätovné vysielanie paketov môže byť optimalizovaná zvýšenou redundanciou, čo znamená, že prijímač skombinuje všetky informácie, ktoré prijal v pôvodnom prenose a opätovnom prenose paketov. V takomto prípade môže opätovné vysielanie pozostávať z pôvodne vyslaných dát ako pri prvom prenose, alebo z extra nadbytočnej informácie z operácie kódovania [BEY14].

Optické siete boli považované za siete, ktoré poskytovali dobrú komunikáciu, a preto nebolo nutné využívať FEC. V posledných rokoch rýchly nárast rozvoja v elektronike spôsobil zníženie nákladov na kódovanie kanála a tak zmenil pohľad na použitie kódov v optických prenosových systémoch. Prvé použitie FEC bolo aplikované na podmorské linky, kde bolo potrebné zvýšiť vzdialenosti medzi optickými zosilňovačmi a regenerátormi pre zníženie nákladov. Preto boli použité Reedove-Solomonove (RS) kódy. Organizácia ITU štandardizovala použitie RS(255,239) kódu, ktorý pridával približne 7 % nadbytočnosť a poskytoval približne zisk 7 dB pri chybovosti akceptovanej pre optické prenosové systémy ($\sim 10^{-12}$). V dnešnej dobe sa kódovanie kanála využíva aj pre rozličné diaľkové prenosi, a to aj pre komerčnú dostupnosť hardvéru pre kódovanie

a dekódovanie pri bitových rýchlostiach 10 Gbit/s [TOM97]. Ďalšou možnou alternatívou pri kódovaní v optických prenosových sieťach je možnosť využiť kódy Bose Chaudhuri Hocquenghem BCH alebo kódy s nízkou hustotou paritnej kontroly LDPC (Low-Density Parity Check), ktoré sa výrazne priblížili Shannonovej hranici [GRO88].

2.3.1 Cyklické blokové kódy

Cyklické blokové kódy sú často používané v digitálnych komunikačných systémoch. Hlavným dôvodom je ich jednoduchá štruktúra obvodov kódera a dekódera. Cyklické kódy sú definované ako cyklický lineárny (n,k) kód dĺžky n cez konečné pole a ľubovoľným cyklickým posunom kódového slova vznikne ďalšie kódové slovo. Tento posun a vznik kódového slova vyjadruje rovnica:

(2.6)

$$(c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}) \in C \quad \text{and} \quad (c_{n-1}, c_0, c_1, \dots, c_{n-2}) \in C$$

Informačné dáta $i(x)$ s dĺžkou k sú kódované pomocou polynómu $g(x)$ použitím rovnice (28).

(2.7)

$$c(x) = i(x).g(x)$$

kde $c(x)$ reprezentuje polynóm kódu stupňa $n-1$, $i(x)$ je informačný polynóm stupňa $k-1$ a polynóm generátora $g(x)$ musí byť stupňa $n-k$ [GRO88].

2.3.1 Bose Chaudhuri Hocquenghem kódy BCH

BCH kódy predstavujú cyklické polynomicke kódy cez konečné pole s vybraným generátorom polynómu. BCH kódy sú schopné opraviť počet t_r chýb a sú definované cez konečné polia $GF(q)$, kde $2 \cdot t_r + 1 < q$. Výhodou BCH kódov je použitie syndrómu na dekódovanie chýb, kde dochádza k detekovaniu lokality a hodnoty daných chýb.

Generovanie binárneho BCH kódu cez rozšírené pole $GF(q^m)$ je jednoduché na konštrukciu. Generátor polynómu $g(x)$ je potrebný na získanie cyklického kódu. Pre ľubovoľné celé číslo integer $m \geq 3$ a $t_r < 2^{m-1}$, existuje primitívny BCH kód s parametrami: $n = 2^m - 1$, $n - k \leq m \cdot t_r$, $d_{min} \leq 2 \cdot t_r + 1$. Generátor polynómu $g(x)$ BCH kódu s dĺžkou $2^m - 1$ so schopnosťou opraviť t chýb je daný:

(2.8)

$$g(x) = LCM \{m_1(x), m_2(x), \dots, m_{2t-1}(x), m_{2t}(x)\}$$

kde LCM predstavuje najmenší spoločný násobok (Least Common Multiple). Po získaní polynómu $g(x)$ sa kód vygeneruje pomocou rovnice (2.7).

Existuje niekoľko možných algoritmov založených na výpočtoch hodnôt syndrémov pre dekódovanie BCH kódov [GRO88].

2.3.2 Reedove-Solomonove kódy RS

RS kódy patria do skupiny cyklických blokových kódov, ktoré sú široko používané v komunikačných systémoch a boli ako prvé FEC kódy použité v optických prenosových systémoch. RS kódy sú príbuzné s BCH kódmi a môžu byť definované ako primitívny BCH kód s dĺžkou $n = q - 1 = 2^s - 1$ cez $GF(q) = GF(2^s)$.

RS kódy sú špecifikované ako $RS(n, k)$, alebo ako $RS(n, k, d_{min})$, kde n reprezentuje dĺžku kódu, k reprezentuje dĺžku informačných bitov a d_{min} je minimálna Hammingova vzdialenosť. Predpokladajme, že t_r je počet chýb, ktoré môžu byť opravené, potom $2.t_r = (n - k)$ zobrazuje počet opraviteľných chýb t_r a počet detekovateľných chýb $2.t_r$ pre špecifikovaný kód. Minimálna Hammingova vzdialenosť d_{min} zobrazuje maximum opraviteľných chýb, ktorý je daný kód schopný opraviť a je vyjadrený rovnicou [GRO88]:

(2.9)

$$t_r = \frac{n - k}{2} \geq d_{min}$$

Predpokladajme RS kód s dĺžkou $n = q - 1$ cez konečné pole $GF(q)$ s počtom elementov q a predpokladajme, že α_p je primitívny n -tý koreň z konečného poľa $GF(q)$, kde d patrí do intervalu $1 \leq d \leq n$, potom generujúci polynóm $g(x)$ je daný vzťahom:

(2.10)

$$g(x) = \prod_{i=1}^{d-1} (x - \alpha_p^i) = (x - \alpha_p)(x - \alpha_p^2) \dots (x - \alpha_p^{d-1})$$

RS kódy môžeme rozdeliť na dva typy:

- nesymetrické, kde: $c(x) = i(x) * g(x)$,
- symetrické, kde: $c(x) = i(x) * x^{n-k} + i(x) * x^{n-k} \text{ mod } g(x)$.

Dekódovanie RS kódov je založené na syndrómovej rovnici danej:

(2.11)

$$s_k = \sum_{i=1}^t Y_i X_i^k; \quad k = 0, 1, \dots, 2t_r - 1$$

kde X_i predstavuje lokátor i -tej chyby a Y_i je jeho hodnota [SON02].

2.3.3 Low Density Parity Check kódy LDPC

LDPC kódy patria medzi lineárne samoopravné kódy, ktoré sú schopné najviac sa priblížiť k prenosu dát rýchlosťou blízkej Shannonovej hranici (kapacita kanálu). Jednou z hlavných nevýhod tohto kódu je vysoká časová náročnosť kódovacieho algoritmu, a preto tieto kódy neboli donedávna zaujímavé pre prenos v optických prenosových systémoch. Aktuálne sa však začalo uvažovať o rozdelení vysokorýchlostného toku dát na pomalšie toky, ich následné kódovanie a ich spojenie do vysokorýchlostného toku dát. Takýto optický prenosový systém by bol schopný používať aj časovo náročné kódy LDPC [DJO06].

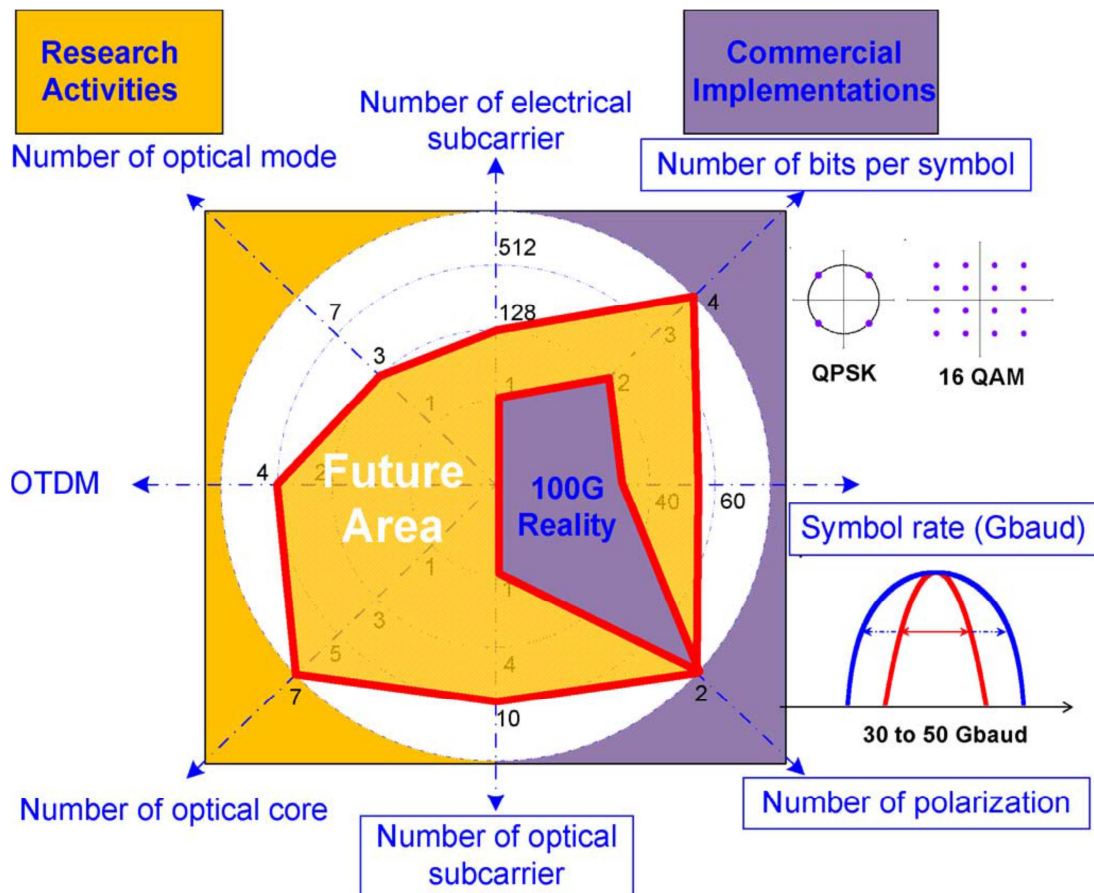
LDPC kódovanie je definované na základe LDPC matice \mathbf{H} (Low Density Parity Check matrix). Ak označíme dĺžku informačného bloku K , dĺžku prenášaného bloku N a priemerná váha stĺpca bude $w_c > 2$ (váha vektora predstavuje počet nenulových komponentov vektora), potom $M = (N - K)$ je počet paritnej kontroly v kóde. Potom matica \mathbf{H} sa skladá z M riadkov a N stĺpcov. Na generovanie kódového slova je potrebné získať generujúcu maticu \mathbf{G} . Ak upravíme maticu \mathbf{H} do podoby $[\mathbf{P}^T \mathbf{I}]$, potom maticu \mathbf{G} môžeme získať úpravou matice \mathbf{H} tak, že $\mathbf{G} = [\mathbf{I} \mathbf{P}]$. V závislosti od matice \mathbf{H} môžeme rozdeliť LDPC kódy na pravidelné a nepravidelné. LDPC kód je pravidelný, ak počet jednotiek v stĺpci w_c matice \mathbf{H} je konštantný pre každý stĺpec a zároveň platí, že počet jednotiek v riadku $w_r = w_c * (n/m)$ je konštantný pre každý riadok. Ak matica \mathbf{H} je nízkej hustoty (riedka), ale počet jednotiek v stĺpcoch alebo riadkoch nie sú konštantné, nazývame tento kód nepravidelným [LIN12].

Existuje niekoľko možností dekódovania LDPC kódov, ktoré sa menia v závislosti od kódovania. Najjednoduchšia schéma dekódovania prijatého signálu je dekódovanie tvrdým rozhodovaním (Hard Decision Decoding). Pri použití dekódovania tvrdým rozhodovaním sa vygeneruje rovnica paritnej kontroly. V závislosti od rovnice paritnej kontroly sa definuje metrika hodnotenia. Výsledkom tejto metriky je definovanie sady bitov, ktoré je

potrebné opraviť. Následne sa zmenia hodnoty sady bitov, skontroluje sa výsledok a prejde sa k ďalšej iterácii. Druhou možnosťou dekódovania LDPC je možnosť využiť dekódovanie jemným rozhodovaním (Soft Decision Decoding), ktoré je presnejšie, ale časovo náročnejšie, a teda pri vysokorýchlostných signáloch nie je zaujímavé [WUM14, DJO04].

3 Súčasný stav riešenej problematiky

Od 80. rokov 20. storočia, kedy sa uskutočnil prenos 400 Mbit/s signálu pri 1300 nm vlnovej dĺžke cez jednomódové vlákno dlhé 50 km, sa začal rýchly rozvoj optokomunikačných systémov a sietí. Pre zvýšenie dosahu systému sa prešlo na vlnové dĺžky 1550 nm, kde koeficient tlmenia vlákna je nižší ako 0,2 dB/km. V dnešnej dobe neustále sa zvyšujúca požiadavka na kapacitu a prenosové rýchlosti viedla k používaniu rozmanitých technológií pre dosiahnutie uspokojenie novovzniknutých širokopásmových služieb. Existuje niekoľko možných spôsobov pre dosiahnutie zvýšenie parametrov optických systémov, ktoré v súčasnosti ešte nie sú realizované. Na obr. 3.1 sú znázornené možnosti rozvoja nových technológií pre optické prenosové systémy uvedené v článkoch [JIA12, ROH14].



Obr. 3.1. Možnosti zvýšenia prenosových rýchlostí a kapacity optických prenosových systémov

3.1 Efektívne využitie prenosovej šírky pásma

Technológia vlnodĺžkového multiplexu WDM je prostriedkom pre zväčšenie prenosovej kapacity systému, ktorý umožňuje využitie rozličných pokročilých techník spracovania optických signálov. Táto technológia je realizovaná pridaním optických zdrojov s rôznymi vlnovými dĺžkami v rozličných uzloch siete kruhovej a stromovej topológie použitím rekonfigurovateľného add-drop multiplexora ROADM. V minulosti bola táto technológia vyhradená pre prenos bod-bod pri použití rádovo jednotiek kanálov. V súčasnosti sa WDM používa vo všetkých typoch siete – diaľkové siete (DWDM), metropolitné (Coarse WDM) a prístupové (pasívne optické siete WDM-PON). Jednotlivé technológie WDM sa líšia v počte kanálov a umiestnením jednotlivých kanálov v rámci spektra. Nasadenie širokospektrálnych optických zosilňovačov pracujúcich vo C a L pásmach ako erbiom dopované vláknové zosilňovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) a Ramanove zosilňovače umožňujú zvýšenie dosahu diaľkových sietí, pri ktorých by bolo použitie elektrických regenerátorov 3R (časovanie, tvarovanie, zosilnenie) technicky a cenovo náročné. Dnešný trend vedie k znižovaniu nákladov na bit/s/Hz, čo priamo vedie k potrebe vyššej rýchlosti príslušných optických prenosových rozhraní. Všetky diaľkové optické prenosové systémy s prenosovou rýchlosťou 100 Gbit/s na kanál, či už vo vývoji alebo nasadené, sú založené na namodulovaní polarizačne multiplexovaného QPSK (PDM-QPSK) kľúčovania na jednu nosnú frekvenciu (vlnovú dĺžku) pri použití koherentnej detekcie spojenú s digitálnym spracovaním signálu. Dosiadnutá spektrálna účinnosť je 2 bity/s/Hz cez konvenčnú 50 GHz optickú mriežku, kde celková kapacita systému je 10 TB/s pri prenose cez vlnové dĺžky spadajúce do okna C [ESS10]. Jedno z možných riešení zvýšenia kapacity takýchto systémov je použiť viac optických nosičov nazývaných superkanály a prekonať tak obmedzenie šírky pásma a rýchlostí optoelektronických komponentov prostredníctvom ultra hustého WDM (UDWDM) využitím 100/200 Gbit/s kanálov. Experimentálne výsledky uvedené v odbornom článku [CHA09] demonštrujú prenos jedného superkanála pri využití PDM-QPSK formátu na 7000 km. Pri návrhu a realizovaní technológií WDM však treba uvažovať s vplyvmi prostredia optického vlákna, ktoré obmedzujú ich dosah a počet použitých kanálov [FUK01]. Celkový výkon vložený do optického vlákna je väčšinou obmedzený hranicou stimulovaného Ramanovho rozptylu, ktorý pri prekročení určitej hraničnej výkonovej úrovni preniesie značnú časť výkonu medzi kanálmi. Ďalší nepriaznivý vplyv obmedzujúci vzdialenosti a výkony medzi jednotlivými kanálmi je vplyv FWM, ktorý priamo ovplyvňuje susedné kanály [TAG96].

3.2 Využitie pokročilých modulačných a kódovacích techník

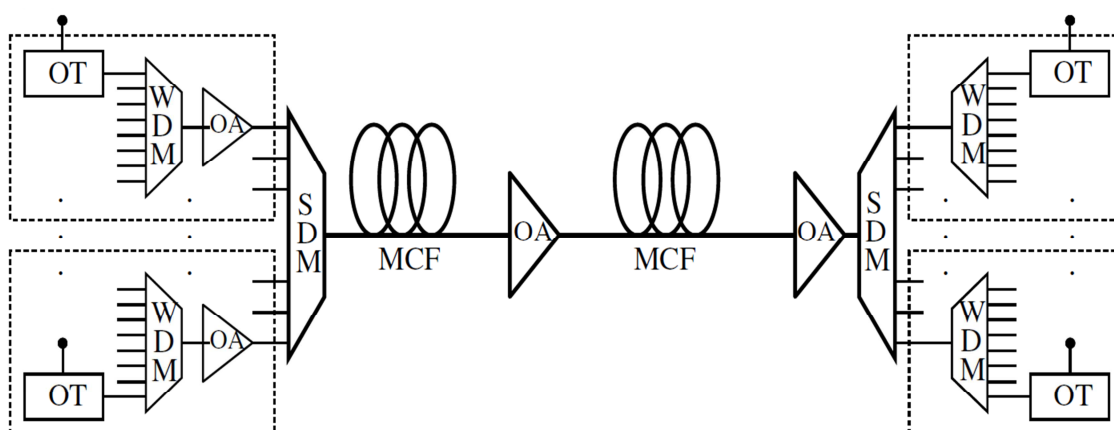
Jedným z ďalších možných riešení pre zníženie nákladov na informačný bit je zvýšenie prenosových rýchlostí na prenosový kanál. Súčasne nasadené optické prenosové systémy využívajú na prenos informácie PDM-QPSK signály s koherentnou detekciou a soft decision elektronickými obvodmi pri využití RS alebo BCH kódov. Tieto systémy pracujú s rýchlosťami 40 Gbit/s na jeden prenosový kanál. Využitím viacstavových modulácií (8PSK, 16QAM, 32QAM) možno zvýšiť prenosovú rýchlosť systémov na 100 Gbit/s a viac na jeden kanál. Tieto viacstavové modulácie však majú nižšiu odolnosť proti šumu generovaným prostredím optického vlákna a ich odolnosť klesá s počtom stavov modulácie [OLM13, WIN06]. Pre využitie viacstavových modulácií je nutné zabezpečiť v sieti nasledujúce požiadavky:

- nízku stratovosť optického výkonu signálu v optických komponentov siete (zahrňujúci prenosové vlákno, disperziu kompenzujúce zariadenia a optické prepínače a smerovače v sieti) pre minimalizovanie nutnosti optického zosilnenia a vloženia šumu spojenú so zosilnením,
- nízkošumové optické zosilňovače (ako EDFA a Ramanove zosilňovače) pre zníženie znásobovania šumu cez jednotlivé zosilňovače,
- pokročilé optické vlákna redukujúce nelineárne vplyvy pôsobiace na signál a umožňujúce zvýšenie vloženého výkonu vo vlákne.

Pre zabezpečenie prenosu cez kanál s vysokou chybovosťou BER možno použiť doprednú opravu chýb FEC, ktorá znižuje požiadavky optického odstupu signálu-šumu OSNR v optických prijímačoch. V súčasnosti sa experimentuje a uvažuje o nasadení Turbo a LDPC kódov, ktoré dosahujú oproti RS kódom zlepšenie BER až o 2,5 do 3 dB. Jednotlivé experimentálne výsledky sú uvedené v článkoch [DJO07, RAH15]. Výber vhodnej kombinácie modulačnej a kódovacej techniky umožňuje zvýšenie prenosovej rýchlosti na kanál a pri využití technológie WDM sa kapacita takto navrhnutého optického systému pohybuje okolo 1,28 Tbit/s na vzdialenosti od 1000 až 2000 km optického vlákna [OUC06]. Experimentálne výsledky jednotlivých modulačných a kódovacích techník sú uvedené v článkoch [DJO07, RAH15, OUC06].

3.3 Viacjadrové optické vlákna

Väčšina optických sietí je konštruovaná ako chrbticová sieť, vzhľadom na vysokú kapacitu, ktorá môže byť poskytnutá pomocou optických vlákien. Na dosiahnutie požadovanej kapacity systémov sa používajú rozlične multiplexné techniky, ako napríklad časové multiplexovanie TDM, WDM a PDM. Spektrálna hustota optických vlákien sa s vývojom optických technológií približuje k dosiahnutiu Shanonovej hranici. Stále sa zvyšujúce nároky na optické prenosové systémy vedú k nasadzovaniu stále väčšieho počtu optických vlákien, ktoré sú cenovo náročné, ale tiež spôsobujú preťaženie niektorých vláknových potrubí. Z toho dôvodu sa upriamila pozornosť na viacjadrové optické vlákno MCF (Multi Core Fiber), ktoré využíva priestorové multiplexovanie SDM (Space Division Multiplexing) pre zvýšenie kapacity systémov. MCF vlákna umožňujú zvýšiť hustotu vlákien a poskytnúť tak oveľa väčšiu kapacitu v rámci jedného optického kábla. Táto technológia vytvára priestor pre ďalšie mechanizmy pre prepínanie optických signálov v rámci optických prepínačov a smerovačov. Princíp optických prenosových systémov využívajúcich WDM a SDM multiplexovanie je v článku [KOR12]. Avšak táto technológia je nákladovo náročnejšia na výrobu vlákien MCF a jeho pridružených sieťových komponentov. Výroba a experimentálne výsledky sú podrobne analyzované v článkoch [TOT12, CHO01, LEE14, LIY14].



Obr. 3.2. Možnosti zvýšenia prenosových rýchlostí a kapacity optických prenosových systémov

3.4 Špeciálne tvarovanie impulzov Solitóny

Jedným z hlavných limitujúcich faktorov pri prenose cez prostredie optického vlákna je lineárny vplyv disperzie, špeciálne pri prenose vysokorýchlostných optických signálov cez dlhé komunikačné trasy. Špeciálne tvarované impulzy solitóny, ktorých fyzikálna podstata im umožňuje zachovať si tvar impulzu pri prenose cez dlhé vzdialenosti niekoľko tisíc kilometrov, nachádzajú svoje uplatnenie v optických sieťach prenášajúcich obrovské množstvo informácie. Optické solitóny sú lokalizované elektromagnetické vlny, ktoré sa šíria bez zmeny cez nelineárne optické médium pri robustnej rovnováhe medzi nelineárnymi vplyvmi prostredia lineárneho rozšírenia vplyvom disperzie a/alebo difrakcie [SHA11, DIN11]. Solitóny možno rozdeliť na časové (temporal) a priestorové (spatial), v závislosti od toho, či sa ohraničenie svetla vyskytuje v čase alebo priestore počas prenosu. Oba typy solitónov sa vyvíjajú z nelineárnej zmeny v indexe lomu materiálu spôsobené zmenou intenzity svetla, nazývaný Kerrov vplyv. Pri priestorovom solitóne počas prenosu signálu elektromagnetické pole mení index lomu jadra, ktorý vytvára štruktúru ako pri gradientnom vlákne. Pri časovom solitóne možno prenášať signál bez zmeny jeho tvaru pomocou rovnováhy medzi nelineárnym SPM a lineárnym disperzným vplyvom optického vlákna. Najnovšie experimentálne výsledky uverejnené v článku [SUZ94] prenášajú optické solitóny cez optický prenosový systém na vzdialenosť 12 200 km pri rýchlosti 10 Gbit/s. Jedna z nevýhod takýchto systémov je nutnosť použitia optického vlákna na vlnových dĺžkach, kde dochádza k anomálnej disperzii (index lomu klesá s rastúcou vlnovou dĺžkou) a udržiavanie amplitúdy solitónov počas celého prenosu cez optické vlákno [GEO97]. Jednotlivé analýzy a experimentálne výsledky sú zobrazené v článkoch [BAL09, HAS00, SEG04].

4 Ciele monografie

Vzhľadom na uvedený prehľad súčasného stavu riešenej problematiky je zrejmé, že zvyšujúce nároky na prenosovú rýchlosť a kapacitu nových, alebo už nasadených optických systémov majú za následok použitie nových často drahých technológií. Tento dôvod vedie k hľadaniu nových možných riešení, ktoré sú cenovo dostupné a technicky jednoducho realizovateľné. Jedným z vhodných riešení je využitie viacstavových modulácií s vhodnou opravou chýb. Takéto riešenie zvýši prenosové rýchlosti a kapacitu na už vybudovaných optických prenosových systémoch a zníži chybovosť dát. Hlavným cieľom skúmania bude nájsť optimálne spojenie modulácie a kódu na opravu chýb z hľadiska dĺžky vlákna a prenosovej rýchlosti 40 Gbit/s, 100 Gbit/s a viac pri prenose cez diaľkové siete a použitia jednomódových vlákien.

Na základe získaných poznatkov v danej problematike sme túto prácu zamerali na nasledujúce body:

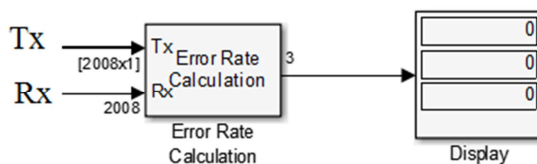
1. vytvorenie simulačného modelu pre lineárne a nelineárne vplyvy optického prenosového média v programe Matlab Simulink a porovnanie výstupných parametrov signálu pomocou BER a diagramov oka s výsledkami iných publikovaných prác,
2. rozšírenie vytvoreného simulačného modelu o existujúce a nové viacstavové modulačné techniky pre optické prostredie,
3. návrh a implementácia techniky doprednej opravy chýb FEC do vytvoreného simulačného modelu,
4. implementovanie techník iných opravných kódov,
5. analýza výsledkov simulácie a ich porovnanie s výsledkami iných publikovaných prác,
6. návrh realizácie navrhovaných modulačných a kódovacích techník v reálnych optokomunikačných systémoch a sieťach

5 Metodika práce a metódy skúmania

Cieľom monografie je návrh, realizácia a vyhodnotenie rozličných modulačných a kódovacích techník v optickom prenosovom médiu. Prvým krokom je vytvorenie simulačného modelu, ktorý umožňuje meniť parametre prostredia optického vlákna. Vytvorený simulačný program simulujúci optické prenosové médium je uskutočňovaný v prostredí Matlab Simulink 2014a a Matlab GUI. Matlab GUI je vytvorený pre jednoduchšie vkladanie parametrov optického vlákna, na základe ktorých sú vypočítané lineárne a nelineárne vplyvy optického vlákna. Program môže byť dimenzovaný na prenosové rýchlosti 1 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s a 100 Gbit/s na jeden prenosový kanál.

5.1 Hodnotenie prenášaných signálov

Jedno z najčastejšie používaných hodnotení prenášaných signálov je meranie chybovosti signálu *BER* (Bit Error Rate). *BER* predstavuje pomer počtu chybných prenesených dát k všetkým dátam. Existujú dva možné spôsoby výpočtu a merania *BER*. Prvý spôsob spočíva v odchytení dát z vysielateľa T_x (pred modulátorom), odchytení dát v prijímači R_x (po demodulátore), porovnaním chybných prijatých dát a následnom výpočte *BER*. Pri výpočte *BER* prvým spôsobom používame v Simulinku blok Error rate Calculation, ktorý je zobrazený na obr. 5.1.



Obr. 5.1. Blok pre výpočet BER

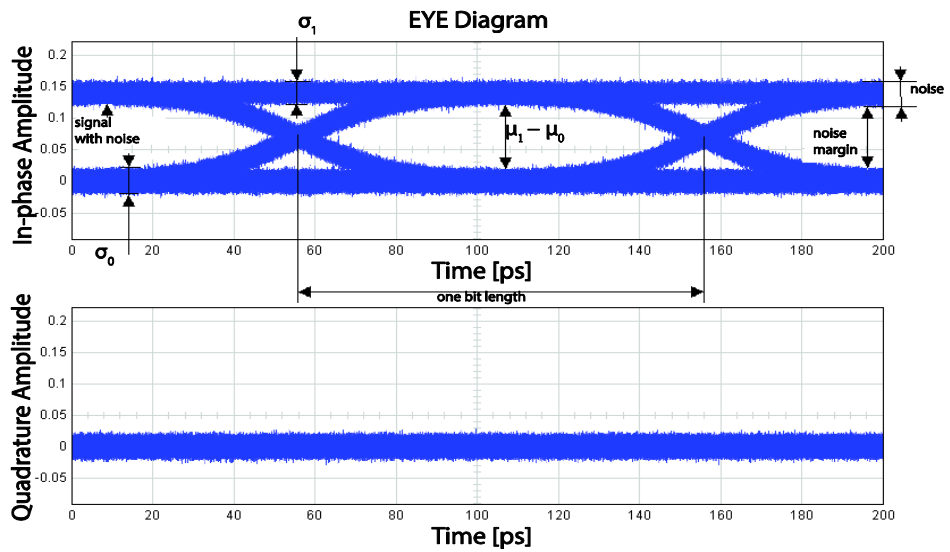
Druhým možným spôsobom je odhad *BER* vypočítaním faktora kvality Q . Tento faktor kvality Q zahrňuje šum vo všetkých úrovniach prenášaného signálu a spája ich do jedného parametra odstupu signál-šum OSNR (Signal to Noise Ratio). Výpočet faktora kvality Q je daný rovnicou (5.1) a závisí od priemeru daných úrovní μ a od ich odchýlky σ .

(5.1)

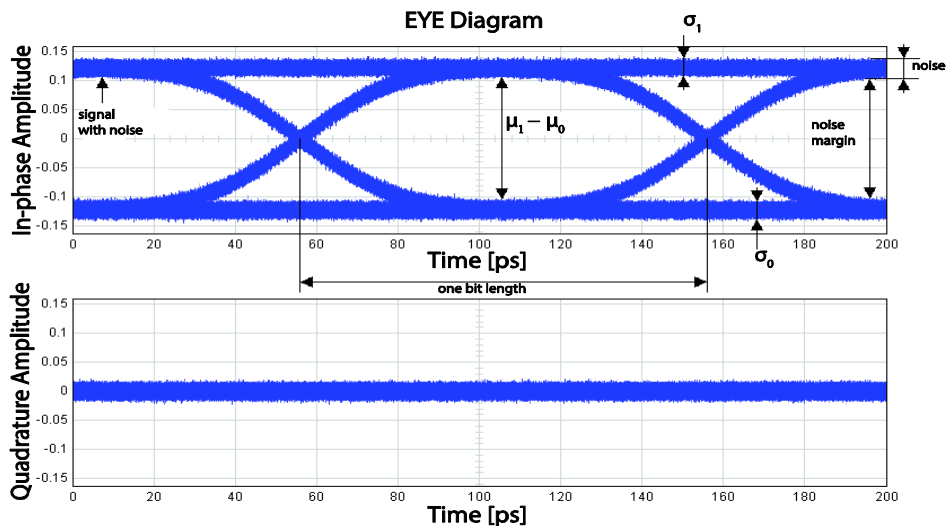
$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

kde $\mu_1 - \mu_0$ predstavuje rozdiel úrovní a σ_1 a σ_2 predstavujú odchýlky od úrovní.

Tieto hodnoty možno zmerať z diagramu oka (EYE diagram). Diagram oka predstavuje osciloskop, ktorý zobrazuje jednu periódu symbolu niekoľkých bitov, a teda zobrazuje všetky prechody vysielaného signálu. Výpočet BER pomocou faktora kvality Q je nepresnejší pre nepresné odčítanie a odhad potrebných hodnôt μ a σ , ale časovo menej náročný, čo v prípade simulácií predstavuje dôležitý faktor. Diagram oka pre OOK kľúčovanie je zobrazený na obr. 5.2a) a diagram oka pre BPSK kľúčovanie je zobrazený na obr. 5.2b) (na ilustráciu bolo použité 240 km SM vlákno Samsung UltraPass™ pri použití zosilňovača EDFA každých 80 km so šumovým číslom $NF = 4$ dB).



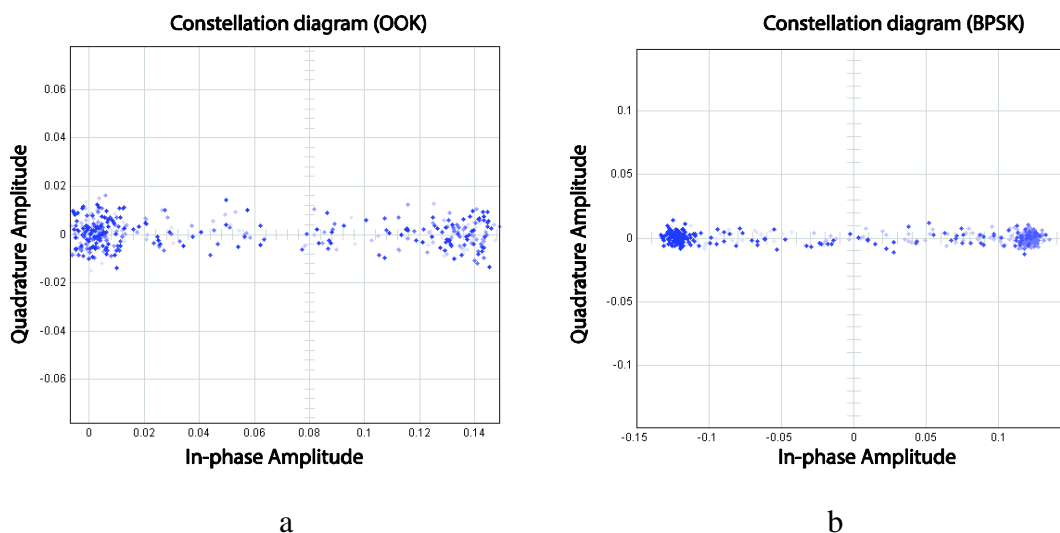
a



b

Obr. 5.2. Diagram oka pre signál modulovaný: a – OOK, b – BPSK kľúčovaním

Ďalším možným hodnotením signálu je použitie konštelačného diagramu, ktorý zobrazuje reálne hodnoty signálu v závislosti od imaginárnych hodnôt signálu v čase. Na základe tohto diagramu možno určiť hranice detekcie signálu. Tento spôsob však nedokáže určiť počet chybné prenesených dát a má skôr zobrazovací charakter. Konštelačné diagramy pre OOK a BPSK kľúčovanie sú zobrazené na obr. 5.3.



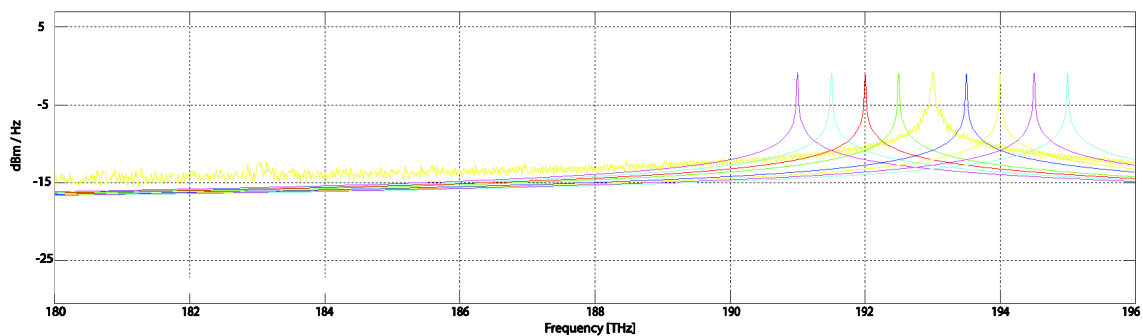
Obr. 5.3. Konštelačný diagram pre signál modulovaný: a – OOK, b – BPSK kľúčovaním

Pri určovaní vplyvu niektorých nelineárnych vplyvov, napríklad FWM alebo XPM, pri používaní technológií WDM je potrebné poznať spektrum prenášaných signálov, ktoré vizuálne zobrazuje vplyv ostatných signálov na daný signál. Spektrum nám hovorí o veľkosti prenášaného výkonu na príslušnej frekvencii signálu (respektíve vlnovej dĺžke). Pri prenose signálov na dlhé vzdialenosti sa využívajú pásma C a L obsahujúce vlnové dĺžky od 1530 nm do 1600 nm, predstavujúci frekvencie od 196 THz do 186 THz. Matematický vzťah medzi vlnovou dĺžkou a frekvenciou je daný rovnicou:

(5.2)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

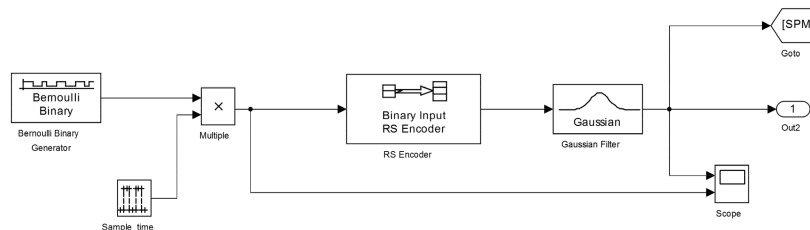
Spektrum signálu 8-kanálového systému WDM bez nelineárnych vplyvov je zobrazené na obr. 5.4.



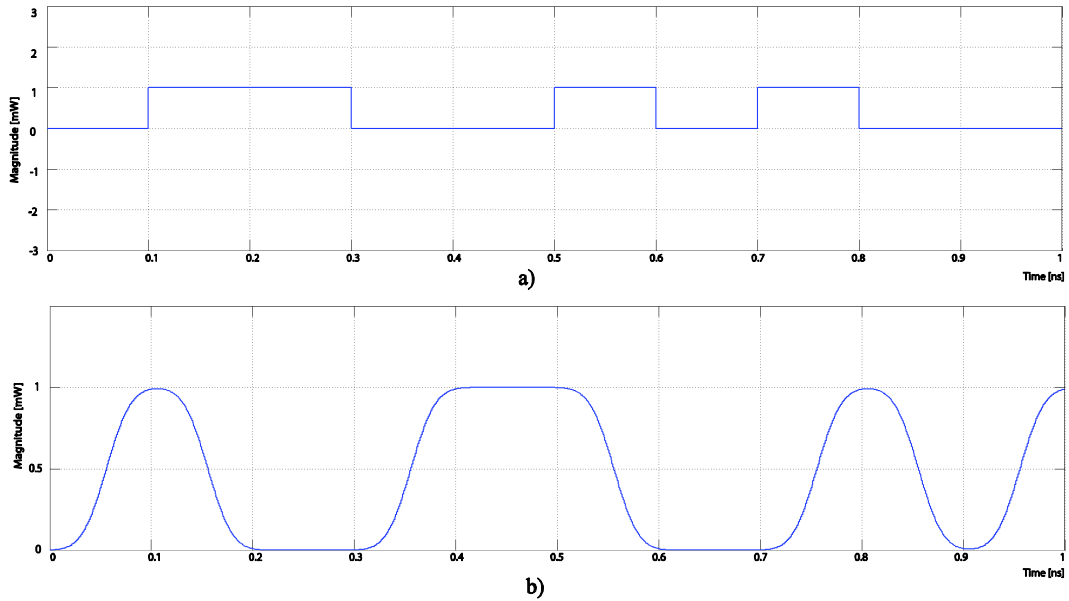
Obr. 5.4. Frekvenčné spektrum signálu pre 8-kanálový systém WDM

5.2 Simulácia rozličných techník pokročilého spracovania signálu a viackanálových WDM systémov

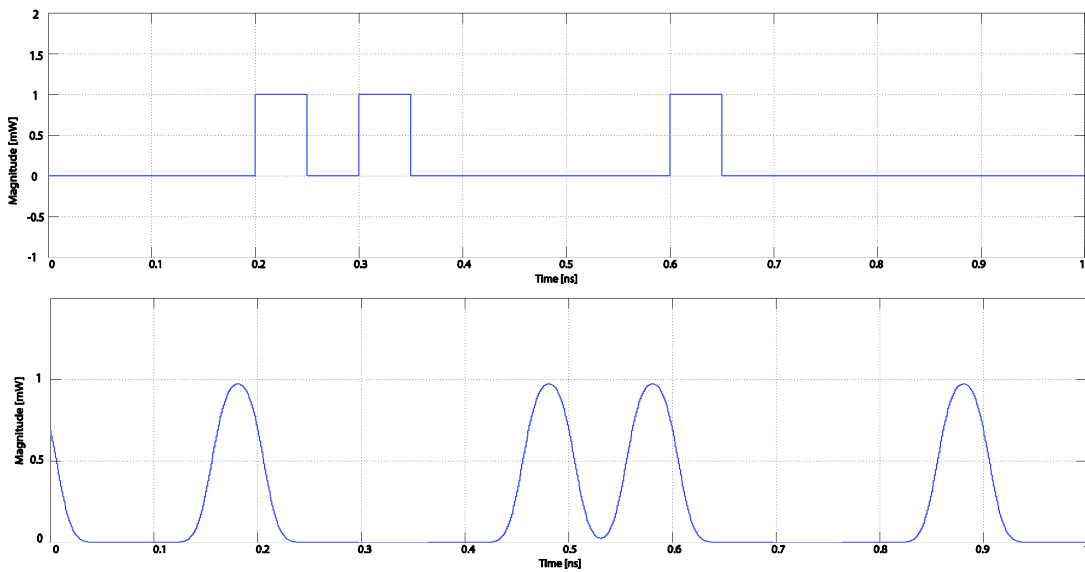
Prvým krokom k prenosu dát cez optické prenosové médium je generovanie náhodných bitových postupností. Bernoulliho generátor je použitý ako zdroj signálu, ktorý generuje logickú „1” a logickú „0”. Ako náhradný zdroj môže byť použitý generátor náhodných celých čísel. Na zaistenie funkčnosti generátora musia byť vložené vstupné parametre, ako pravdepodobnosť nuly a prenosová rýchlosť. Schéma generátora je zobrazená na obr. 5.5. Kompletná schéma generátora zahŕňa Bernoulliho generátor, ktorý generuje ideálny pravouhlý signál obsahujúci len reálnu zložku, diskretný generátor na určenie typu modulačného formátu signálu pre 1 bit, blok RS encoder, ktorý zakóduje postupnosť bitov zvoleným RS kódom. Tento blok je nahraditeľný inými blokovými kódmi, ktoré sú pred vytvorené v Matlab Simulink 2014. Výstupné NRZ signály z Bernoulliho generátora a z Gaussovho filtra sú zobrazené na obr. 5.6 a výstupné RZ signály z Bernoulliho generátora a z Gaussovho filtra sú zobrazené na obr. 5.7.



Obr. 5.5. Schéma generátora náhodných bitov



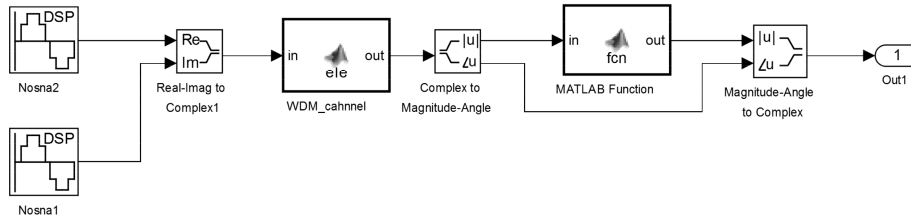
Obr. 5.6. Výstupný NRZ signál z: a – Bernoulliho generátora, b – Gaussovho filtra



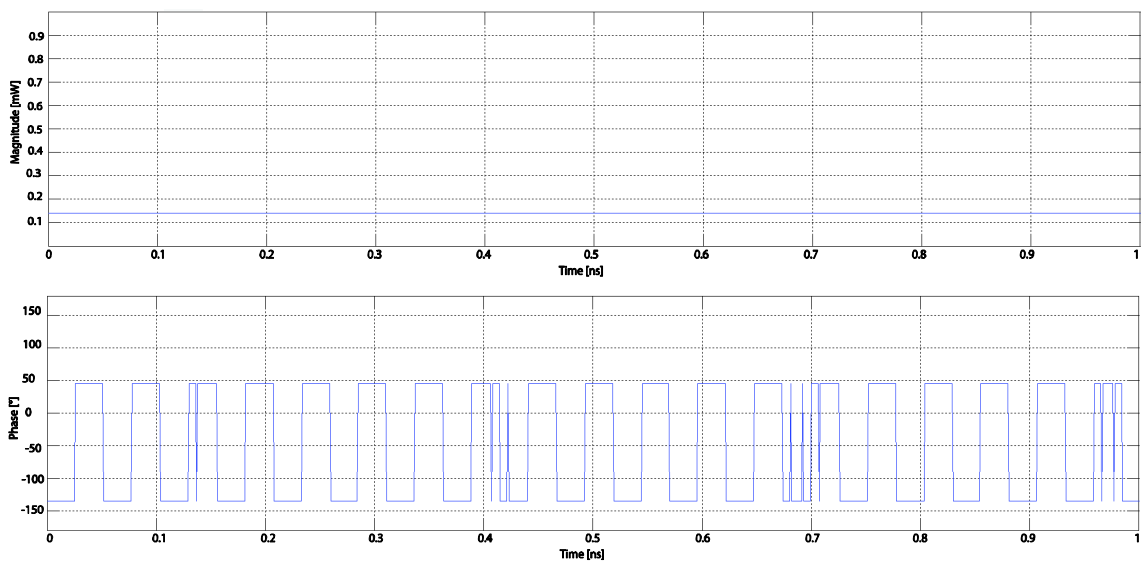
Obr. 5.7. Výstupný RZ signál z: a – Bernoulliho generátora b – Gaussovho filtra

Existuje niekoľko možností pre konverziu elektrického signálu na optický modulovaný signál. V minulosti sa využívala priama modulácia optického signálu, kde laserová dióda bola priamo riadená elektrickým signálom. Takto generovaný signál obsahoval amplitúdový a fázový šum, čo znemožňovalo použitie fázového kľúčovania. Optické systémy s priamou moduláciou boli nízko nákladné vďaka priamej detekcii signálu, avšak limit takýchto optických prenosových systémov je do 10 Gbit/s z dôvodu CD. Ďalšou možnosťou modulovania signálu je ovplyvňovanie spojitej vlny CW z optického zdroja

elektrickým signálom pomocou optického modulátora. Po analýze dostupných modulátorov sme sa v skúmaní zamerali na modulovanie signálov pomocou MZM modulátora. Spojitú postupujúcu vlnu simulujem ako lineárne polarizovanú vlnu pozostávajúcu z dvoch polarizovaných módov elektrického a magnetického poľa, ktoré sú komplexné a navzájom ortogonálne. Schéma pre vytvorenie komplexnej spojitej vlny je zobrazená na obr. 5.8 a výstupný priebeh je zobrazený na obr. 5.9.



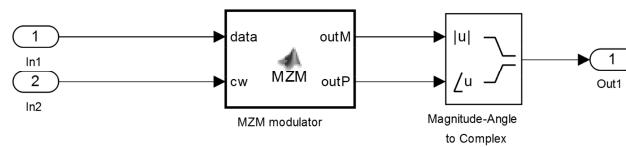
Obr. 5.8. Schéma generovania postupujúcej spojitej vlny



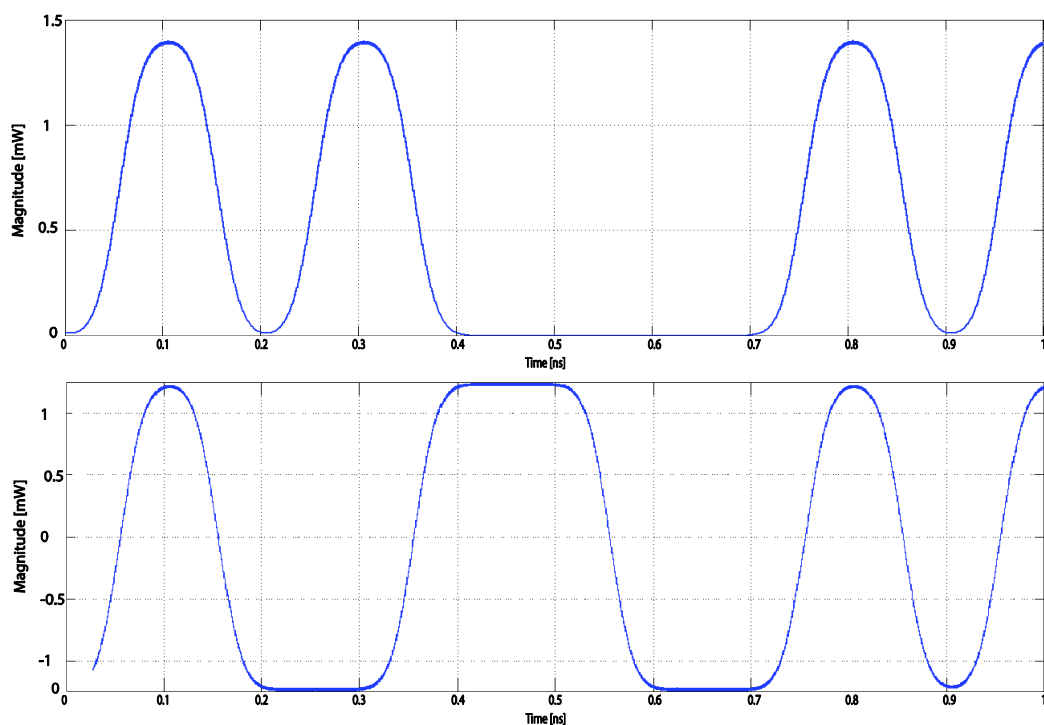
Obr. 5.9. Priebeh postupujúcej spojitej vlny

Po vygenerovaní vstupujú informácie dáta spolu s postupujúcou vlnou CW do MZM, kde ovplyvňujú spojité vlnenie v závislosti od zvolenej modulačnej techniky. Simulácia využíva fyzikálny princíp MZM, ktorý je založený na interakcii dvoch polarizovaných vln (interferencii a deštrukcii vln). V prípade signálu OOK sa na vstup MZM privedú dve rovnako polarizované vlny. V tomto prípade pri nenulovej vstupnej hodnote elektrického dátového signálu dochádza k interferencii optických vln, ktorá vytvára novú vlnu šíriacu sa v smere z . Pri absencii elektrického dátového signálu dochádza k deštruktívnemu stavu

optických vln, čo má za následok nulový signál. V prípade signálu BPSK sa na vstup MZM privedú dve polarizované vlny, kde jedna je posunutá o π radiánov. V prvom prípade, keď na vstupe MZM je elektrický dátový signál, optické vlny navzájom interferujú a vytvárajú polarizovanú optickú vlnu šíriacu sa v smere z . Pri absencii elektrického signálu dochádza k deštruktívnemu stavu, kde jednotlivé optické vlny interferujú a vytvárajú rovnakú vlnu s opačnou polarizáciou. Schéma modulátora MZM je zobrazená na obr. 5.10 a signály OOK a BPSK sú zobrazené na obr. 5.11.



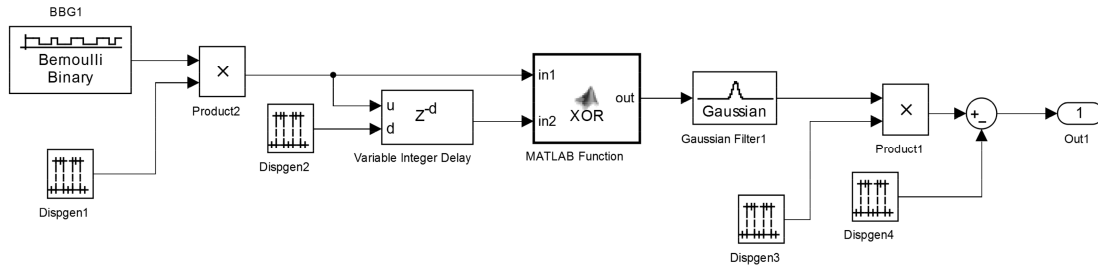
Obr. 5.10. Schéma MZM modulátora



Obr. 5.11. Priebeh signálu modulovaného: a – OOK b – BPSK kľúčovaním

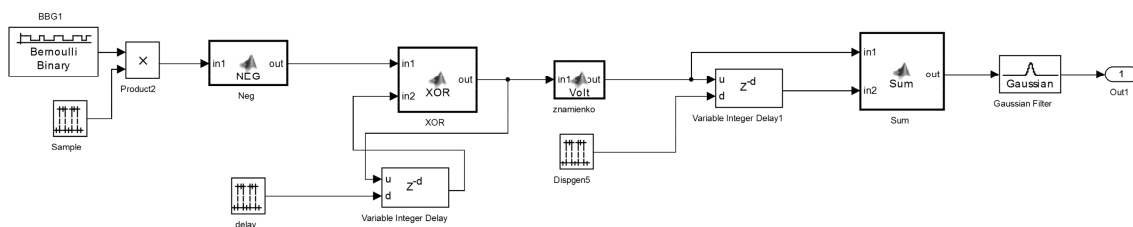
V optických prenosových systémoch sa často využíva menej náročné diferenciálne BPSK kľúčovanie, ktoré umožňuje jednoduchú detekciu signálu. Pri BPSK kľúčovaní je dátový signál daný hodnotou fázy daného bitu a pri DBPSK je dátový signál určený rozdielom fázy bitu s fázou predchádzajúceho bitu. Schéma generovania dátového elektrického

signálu pre DBPSK je doplnená o blok časového oneskorenia a blok vykonávajúci XOR operáciu. Na výslednom bite spolu s predchádzajúcim bitom je vykonaná operácia XOR, čo zabezpečí zakódovanie informácie do rozdielu fázy. Následne je takýto dátový signál privedený do modulátora MZM, kde dochádza k elektro-optickej konverzii ako pri BPSK. Schéma pre generátor DBPSK dátového toku je zobrazená na obr. 5.12.

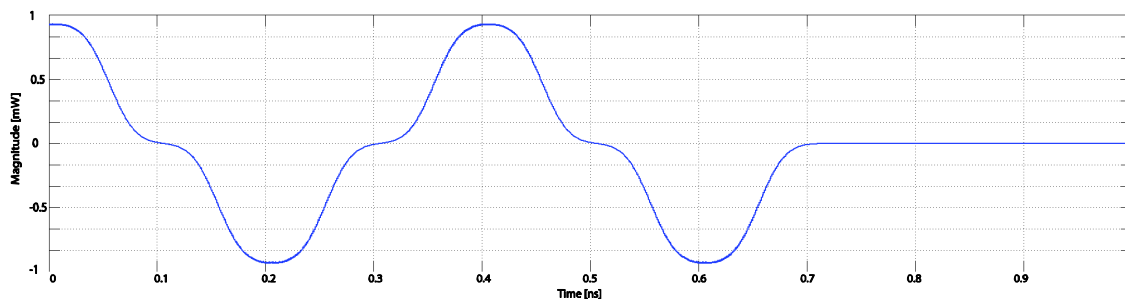


Obr. 5.12. Schéma generátora dátového signálu pre kľúčovanie DBPSK

Binárne kľúčovanie dosahuje svoje limity pri dátových rýchlostiach do 10 Gbit/s na jeden kanál. Tento limit vedie k upriameniu pozornosti na iné modulačné techniky ako modulácia Duobinary, ktorá predstavuje spojenie medzi amplitúdovou a fázovou moduláciou. Jednou z výhod modulácie je vyslanie polovičnej šírky pásma na jeden bit a odstránenie vplyvu ISI. Princíp generovania modulácie Duobinary je zobrazený na obr. 5.13. Výstup z Bernoulliho generátora je invertovaný a následne je vykonaná operácia XOR s predchádzajúcim bitom. Po operácií XOR je postupnosť prekódovaná do troch úrovní 1, 0 a -1 (kde -1 predstavuje posun fázy o π oproti 1). Posledný blok sčítava susedné bity a vytvára postupnosť, ktorá je následne modulovaná v MZM modulátore. Výsledný priebeh modulácie Duobinary je zobrazený na obr. 5.14 a pozostáva zo stavov 1 a 0, pričom stav 1 mení fázu o π a je znázornený ako stav -1.

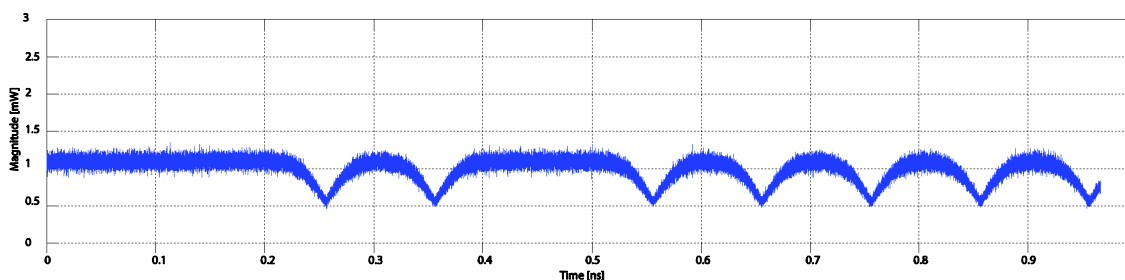


Obr. 5.13. Schéma generátora dátového signálu pre moduláciu Duobinary

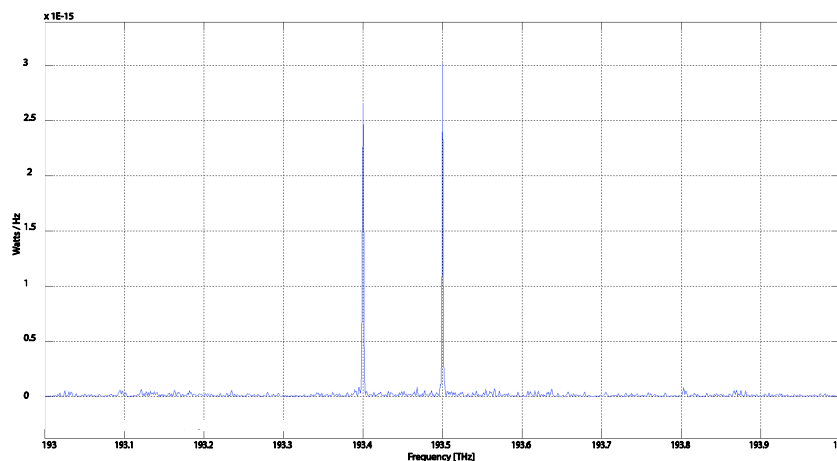


Obr. 5.14. Priebek modulácie Duobinary

Binárne frekvenčné kľúčovanie BFSK je ďalšou možnosťou pre prenos informácie. Na vytvorenie signálu s kľúčovaním BFSK je potrebné priviesť dva dátové signály do modulátorov MZM, do ktorých vstupujú dve spojité optické vlny CW z dvoch nezávislých optických laserov. Vytvorenie kľúčovania BFSK je podobné ako pri kľúčovaní OOK, no v prípade absencie signálu sa vysiela signál s inou frekvenciou. Výsledný modulovaný signál BFSK je znázornený na obr. 5.15 a frekvenčné spektrum takto vytvoreného signálu je znázornené na obr. 5.16.

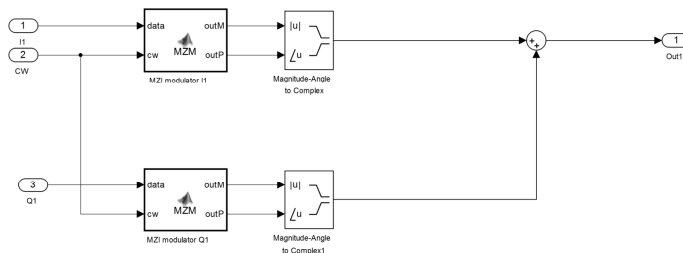


Obr. 5.15. Priebek signálu modulovaného BFSK kľúčovaním

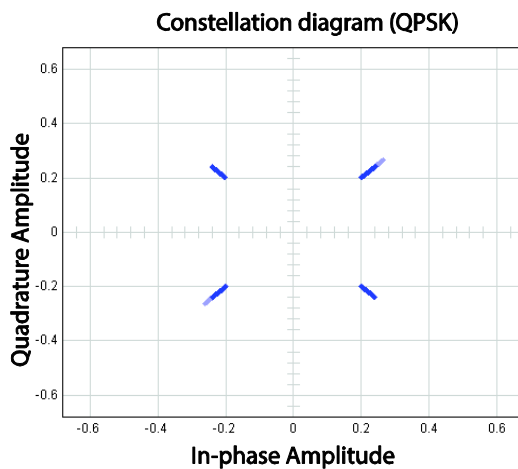


Obr. 5.16. Frekvenčné spektrum signálu modulovaného BFSK kľúčovaním

Viacstavové kľúčovanie, ako napríklad QPSK, 8PSK a 16QAM vysielajú niekoľko bitov na symbol, a teda predstavujú možné zvýšenie prenosovej rýchlosti a dosahu optických prenosových systémov. Viacstavové kľúčovanie možno vytvoriť použitím niekoľkých MZM modulátorov. Kľúčovanie QPSK možno vytvoriť súčtom výstupov z dvoch MZM modulátorov, kde jeden modulátor musí generovať výstupný optický signál s fázovým posunom o π . Schéma generovania QPSK kľúčovania je zobrazená na obr 5.17 a priebeh konštelačného QPSK signálu je zobrazený na obr. 5.18.

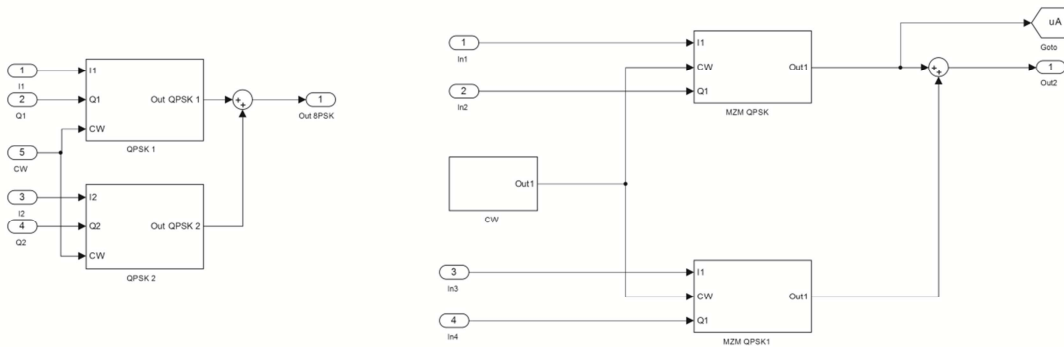


Obr. 5.17. Schéma pre generovanie QPSK kľúčovania

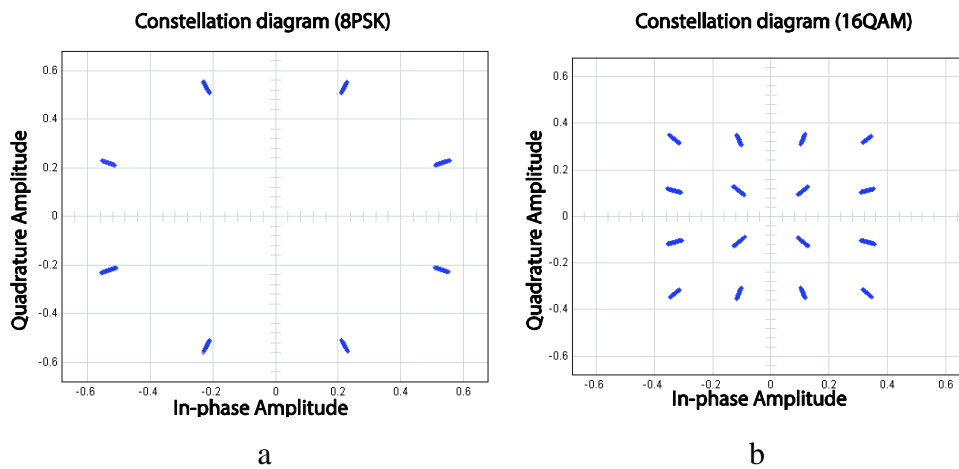


Obr. 5.18. Konštelačný diagram pre QPSK kľúčovanie

Kľúčovanie 8PSK a 16QAM sú generované pomocou štyroch MZM modulátorov. Kľúčovanie 8PSK využíva riadenie MZM pomocou troch elektrických dátových postupností a kľúčovanie 16QAM využíva riadenie MZM pomocou štyroch elektrických dátových postupností, kde každú postupnosť možno zakódovať pomocou 10 Gbit/s toku. Schémy generovania 8PSK a 16QAM kľúčovania sú zobrazené na obr. 5.19. Jednotlivé možné stavy pre 8PSK a 16QAM kľúčovanie sú zobrazené v konštelačnom diagrame na obr. 5.20.

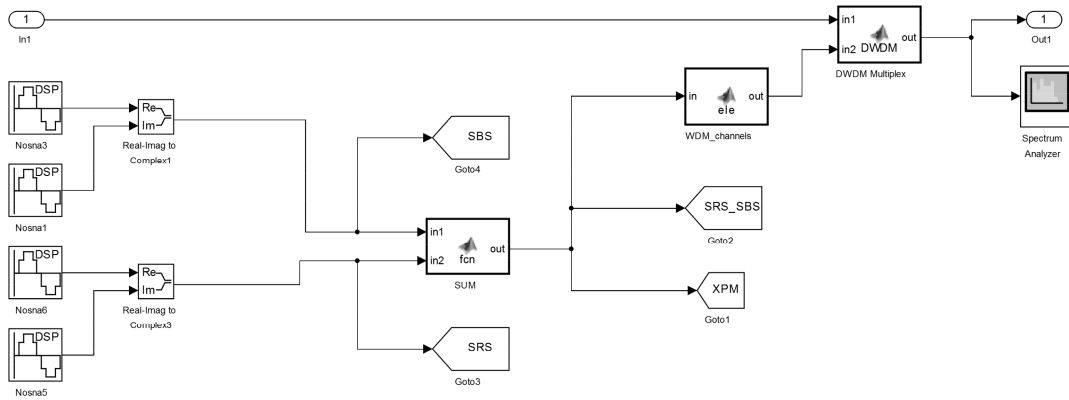


Obr. 5.19. Schéma pre generovanie kľúčovania: a – 8PSK, b – 16QAM



Obr. 5.20. Konštelačný diagram pre: a – 8PSK, b – 16QAM kľúčovanie

Optické prenosové systémy na dlhé vzdialenosti LH (rádovo 100 – 1000 km) používajú techniku WDM multiplexovania pre zvýšenie kapacity systému a efektívnosti prenášania dát. Pre simuláciu DWDM systému je nutné generovať ďalšie optické signály. Návrh simulácie umožňuje zvoliť počet prenášaných signálov v jednom optickom vlákne a zároveň umožňuje zvoliť vzdialenosti medzi jednotlivými kanálmi. Generované signály sú privedené do bloku DWDM Multiplex, kde sú napojené do optického vlákna a prenášajú sa spolu s analyzovaným signálom. Úplná schéma optického prenosového systému spolu s generátorom signálov je znázornená na obrázku 5.21. Výstupom z DWDM multiplexora je viackanálový komplexný signál, ktorý je prenášaný cez optické vlákno.



Obr. 5.21. Generátor optických signálov a DWDM multiplex

Výstupný signál po prenose cez optické vlákno je značne skreslený lineárnymi a nelineárnymi vplyvmi a dochádza tu k značnému poklesu optického výkonu vplyvom tlmenia v závislosti od dĺžky vlákna. Pre prenos cez optické vlákno dlhšie ako 50 km je potrebné použiť optické zosilňovače, ktoré zosilnia užitočný optický signál do potrebnej miery, aby bol optický signál detekovateľný v prijímači. Po analýze optických zosilňovačov a zvolených kritérií obsahuje simulačný model dva typy zosilňovačov – EDFA a Ramanov zosilňovač.

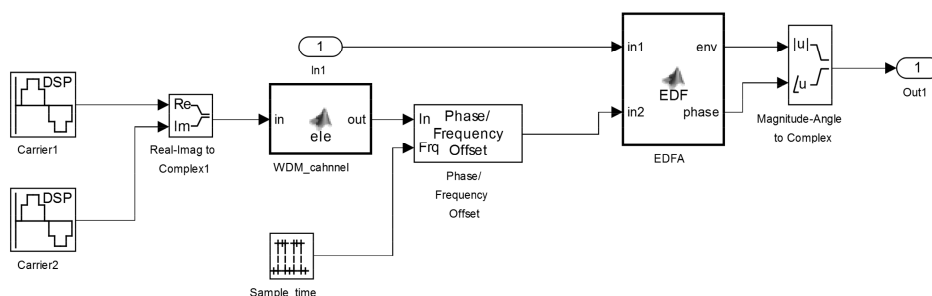
Zosilňovače EDFA predstavujú jedny z najviac používaných optických zosilňovačov, ktoré sú charakterizované vysokým zosilnením a nízkym šumom a zabezpečujú širokospektrálne zosilnenie v C-okne (~1530 nm). Princíp zosilňovačov EDFA spočíva vo vložení optickej vlny s vysokým výkonom označovanej ako pumpová vlna, najčastejšie pracujúcej na vlnovej dĺžke 980 nm alebo 1450 nm. Na konci optického vlákna sa vkladá erbiom dopované vlákno, ktorého ióny sú vybudené prichádzajúcou pumpovou vlnou do vyššieho energetického stavu, kde dochádza k zosilneniu optického signálu okolo vlnovej dĺžky 1530 nm pomocou stimulovanej emisie, kde sa ióny vracajú do základného stavu. Rovnica popisujúca fyzikálny princíp zosilnenia je daná:

(5.3)

$$P_p = \alpha_p L_{er} P_{sat}(\lambda_p) \frac{1 + \eta_p}{1 + \eta_s} \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{\eta_p - \eta_s}{1 + \eta_s} \alpha_p L_{er}\right)}$$

kde α_p predstavuje koeficient tlmenia pre pumpovú vlnu, L_{er} je dĺžka erbiom dopovaného vlákna, $P_{sat}(\lambda_p)$ predstavuje saturovaný výkon pumpovej vlny, η_p a η_s sú pomerové prierezy danej optickej vlny.

Simulácia zosilňovača EDFA pozostáva z generovania pumpovej vlny s vlnovou dĺžkou 1450 nm, bloku frekvenčného posunu na potrebnú vlnovú dĺžku a blokom EDFA, ktorý je opísaný rovnicou (30). Výsledná schéma pre EDFA zosilňovač je zobrazená na obr. 5.22.



Obr. 5.22. Blokovaná schéma EDFA zosilňovača

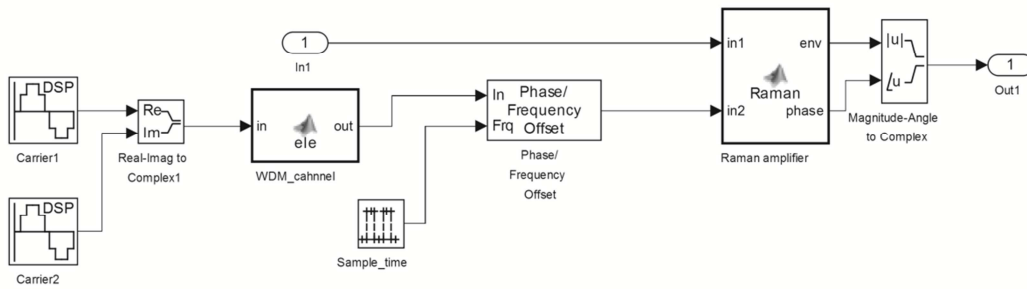
Ramanov zosilňovač sa používa pri zosilnení na veľké vzdialenosti so širokým spektrálnym zosilnením. Ramanove zosilňovače sa často používajú v kombinácii s EDFA zosilňovačmi pre dosiahnutie efektívneho zosilnenia pri generovaní nízkeho šumu. Ramanove zosilňovače fungujú na princípe stimulovaného Ramanovho rozptylu, kde časť výkonu pumpovej optickej vlny prenesie na užitočný signál. Princíp Ramanovho rozptylu je detailne opísaný v časti 2.1.2.

Simulácia Ramanovho zosilňovača pozostáva z generovania pumpovej vlny, bloku frekvenčného posunu na potrebnú vlnovú dĺžku a blokom Raman amplifier, ktorý je opísaný rovnicou (5.4). Výsledná schéma pre Ramanov zosilňovač je zobrazená na obr. 5.23.

(5.4)

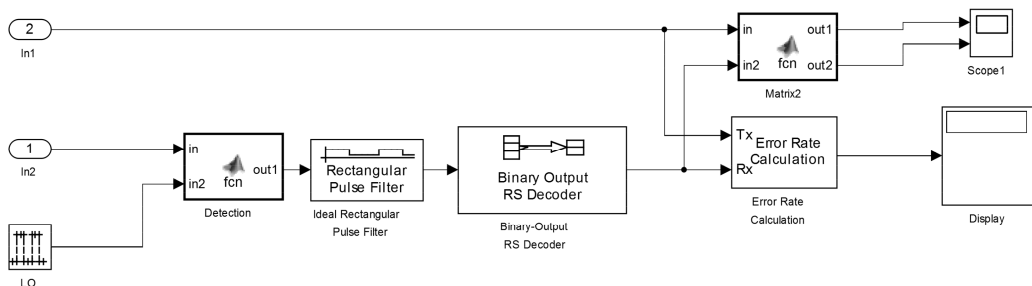
$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_r}{A_{eff}} P_p P_s - \alpha_s P_s$$

kde P_s predstavuje výkon užitočného optického signálu, P_p predstavuje výkon pumpovej optickej vlny, g_r je Ramanov koeficient zosilnenia, A_{eff} predstavuje efektívnu oblasť vlákna a α_s predstavuje koeficient tlmenia užitočného optického signálu.



Obr. 5.23. Bloková schéma Ramanovho zosilňovača

Zosilnený optický signál je následne demodulovaný a prekonvertovaný na elektrický signál, kde je následne porovnávaný s vyslaným signálom pre výpočet parametra BER. Blokovaná schéma koherentného prijímača je zobrazená na obr. 5.24. Schéma pozostáva z bloku Detection, kde spolu s lokálnym oscilátorom LO umožňuje detekovať amplitúdu a fázu prijatého signálu. Blok Detection obsahuje vlnovodíkový filter pre výber analyzovaného optického kanálu. Následne je detekovaný signál upravený na pravouhlý signál. Dekóder pre daný kód umožňuje opraviť a detekovať chyby vzniknuté v kanáli. Výsledný demodulovaný a dekódovaný signál je následne porovnávaný s vyslaným signálom. Výsledkom je získanie parametra BER pre daný optický prenosový systém.

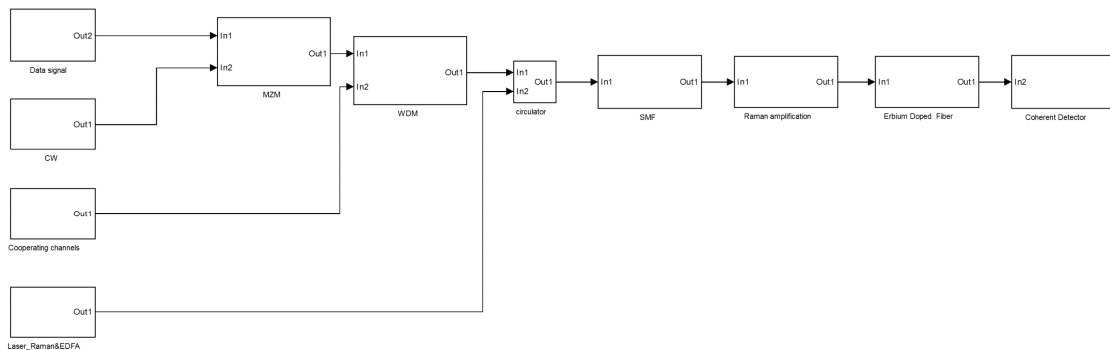


Obr. 5.24. Blokovaná schéma koherentného prijímača

5.3 Simulácia negatívnych vplyvov v prostredí jednomódového optického vlákna

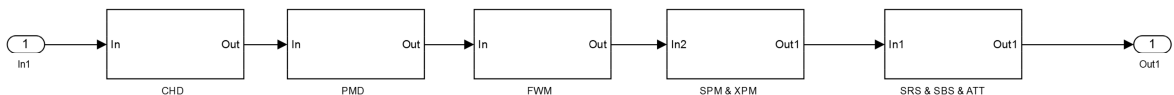
Simulácia prenosu signálov v prostredí jednomódového vlákna pozostáva z niekoľkých vplyvov, ktoré boli podrobne analyzované v časti 2.1. Jednotlivé lineárne a nelineárne vplyvy sú vytvorené za použitia vytvorených blokov zo Simulinku, DSP a Communication

toolboxov v kombinácii s programovateľnými blokmi Matlab Function blocks. Kompletná schéma optického prenosového systému WDM je zobrazená na obr. 5.25.



Obr. 5.25. Bloková schéma optického prenosového systému WDM

Blok SMF predstavuje negatívne vplyvy prostredia jednomódového optického vlákna. Na obr. 5.26 je zobrazená bloková schéma lineárnych a nelineárnych vplyvov prostredia optického vlákna. Optický dátový signál je postupne ovplyvňovaný jednotlivými blokmi, kde dochádza k zmene amplitúdy a fázy.



Obr. 5.26. Bloková schéma negatívnych vplyvov prostredia SMF vlákna

5.3.1 Simulácia vplyvu chromatickej disperzie CD

Na simulovanie chromatickej disperzie sme použili základné bloky z Matlab Simulink a programovateľné bloky. Modulovaný signál vstupujúci do vytvoreného bloku chromatickej disperzie je najprv rozdelený na amplitúdovú a fázovú zložku. Amplitúdová zložka signálu je oneskorená o príslušné rozšírenie a následne spojená s originálnym signálom. Rovnica popisujúca celkové rozšírenie je daná:

(5.6)

$$D_{CD} = \frac{\Delta\tau_{CD}}{L} \left[\frac{ps}{nm.km} \right]$$

kde D_{CD} predstavuje koeficient CD udávaný výrobcom optického vlákna, L je celková dĺžka vlákna a $\Delta\tau_{CD}$ je celkové rozšírenie optického signálu vplyvom CD.

Takýto signál je tlmený pre zachovanie energie na príslušnú úroveň. Tento signál je spojený s pôvodnou fázou a tento komplexný signál je privedený do bloku, ktorý mení fázu komplexného signálu, ktorá je daná rovnicami [JAM05, RAS12]:

(5.7)

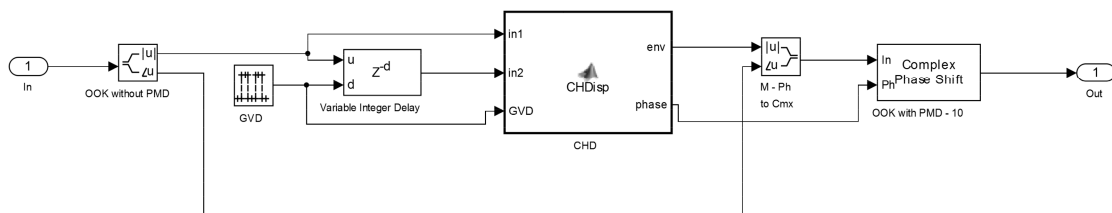
$$t = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{df_m}$$

(5.8)

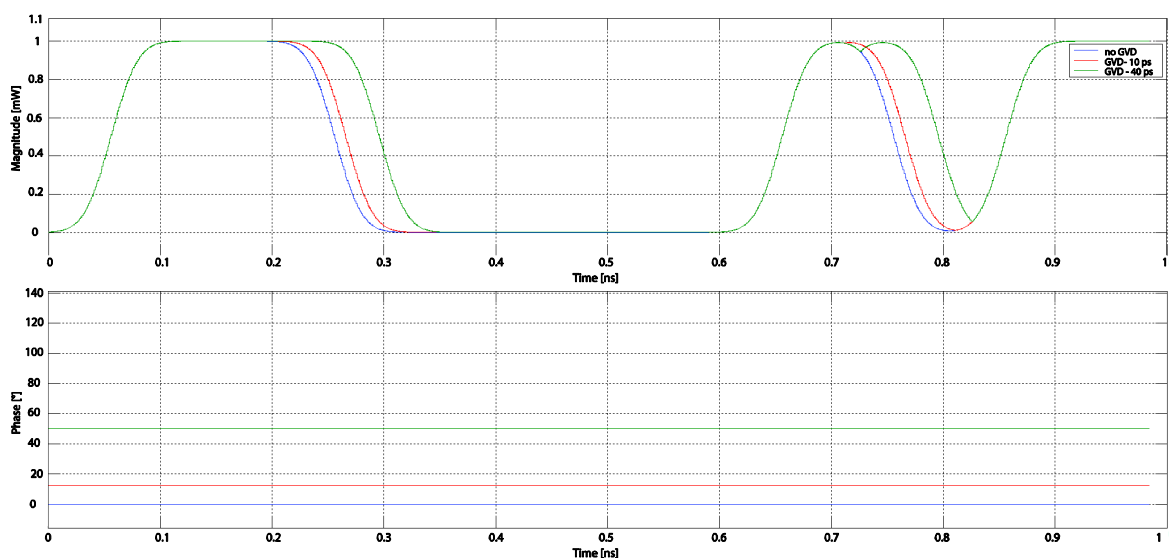
$$GVD = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\Phi}{df_m^2}$$

kde t predstavuje čas, ktorý je potrebný na prechod optického impulzu cez daný optický prenosový systém, fázový posun signálu $\Delta\Phi$ a koeficient skupinovej rýchlosti disperzie GVD (Group Velocity Dispersion).

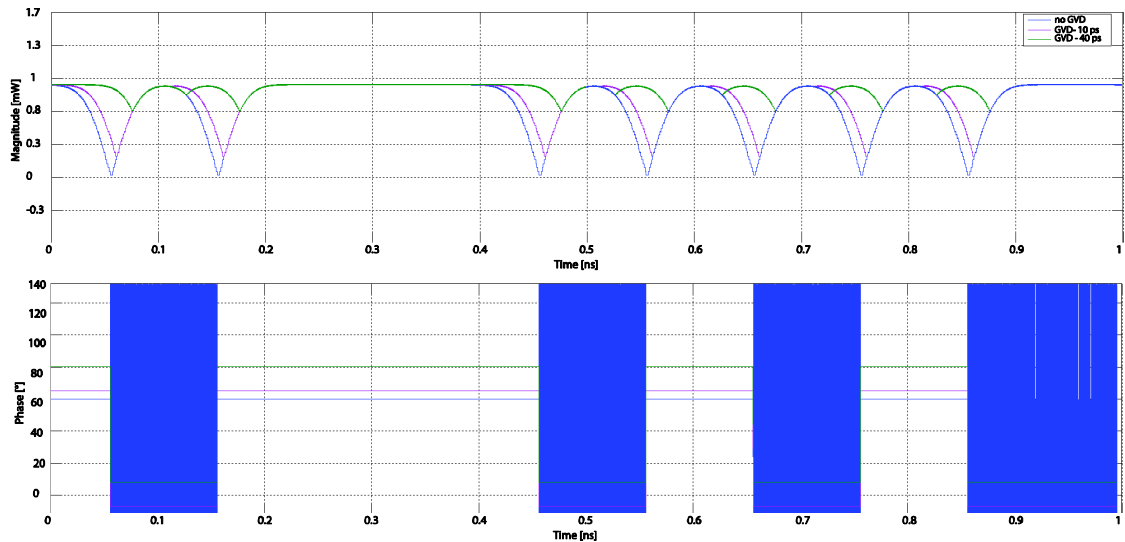
Bloková schéma chromatickej disperzie je znázornená na obr. 5.27 a príslušné priebehy signálov pre OOK a BPSK sú zobrazené na obr. 5.28 a obr. 5.29.



Obr. 5.27. Bloková schéma na generovanie vplyvu CD



Obr. 5.28. Vplyv CD na signál modulovaný kľúčovaním OOK



Obr. 5.29. Vplyv CD na signál modulovaný kľúčovaním BPSK

5.3.2 Simulácia vplyvu polarizačne módovej disperzie PMD

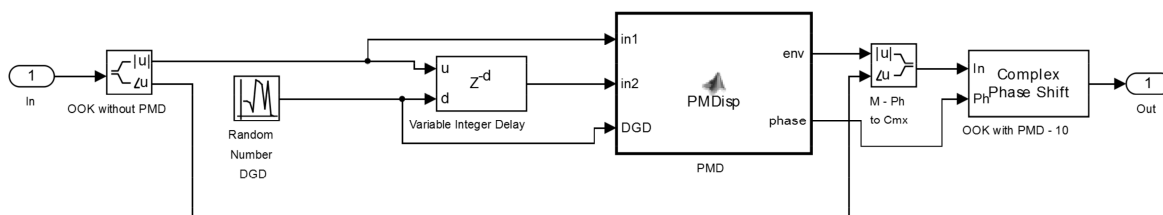
Blok PMD rozširuje pôvodný signál v časovej oblasti a v dôsledku čoho nastáva fázový posun signálu. Blokovaná schéma pre simulovanie vplyvu PMD je zobrazená na obr. 5.30. Blokovaná schéma PMD obsahuje diskretný dynamický generátor s normálovým rozdelením pre generovanie dynamického parametra diferenciálneho skupinového oneskorenia DGD (Differential Group Delay) charakterizujúceho PMD. Tento signál s hodnotou DGD vstupuje do premenlivého bloku oneskorenia spolu s modulovaným signálom, kde je modulovaný signál oneskorený o hodnotu DGD . Takýto modulovaný oneskorený signál je spolu s modulovaným signálom bez oneskorenia privedený do bloku disp_plane, ktorý tieto dva signály prekryje. Výstupný modulovaný signál vstúpi do bloku disp_loss, v ktorom je tlmený príslušnou hodnotou tak, aby vyhovoval zákonu zachovania energie a výsledne rozšírenie signálu je dané rovnicou:

(5.9)

$$D_{PMD} = \frac{\Delta \tau_{PMD}}{L} \left[\frac{ps}{\sqrt{km}} \right]$$

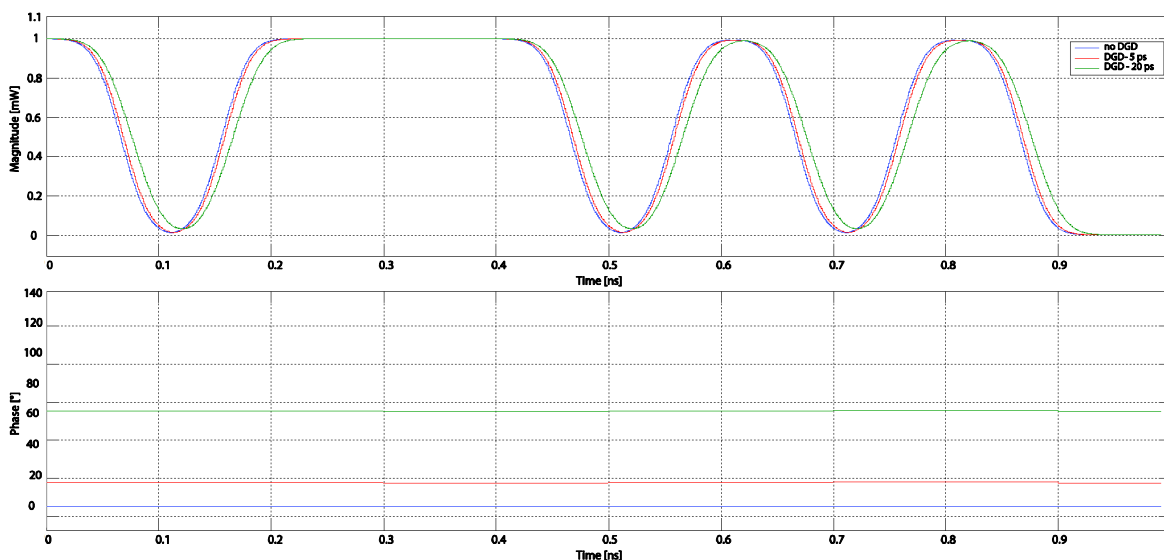
kde D_{PMD} predstavuje koeficient PMD udávaný výrobcom optického vlákna, L je celková dĺžka vlákna a $\Delta \tau_{PMD}$ je celkové rozšírenie optického signálu vplyvom PMD.

Výstupný rozšírený signál je následne privedený do bloku fázového posunu, kde sa mení fáza signálu. Fázový posun je daný rovnicou (5.8). Jednotlivé hodnoty príslušných blokov sú vypočítané na začiatku simulácie.

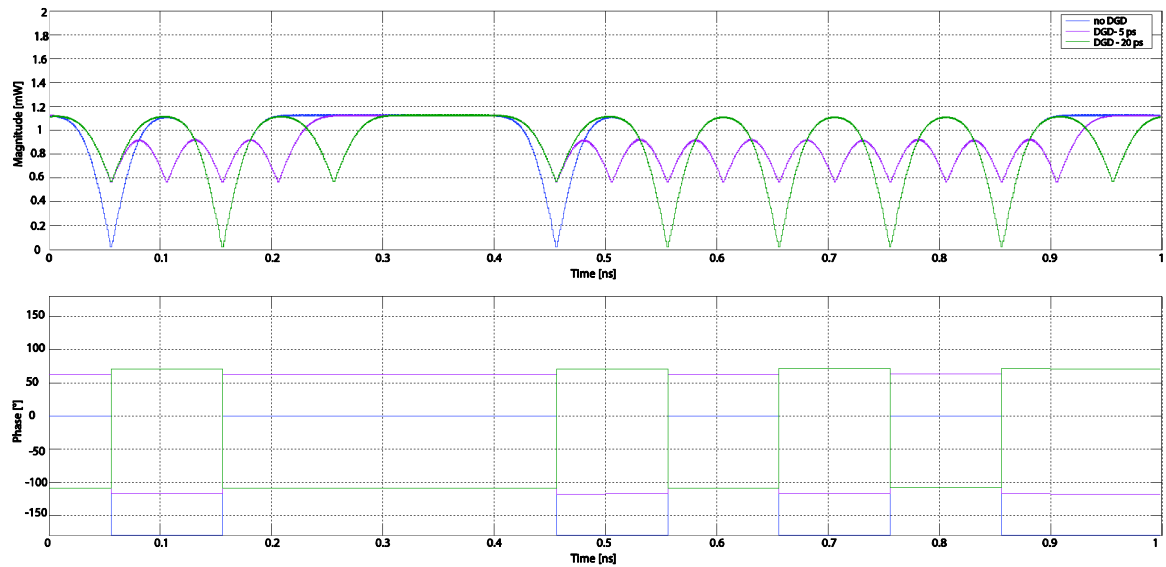


Obr. 5.30. Bloková schéma na generovanie vplyvu PMD

Pred detekciou optického signálu možno kompenzovať vplyv CD použitím vlákna kompenzujúceho disperziu DCF (Dispersion Compensating Fiber). Vlákno DCF má záporný koeficient CD rovný 100 ± 10 ps/(nm.km). Vhodne zaradené DCF vlákno umožňuje potlačiť CD na 10 ps pri prenose cez vlákno s dĺžkou 100 km. Táto hodnota predstavuje hranicu, kedy systém dosahuje chybovosť, pri ktorej možno vysielat'. Väčšina chýb v tomto prípade je spôsobená vplyvom PMD, ktorá v určitých časových intervaloch rozširuje signál nad povolený limit, ako to znázorňuje na obr. 5.31 a obr. 5.32.



Obr. 5.31. Vplyv PMD na signál modulovaný kľúčovaním OOK



Obr. 5.32. Vplyv PMD na signál modulovaný kľúčovaním BPSK

5.3.3 Simulácia vplyvu štvorvlnového zmiešavania FWM

Vplyv FWM sa vyskytuje len v prenosových systémoch WDM, a preto musíme generovať ďalšie optické signály s rovnakou modulačnou technikou na odlišnej vlnovej dĺžke. Pri FWM uvažujeme, že najbližších šesť kanálov ovplyvňuje prenášaný dátový signál [AJM15]. Tieto modulované signály sú zmiešané (v bloku FWM) pomocou bloku SUM a dávajú vznik novej vygenerovanej optickej vlny s adekvátnou amplitúdou, ktorá je vypočítaná na základe rovnice:

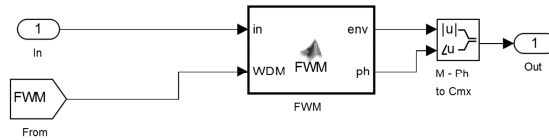
(5.10)

$$A_k^2 = 4\eta\gamma^2 d_e^2 L_{eff}^2 A_1^2 A_2^2 A_3^2 e^{-\alpha L}$$

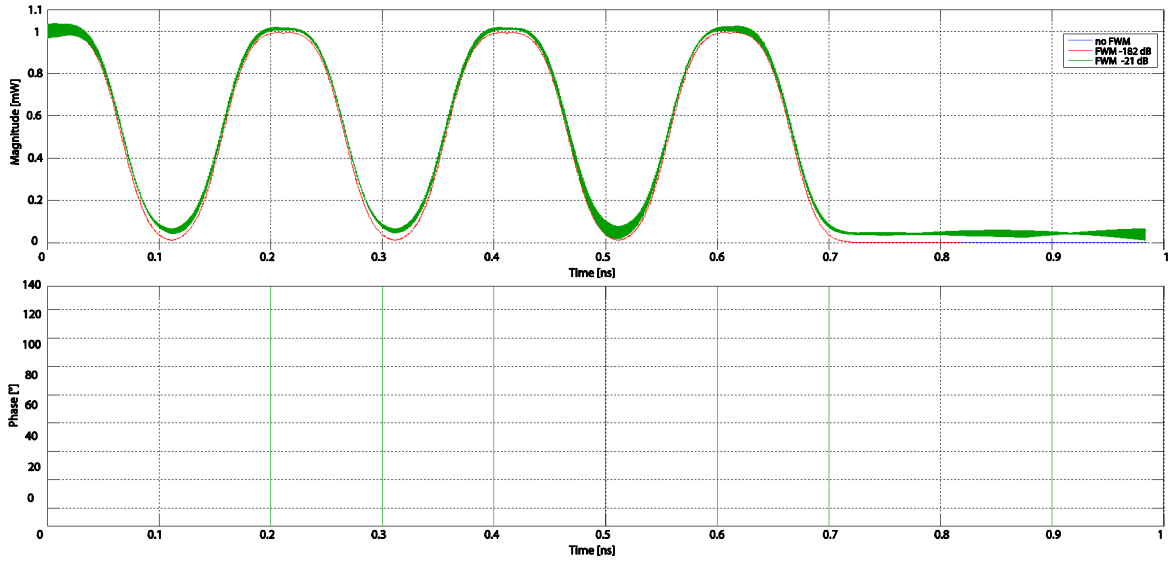
kde faktor η predstavuje efektívnosť FWM, γ je nelineárny koeficient, L_{eff} je efektívna dĺžka vlákna, $A_1^2(z)$, $A_2^2(z)$, $A_3^2(z)$ sú výkony vstupných signálov, L je dĺžka vlákna, α predstavuje špecifické tlmenie a d_e je takzvaný degeneračný faktor (rovná sa 3 ak ide o degeneratívne FWM, inak sa rovná 6) [KAH05].

Táto štvrtá vlna interferuje s prenášanými signálmi, ak sú splnené zodpovedajúce fázové podmienky, ktoré opisuje rovnica (2.5).

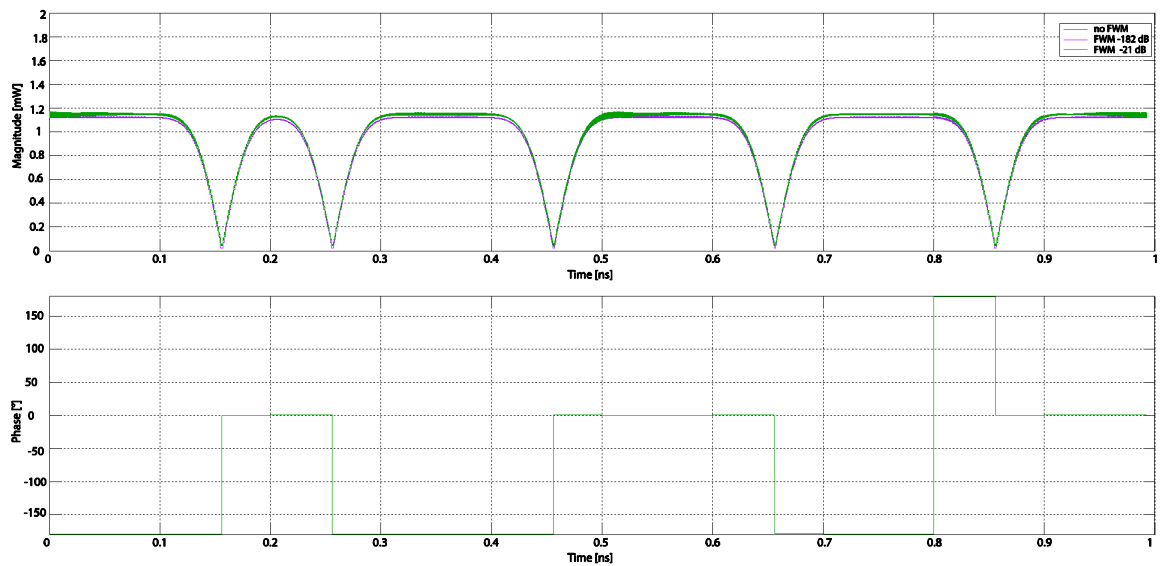
Bloková schéma FWM je zobrazená na obr. 5.33. Vplyv FWM v systémoch WDM hlavne závisí od výkonu optických signálov, disperzie a tlmenia, a z toho dôvodu je na obr. 5.34 a 5.35 zobrazený vplyv FWM na systém s prenosovou rýchlosťou 10 Gbit/s.



Obr. 5.33. Bloková schéma regenerácie vplyvu FWM



Obr. 5.34. Vplyv FWM na signál modulovaný kľúčením OOK



Obr. 5.35. Vplyv FWM na signál modulovaný kľúčením BPSK

5.3.4 Simulácia vplyvu vlastnej fázovej modulácie SPM a krížovej fázovej modulácie XPM

Vplyv SPM predstavuje zmenu fázy a frekvencie vplyvom vlastnej zmeny intenzity signálu, takže sa vyskytuje aj pri jednokanálovom prenose. Vplyv XPM mení fázu a frekvenciu signálu na základe zmeny intenzít zo susedných signálov. Na simulovanie bloku SPM&XPM je použitá rovnica (5.11), ktorá vyjadruje celkovú zmenu fázy signálu vplyvom SPM a XPM. Na obr. 5.36 je zobrazená bloková schéma SPM a XPM vplyvu. Do bloku SPM&XPM vstupuje celkovo 80 kanálov, ktoré menia výslednú fázu skúmaného signálu. Výsledná intenzita je následne zderivovaná, pre získanie frekvenčného posunu. Táto hodnota je privedená do bloku zmeny frekvencie, ktorá mení frekvenciu signálu na základe rovnice (5.12) [HIC10]. Vplyv SPM a XPM na OOK signál je znázornený na obr. 5.37a vplyv SPM a XPM na BPSK signál je znázornený na obr. 5.38.

(5.11)

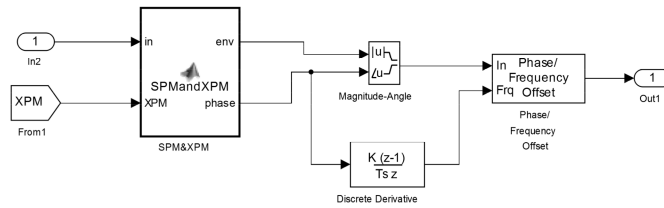
$$\Delta \phi_i = \frac{2\pi n_2 L}{\lambda} \left[I_i(t) + 2 \sum_{i \neq j} I_j(t) \right]$$

kde $\Delta \Phi_i$ predstavuje fázový posun signálu, n_2 je nelineárny index lomu, $I_i(t)$ predstavuje intenzitu prenášaného signálu, $I_j(t)$ predstavuje intenzitu signálu susedných kanálov, L je dĺžka optického vlákna a λ je vlnová dĺžka prenášaného signálu. Prvá časť zátvorky reprezentuje zmenu fázy vplyvom SPM a druhá časť zátvorky reprezentuje vplyv XPM. Faktor 2 v rovnici (5.11) má svoj pôvod v nelineárnej susceptibilite a vyjadruje dvojnásobnú efektívnosť vplyvu XPM oproti vplyvu SPM pri rovnakej intenzite signálu. Ovplyvňovanie signálu vplyvom XPM nastáva len v prípade, ak sa interagujúce signály prekrývajú v čase. Vplyv XPM môže znížiť vlastnosti systému oveľa viac ako vplyv SPM, hlavne v prípade, ak sa používa systém s viac ako 100 kanálmi.

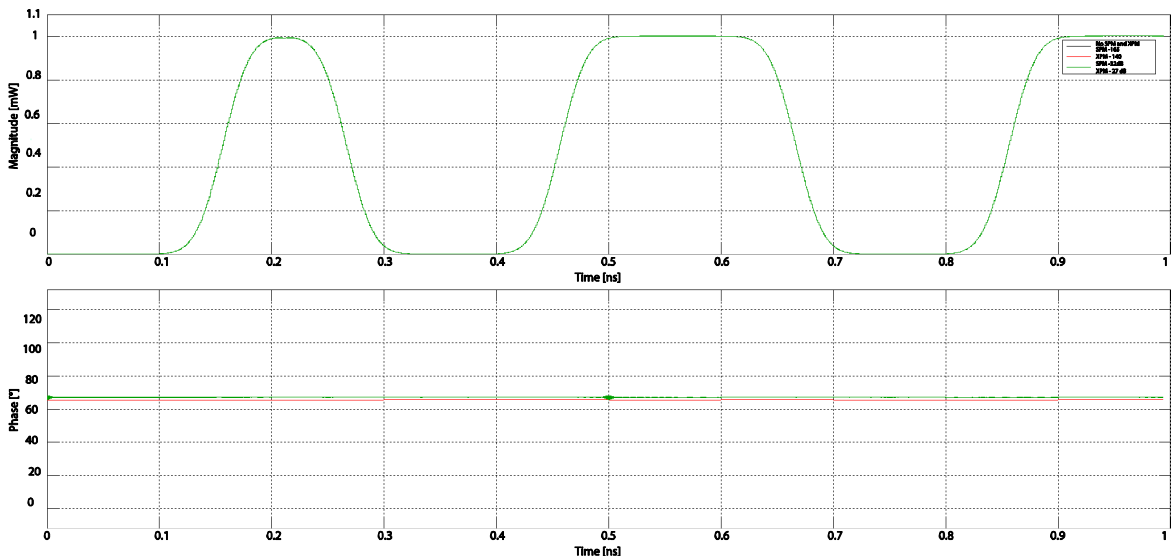
(5.12)

$$\omega = \frac{d\phi}{dt}$$

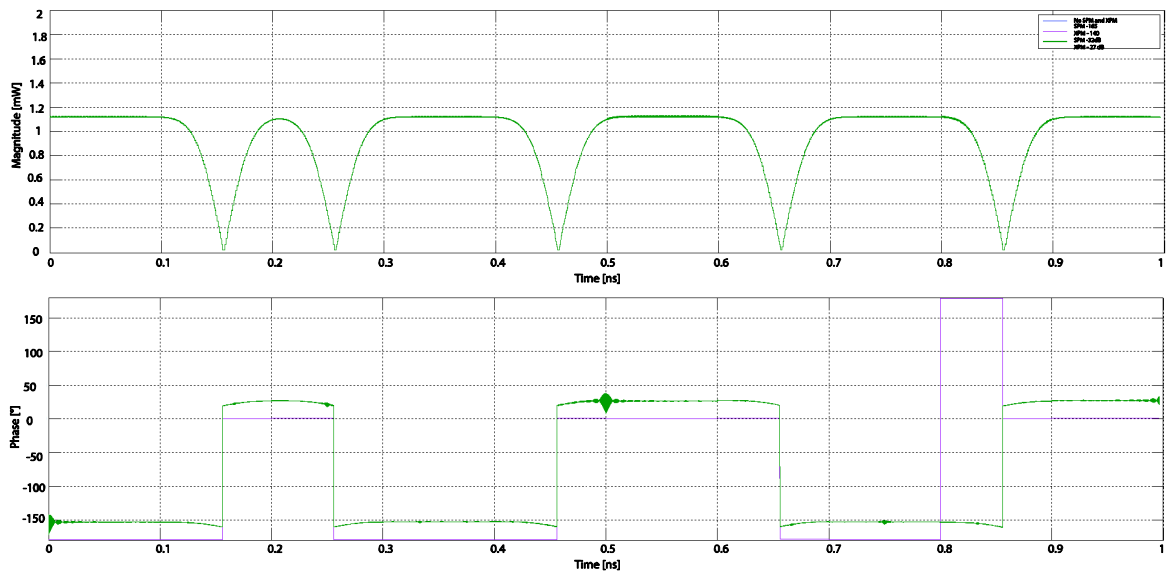
kde ω reprezentuje celkovú frekvenciu signálu v závislosti od zmeny fázy prenášaného signálu Φ .



Obr. 5.36. Bloková schéma pre generovanie vplyvov SPM a XPM



Obr. 5.37. Vplyv SPM a XPM na signál modulovaný kľúčovaním OOK



Obr. 5.38. Vplyv SPM a XPM na signál modulovaný kľúčovaním BPSK

5.3.5 Simulácia vplyvu Brillouinového a Ramanového stimulovaného rozptylu

Vplyvy SBS a SRS ovplyvňujú intenzitu signálov. Pri SBS sa zmení frekvencia niekoľkých fotónov signálu vplyvom akustickej vlny, čo má za dôsledok interferenciu s prenášaným signálom. Novovytvorená vlna sa šíri výhradne v opačnom smere, ako prenášaný signál. Vplyv SRS je podobný ako SBS, pričom šírka pásma SRS je oveľa väčšia ako pri SBS, a tak zasahuje väčší počet prenášaných kanálov. SRS sa na rozdiel od SBS dokáže šíriť aj v smere prenášaného signálu [YUJ03, AUY03]. Oba tieto vplyvy predstavujú šum. Na simuláciu SBS a SRS sme použili rovnice:

(5.13)

$$-\frac{dI_s}{dz} = +g_B I_p I_s - \alpha_s I_s$$

(5.14)

$$-\frac{dI_s}{dz} = +g_R I_p I_s - \alpha_s I_s$$

kde I_p je intenzita budiaceho signálu, I_s – intenzita ovplyvňovaného signálu, g_B – Brillouinovo stimulovaný ziskový koeficient, g_R je Ramanov stimulovaný ziskový koeficient, α_s , α_p sú straty signálu a budiacich vln. Koeficient SBS g_B závisí od frekvencie s prírastkom šírky pásma okolo 50 – 100 MHz pre elektrickú vlnu s vlnovou dĺžkou približne 1550 nm.

Stimulovaný Brillouinov a Ramanov rozptyl sa začne v optickom vlákne prejavovať len za podmienok, kedy sa prekročí určitý optický výkon vložený do optického vlákna. Vplyv SBS na prenášaný signál má menšiu efektívnosť ako pri SRS, avšak tento vplyv nastáva už pre nižšie hodnoty vloženého výkonu v optickom vlákne. Pre SMF s parametrami $A_{eff} \approx 50 \mu\text{m}^2$, $L_{eff} \approx 20$ km a $g_B \approx 6.10^{-14}$ m/W pri vlnovej dĺžke 1550 nm sa hranica celkového vloženého výkonu rovná $P_{th_SRS} \approx 1,3$ mW. Hranica vloženého výkonu pre SRS vplyv a rovnakých parametroch vlákna ako pri SBS a s $g_R \approx 6.10^{-14}$ m/W sa rovná $P_{th_SRS} \approx 570$ mW. V optických prenosových systémoch je výkon jedného kanálu do 10 mW, a teda možno navrhnuť výkonové úrovne optických systémov tak, aby dátový optický signál nebol ovplyvňovaný SRS, pričom optický signál bude vždy ovplyvňovaný SBS. Výkonové hranice pre SRS a SBS možno vypočítať rovnicami:

(5.15)

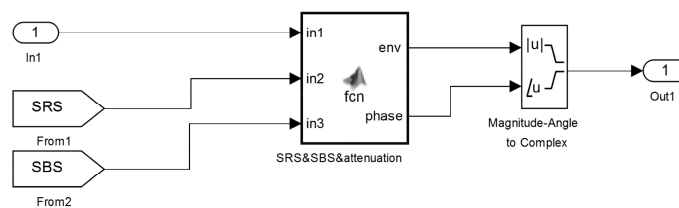
$$P_{th_SRS} = \frac{L_{eff}}{g_R A_{eff}}$$

(5.16)

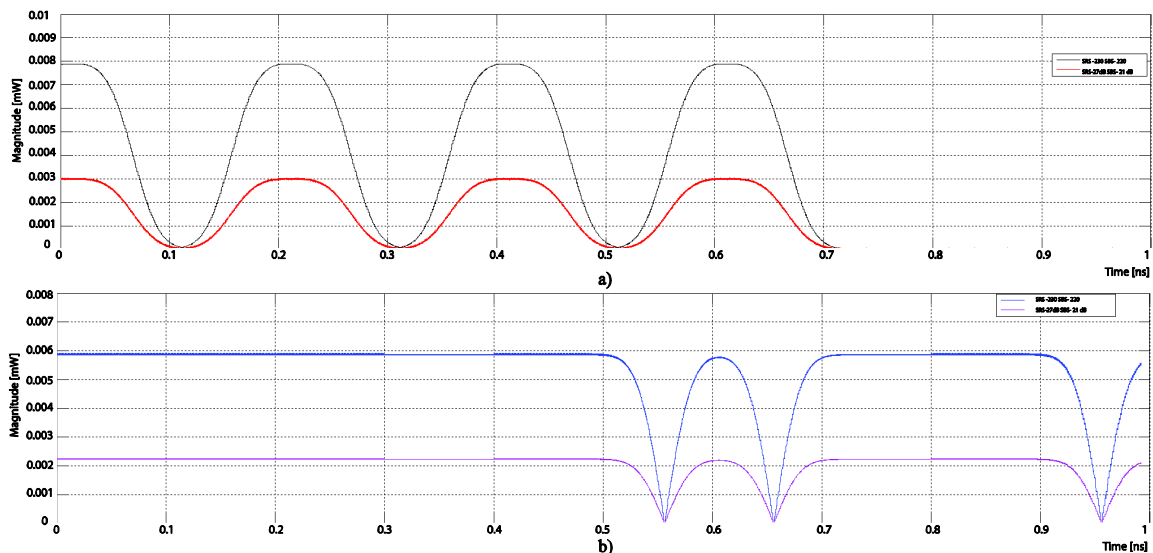
$$P_{th_SBS} = \frac{L_{eff}}{g_B A_{eff}}$$

s efektívnou dĺžkou $L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$.

Výsledná bloková schéma je znázornená na obr. 5.39. Do bloku SBS&SRS privádzame 80 kanálov, ktoré menia intenzitu skúmaného optického signálu. Vplyv SBS, SRS a tlmenia je znázornený na obr. 5.40, ktorý zobrazuje vložený šum v amplitúde signálu vplyvom SRS a SBS a pokles výkonu signálu vplyvom tlmenia



Obr. 5.39. Bloková schéma pre generovanie vplyvov SBS, SRS a tlmenia

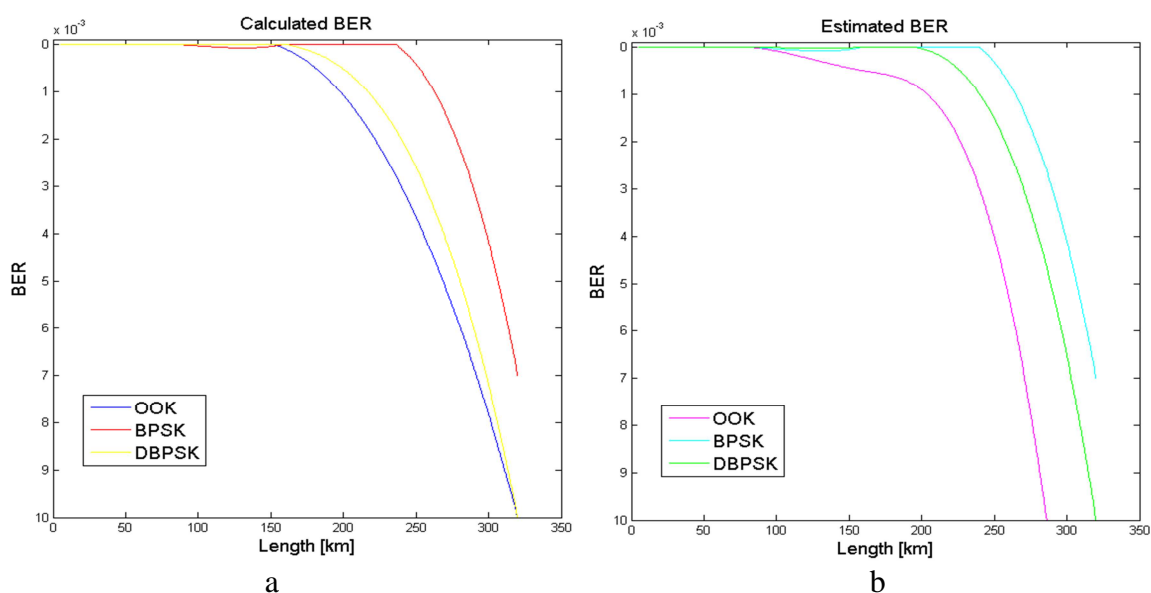


Obr. 5.40. Vplyv SRS, SBS a tlmenia na signál modulovaný: a – OOK, b – BPSK
kľúčovaním

6 Analýza dosiahnutých výsledkov a ich vyhodnotenie

6.1 Analýza negatívneho prostredia optického vlákna prostredníctvom simulačného modelu a jeho overenie

Pri simulácii známych binárnych modulačných techník možno overiť simuláciu na základe BER v závislosti od dosahu daných systémov. Pre overenie sme zvolili tri binárne modulácie – OOK, BPSK a DPSK pri 10 Gbit/s systéme. V praxi optické prenosové systémy využívajúce priamu detekciu OOK majú dosah do 50 km bez využitia optických zosilňovačov. Koherentné systémy, ktoré umožňujú potlačiť CD, dokážu vysielat' do vzdialenosti 100 km bez použitia optických zosilňovačov, alebo regenerátorov. Na obr. 6.1 sú znázornené jednotlivé BER pre dané modulácie v závislosti od dĺžky vlákna.

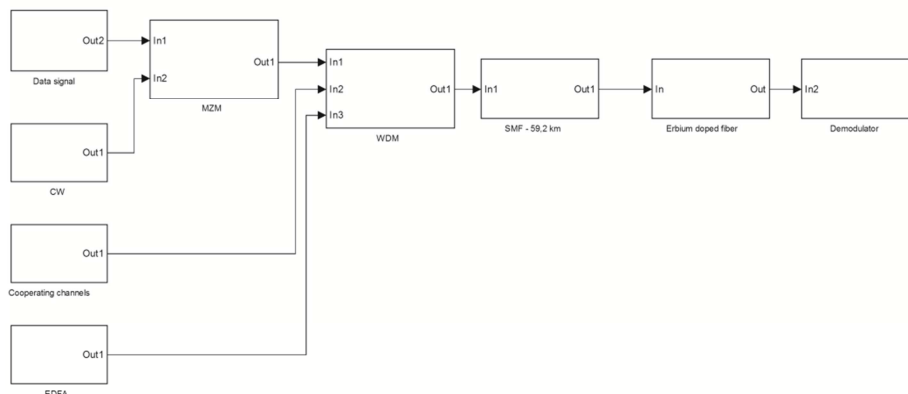


Obr. 6.1. a – Vypočítaná BER, b – odhadnutá BER pomocou faktora kvality

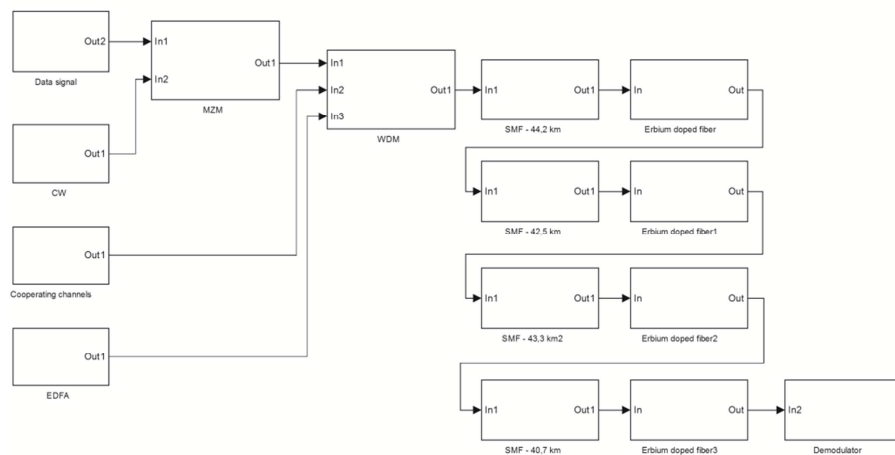
Dosah systémov možno hodnotiť parametrom BER. V optických prenosových systémoch sa systém považuje za funkčný, ak nameraný parameter BER nie je väčší ako 10^{-12} . Na obr. 6.1 sú znázornené simulované a vypočítané parametre BER pre binárne modulácie v závislosti od dĺžky vlákna. Výsledky chybovosti jednotlivých binárnych modulácií sú takmer totožné pre simuláciu aj výpočet. Nekoherentná detekcia OOK signálu má dosah do 50 km, kde BER parameter dosahuje hodnotu 10^{-12} , čo zodpovedá teoretickým poznatkom. V tomto prípade je chybovosť spôsobená CD, ktorá pri koeficiente CD 3,2 ps/nm.km (pre $\lambda = 1310$ nm) dosahovala hodnotu 175 ps, čo prekračuje povolené hraničné rozšírenie

signálu. Koherentné PSK modulácie nie sú limitované CD, a preto dosahujú vyššie vzdialenosti. V tomto prípade sa limitná hranica 100 km zhoduje s teoretickým dosahom koherentných systémov a je zapríčinená vplyvom tlmenia, ktorý limituje výkon prenášaného signálu, a teda neschopnosť detekovať signál v prijímači.

Na overenie simulačného modelu sme porovnali dve optické prenosové trasy, ktoré boli namerané v spolupráci s firmou Orange Slovensko. Optická trasa_1 pozostáva z 59,2 km štandardného SM vlákna (ITU-T G.652) využívajúca 10 Gbit/s nekoherentný OOK modulovaný signál s 80 WDM kanálmi. Podrobné parametre optického vlákna ITU-T G.652 sú uvedené v prílohe. Optická trasa_2 pozostáva z 170,7 km štandardného SM vlákna (ITU-T G.652) využívajúca 10 Gbit/s nekoherentný OOK modulovaný signál s 80 WDM kanálmi. Jednotlivé vysielacie sú realizované pomocou MZM modulátora a generovania spojitkej vlny CW pomocou CW-DFB (Distributed FeedBack) lasera. Výkon 1 mW a vložený amplitúdový šum 4 dB sú generované CW-DFB, pričom fázový šum je potlačený. Pre overenie simulácie analyzujeme vyslaný optický signál s frekvenciou 193,4 THz. Optické prenosové cesty využívajú EDFA zosilňovače, kde pred detekciou signálu je zaradené erbiom dopované vlákno, čo umožňuje zosilnenie optického signálu pred jeho detekciou. Optická trasa_1 využíva len jeden EDFA zosilňovač a optická trasa_2 používa celkovo štyri EDFA zosilňovače umiestnené každých 40 km. Na obr. 6.2 je zobrazená bloková schéma pre optickú trasu_1 a na obr. 6.3 je zobrazená bloková schéma pre optickú trasu_2. Funkčnosť jednotlivých optických trás bola overená simuláciou a výpočtom parametra BER. Výsledky simulácie pre jednotlivé optické trasy ukazujú parameter BER väčší ako 10^{-12} , a teda vyhovujú podmienkam pre prenos. Úspešnosť splnenia podmienok pre prenos je dosiahnutá použitím kódu RS(255,239).



Obr. 6.2. Bloková schéma pre optickú trasu_1



Obr. 6.3. Bloková schéma pre optickú trasu_2

Tabuľka 6.1. Parametre optickej trasy_1

Parametre	Namerané	Simulované
Rx power (dBm)	-13,69	-12,3
OSNR	21,07	20,9
PMD (ps)	1,74	1,83
SPM (dB)	1,03	1,1
XPM (dB)	-42,02	-40,5
FWM (dB)	N/A	-112
Q	6,27	6,2
BER	$>10^{-15}$	$>10^{-12}$

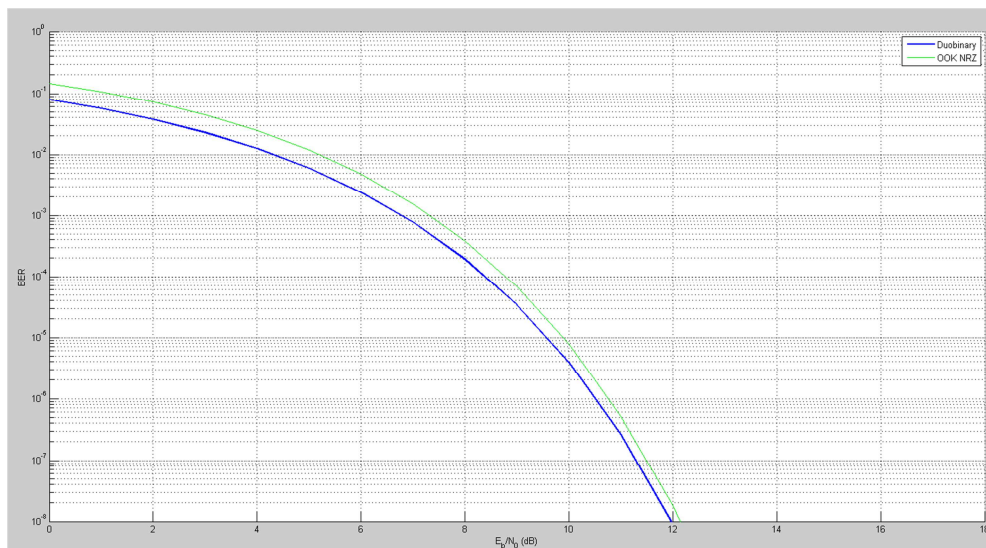
Tabuľka 6.2. Parametre optickej trasy_2

Parametre	Namerané	Simulované
Rx power(dBm)	-13,2	-13,4
OSNR	25,9	24,3
PMD (ps)	1,06	1,25
SPM (dB)	0,87	1,22
XPM (dB)	-57,59	-60,5
FWM (dB)	N/A	-124,3
Q	7,99	8,1
BER	$>10^{-15}$	$>10^{-12}$

Porovnanie jednotlivých meraných a simulovaných trás je znázornené v tab. 6.1 pre optickú trasu_1 a v tab 6.2 pre optickú trasu_2. Jednotlivé vplyvy prostredia optického vlákna vyšli s maximálnou odchýlkou okolo 2 dB. Väčšinou išlo o nárast vplyvov v simulácii, čo znamená, že simulované trasy majú horšie vlastnosti ako pri reálnom nasadení, a teda pri vhodnom výsledku bude možno takýto optický prenosový systém bez problémov nasadiť do prevádzky.

6.2 Analýza výsledkov v oblasti modulačných techník pre použitie v prostredí optického vlákna

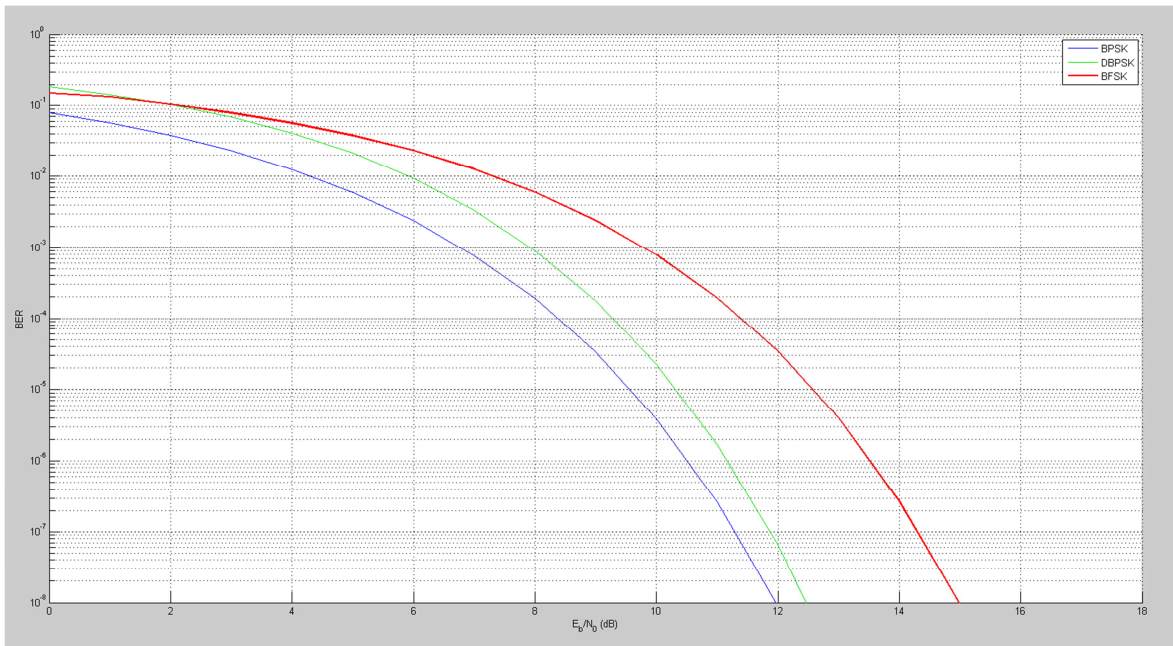
V minulosti využívali optické prenosové systémy dvojstavovú amplitúdovú moduláciu OOK s priamym detekovaním. Takéto systémy sa vyznačovali prenosom 1 – 10 Gbit/s cez optické jednomódové vlákna s dĺžkou do 50 km. V súčasnosti možno upraviť takýto nasadený systém koherentným prijímačom, ktorý je schopný prenášať optický signál rádovo v km, v závislosti od citlivosti prijímača a od generovaného šumu vysielača. Zmena optického systému na koherentný je dostupná, ale cenovo náročná pre zabezpečovacie mechanizmy na detekciu fázy polarizácie. Ďalším možným vylepšením na koherentnú detekciu je zmena kľúčovania OOK na moduláciu Duobinary. Ide o úpravu elektrickej časti systému, ktorá je menej nákladná, ako v prípade výmeny optických komponentov. V tejto časti sme využili simuláciu Monte Carlo v prostredí Matlab. Algoritmus Monte Carlo umožnil merať bitovú chybovosť pre vytvorený model prostredia optického vlákna s danou moduláciou. V tejto simulácii bolo použité štandardné SM vlákno spĺňajúce špecifikáciu ITU-T G.656. Porovnanie kľúčovania OOK s koherentnou detekciou a modulácie Duobinary je znázornené na obr. 6.4.



Obr. 6.4. Porovnanie chybovosti pre kľúčovanie OOK a Duobinary moduláciu

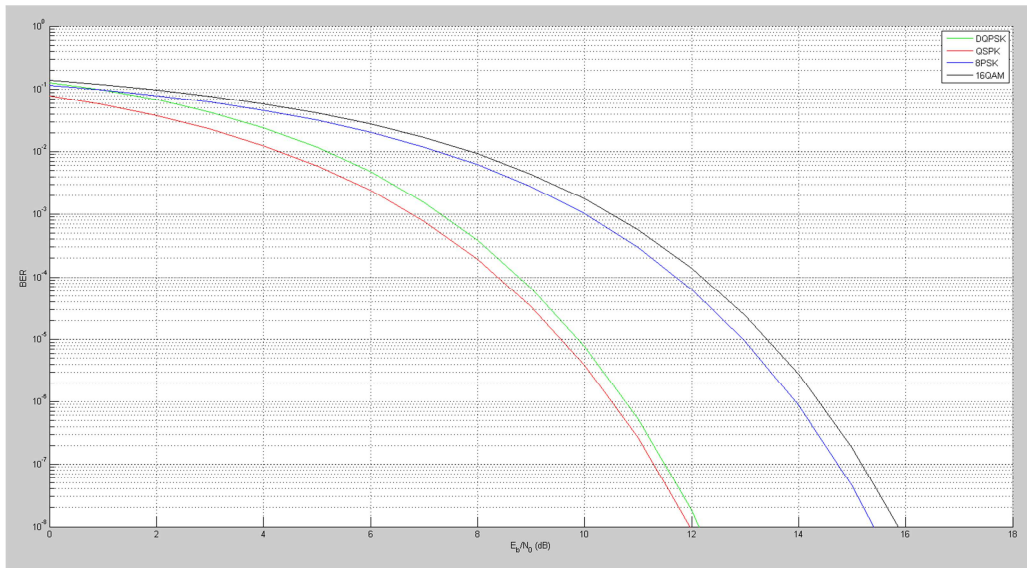
Ďalším možným riešením je použiť koherentný systém s fázovými a s frekvenčnými modulačnými technikami. Medzi základné patrí kľúčovanie BPSK, DBPSK a BFSK. Jednotlivé modulačné techniky dosahujú podobné charakteristiky zobrazené na obr. 6.5,

kde BPSK dosahuje lepších výsledkov zhruba o 0,1 dB oproti DBPSK a zhruba o 3 dB oproti FSK.



Obr. 6.5. Porovnanie chybovosti pre kľúčovanie BPSK, DBPSK a BFSK

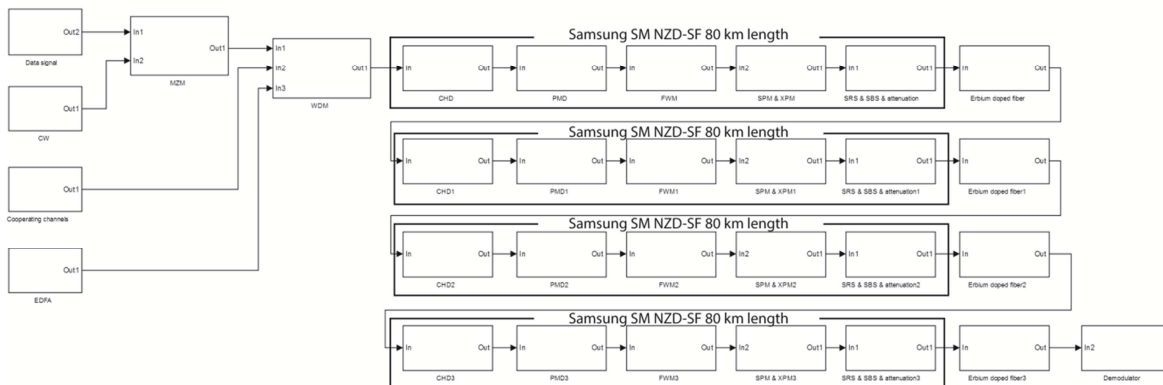
Pre zvýšenie prenosovej rýchlosti optického prenosového systému možno nasadiť viacstavové modulácie. Takéto modulačné techniky bývajú náchylnejšie na odstupe signál-šum OSNR ako binárne modulácie, preto je nevyhnutné analyzovať parameter BER v závislosti od OSNR. Na obr. 6.6 je znázornená chybovosť pre viacstavové modulácie. QPSK a DQPSK kľúčovania vykazujú podobnú odolnosť proti šumu ako BPSK a DBPSK kľúčovania. V tomto prípade by išlo o zvýšenie prenosovej rýchlosti systému o dvojnásobok a v kombinácii s polarizačne módovou moduláciou by išlo o 40 Gbit/s systém. Takéto riešenie vyžaduje nasadenie modulátorov MZM a modulátora PDM. Viacstavové modulácie 8PSK a 16QAM majú zhoršenú odolnosť proti šumu takmer o 2 dB, čo by v niektorých systémoch viedlo k vysokej chybovosti zapríčinennej šumom lasera, zosilňovačov a/alebo nelineárných vplyvov prostredia optického vlákna.



Obr. 6.6. Porovnanie chybovosti pre viacstavové modulácie QPSK, DQPSK, 8PSK a 16QAM

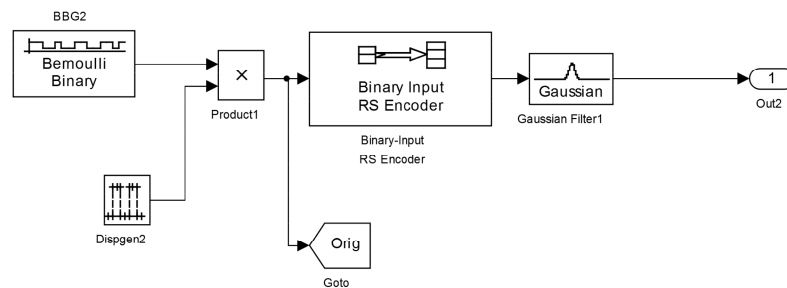
6.3 Analýza výsledkov v oblasti kódovacích techník pre použitie v prostredí optického vlákna

Jedným z nových trendov zlepšenia prenosu cez optické prenosové systémy je využitie rozličných kódovacích techník. Pre analýzu vybraných kódov sme si zvolili optický prenosový systém, ktorého parametre sú uvedené v časti 6.1. Celková bloková schéma optického systému je znázornená na obr. 6.7, kde celková dĺžka vlákien je 320 km, pričom každých 40 km bolo v rámci zosilnenia EDFA vložené erbiom dopované vlákno dĺžky 80 m.

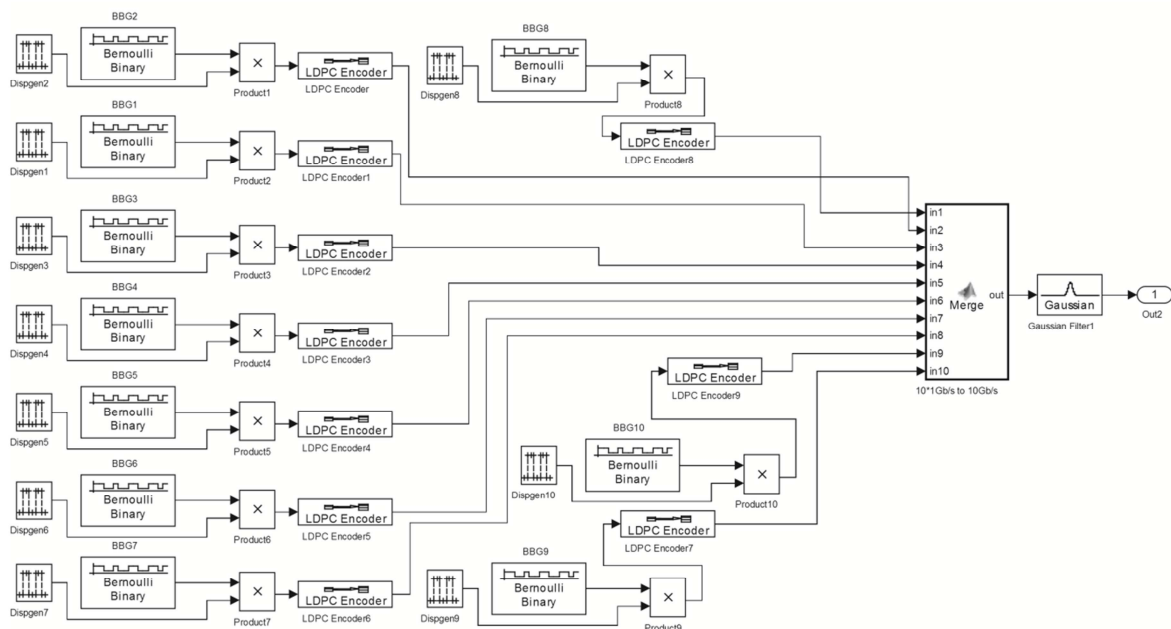


Obr. 6.7. Bloková schéma pre analýzu kódovacích techník

Pri analýze kódovacích techník sme sa pre zlepšenie prenosu binárnych modulačných techník nasadených v optickom systéme rozhodli použiť a analyzovať nasledovné kódy: RS (255,239), BCH (255,231) a LDPC (960,480). Dátové binárne postupnosti sú kódované v elektrickej časti a následne modulované príslušnou modulačnou technikou v modulátoroch MZM. RS a BCH kódy umožňujú kódovanie priamo 10 Gbit/s signálu, ako je znázornené na obr. 6.8. LDPC kódovanie je však časovo náročné a z toho dôvodu sú samostatne kódované 1 Gbit/s dátové signály, ktoré sú následne časovo multiplexované do jedného 10 Gbit/s dátového toku. Kódovanie LDPC spolu s časovým multiplexom signálu je znázornené na obr. 6.9.

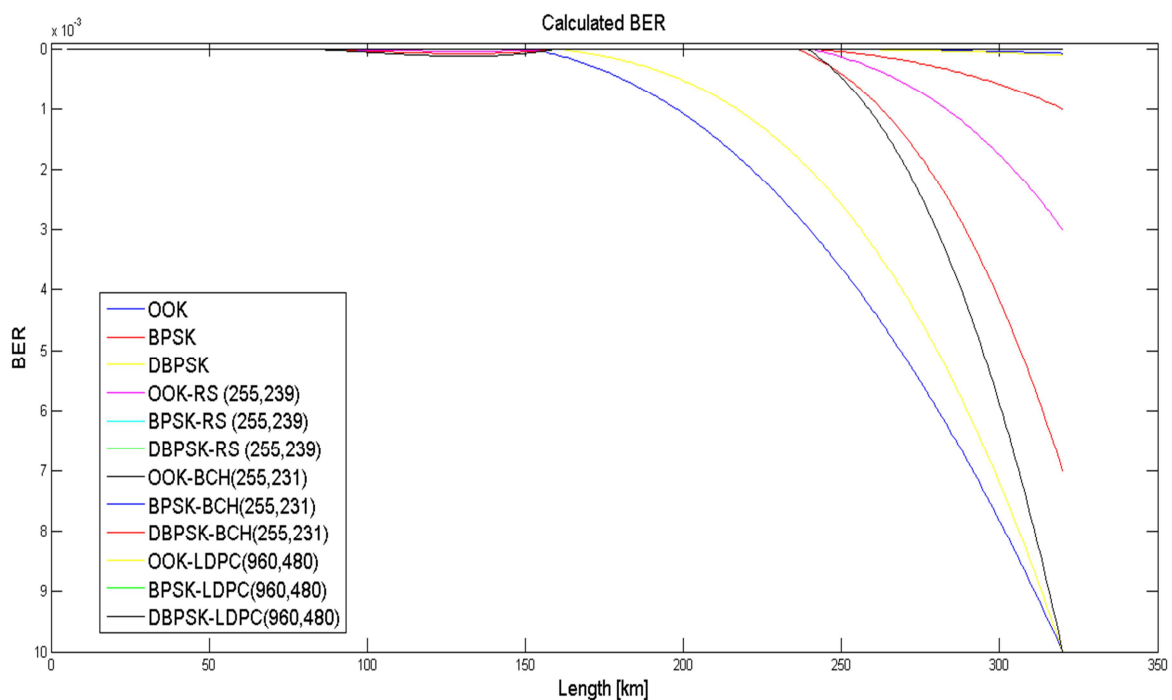


Obr. 6.8. Bloková schéma kódovania dátového signálu pomocou RS a BCH



Obr. 6.9. Bloková schéma kódovania dátového signálu pomocou LDPC

Na obr. 6.10 je znázornené porovnanie binárnych modulačných techník OOK, BPSK a DBPSK v kombinácii s použitými kódovacími technikami RS, BCH a LDPC. Ako už bolo spomenuté, pre nekoherentnú detekciu OOK kľúčovania je dosah systému limitovaný na 50 km. Použitie kódovacích techník umožnilo zvýšiť dosah systému na 80 – 160 km v závislosti od použitého kódu. Lepšie parametre sú dosiahnuteľné pomocou koherentných fázových modulačných techník BPSK a DBPSK kľúčovania, kde limit týchto kľúčovaní je okolo 80 – 100 km. Kódovanie pomocou RS a BCH umožnilo zvýšiť dosah systému na 160 km a 230 km pri použití LDPC kódu. Pre tento konkrétny systém je na zvýšenie dosahu najefektívnejšie použiť LDPC kódy, ktoré dosahuje až o 50 % lepšie výsledky. Nevýhodou takéhoto systému je však nutnosť kódovať jednotlivé dátové signály s nižšou prenosovou rýchlosťou, ako je celková prenosová rýchlosť systému. Z toho dôvodu je lepšie použiť LDPC kódy na rozhraní diaľkových a metropolitných sietí, kde dochádza k časovému multiplexovaniu dátových signálov.



Obr. 6.10. Porovnanie binárnych modulačných techník v kombinácii s kódovacími technikami

6.4 Návrh realizácie modulačných a kódovacích techník

Pri návrhu kombinácie modulačných a kódovacích techník uvažujeme použitie štandardného SM vlákna (ITU-T G652) pri prenose dátových signálov s prenosovou rýchlosťou 10 Gbit/s a s 80 WDM kanálmi. Jednotlivé vysielače sú realizované pomocou MZM modulátora a generovania spojitej vlny CW pomocou CW-DFB lasera [KIS01, TAK03]. Výkon 1 mW a vložený amplitúdový šum 4 dB je generovaný laserom CW-DFB, pričom fázový šum je potlačený. Analyzovaný vyslaný optický signál je na frekvencii 193,4 THz a jeho výsledný SNR je 30 dB. Na zvýšenie dosahu optickej prenosovej trasy je použitý EDFA zosilňovač každých 40 km s Ramanovým zosilňovačom na začiatku trasy, kde oba zosilňovače majú NF nastavené na 4 dB. Pred prijímač je zaradené vlákno so zápornou CD pre kompenzovanie vplyvu CD v systéme. Prijatý signál je detekovaný koherentným detektorom, ktorého citlivosť je do -17 dBm s využitím tvrdého rozhodovania pri použití LDPC(960,480) zvolený na základe analýzy v časti 6.3 [IPE07].

V návrhu sme najprv uvažovali binárne modulácie, kde kľúčovanie OOK dosahuje najhoršie prenosové vlastnosti, pričom dosah systému je limitovaný na 230 km. Pri analýze kľúčovaní BPSK a BFSK sme dosiahli podobné prenosové vlastnosti, kde je systém schopný prenášať signál na vzdialenosť okolo 300 km pri prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s. Na dosiahnutie najväčšieho dosahu systému je vhodné použiť práve tieto modulačné formáty. Pre zvýšenie prenosovej rýchlosti pre tieto modulačné formáty možno použiť polarizačnú moduláciu PDM (PDM-BPSK a PDM-BFSK), kde výsledná prenosová rýchlosť bude dvojnásobná, t. j. 20 Gbit/s. Pre dosiahnutie vyššej prenosovej rýchlosti je nutné použiť viacstavové modulačné formáty. Signál modulovaný kľúčením QPSK možno preniesť na vzdialenosť okolo 300 km, kde prenosová rýchlosť oproti binárnym moduláciám je dvojnásobná a pri použití PDM možno preniesť signál 40 Gbit/s. Pri použití 8PSK a 16QAM systémov je maximálny dosah systému okolo 200 km, čo je spôsobené šumom zosilňovačov a nelineárnymi vplyvmi prostredia optického vlákna v dôsledku vyššieho vloženého výkonu do systému. Takýto systém má však prenosovú rýchlosť pri použití PDM-8PSK 60 Gbit/s a pri PDM-16QAM až 80 Gbit/s na jeden kanál. Pri analýze signálov sme zistili, že zhoršenie dosahu systémov je spôsobené šumom zosilňovačov a kumulovaním nelineárných vplyvov po každom zosilnení. Pri použití takéhoto zapojenia je výhodné použiť práve kľúčovanie 16QAM s kódovaním jednotlivých kanálov kódom LDPC(960,480). Pre dosiahnutie lepších parametrov optického systému možno použiť

kvalitnejšie zosilňovače s nižším NF , iné detektory a jemné dekodovanie v detektoroch. Takéto úpravy však rapídne zvyšujú cenu daného systému, a teda ďalšia analýza z hľadiska ceny v porovnaní s efektívnosťou systému je nutná. Výstupné parametre pre dané modulačné techniky sú zobrazené v tab. 6.3.

Tabuľka 6.3. Porovnanie vybraných modulačných techník pre vybraný optický prenosový systém

Modulačné techniky	Parametre	Vzdialenosť [km]							
		40	80	120	160	200	240	280	320
OOK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}
	OSNR [dB]	25	19	14	7	2	1	1	1
BPSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-9}
	OSNR [dB]	27	24	20	17	15	11	8	5
DBPSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-10}	10^{-8}
	OSNR [dB]	27	24	20	17	15	11	8	5
BFSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-9}
	OSNR [dB]	28	26	24	21	18	16	13	10
QPSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-9}
	OSNR [dB]	27	24	20	17	15	11	8	5
8PSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-10}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}
	OSNR [dB]	27	23	19	14	9	6	2	1
16QAM	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-3}	10^{-1}	10^{-1}
	OSNR [dB]	27	22	17	12	7	2	2	1

7 Pôvodné vedecké prínosy

Cieľom monografie bolo nájsť optimálne spojenie modulácie a kódu na opravu chýb z hľadiska dĺžky vlákna a prenosovej rýchlosti pri prenose cez diaľkové siete a použitie jednomódových vlákien. Je tu zobrazený konkrétny návrh na zlepšenie prenosovej rýchlosti a kapacity daného systému. Z analýzy optického prostredia je zjavné, že každý optický prenosový systém musí byť analyzovaný samostatne v závislosti od použitého optického vlákna. Pri nasadení nových pokročilých techník spracovania signálov je nutné tiež vypočítať jednotlivé náklady na zlepšenie parametrov daného systému. Viacstavové modulačné techniky v kombinácii s kódovacími technikami sa ukázali vhodné pre zvýšenie celkovej prenosovej rýchlosti a kapacity systémov. V tomto prípade bolo do úvahy zobrazené len dostupné technické riešenie.

Za pôvodné prínosy monografie na základe preštudovanej literatúry a získaných výsledkov považujem:

1. Vytvorenie simulačného modelu pre lineárne a nelineárne vplyvy optického prenosového média v programe Matlab Simulink 2014 a porovnanie výstupných parametrov signálu pomocou BER a diagramov oka s výsledkami iných publikovaných prác.
2. Rozšírenie simulačného modelu o existujúce a nové viacstavové modulačné techniky, ako sú 8PSK, 16QAM a BFSK kľúčovania, ktoré umožnili zvýšenie prenosovej rýchlosti daného optického systému, pri menšej odolnosti proti šumu.
3. Návrh a implementácia doprednej opravy chýb FEC do vytvoreného modelu pri použití známeho kódu RS (255,239), ktorý dokázal znížiť hranicu SNR pre detekovanie prijatého signálu.
4. Implementovanie iných opravných kódov, t. j. BCH a LDPC kódov, ktoré dosahovali výrazne lepšie výsledky, ako pri použití RS kódu.
5. Analýzu výsledkov simulácie a porovnanie výsledkov simulácie s výsledkami z optických prenosových systémov reálnej prevádzky.
6. Návrh realizácie navrhovaných modulačných a kódovacích techník v reálnych optokomunikačných systémoch a sieťach.

8 Konkrétne závery pre ďalší rozvoj vedy

V monografii je znázornený komplexný simulačný model, ktorý je schopný analyzovať existujúce a nové viacstavové modulácie v kombinácii s rôznymi kódovacími technikami. Generovanie výsledkov zo simulačného programu je časovo náročný proces. Z toho dôvodu možno simulačný model rozšíriť a upraviť tak, aby jednotlivé výpočtové časti výpočtov boli rozdistribuované medzi viaceré grafické procesory. Takáto úprava by umožnila simulovanie zložitejších schém a nových kódovacích techník, ako v prípade LDPC kódov, keď je niekoľko pomalších dátových tokov kódovaných a následne multiplexovaných použitím TDM.

Na simulovanie DFB lasera sme využili fyzikálny princíp generovania spojitej vlny, pričom vytvorený modulovaný signál obsahoval parameter OSNR-30 dB modelovaný AWGN kanálom. Na simulovanie koherentného detektora sme využili princíp tvrdého rozhodovania. Možno uvažovať rôzne typy laserov a detektorov, kde pri laseroch možno upraviť generovaný šum a pri detektoroch využiť jednu zo schém pre mäkké rozhodovanie, čo by umožnilo zvýšiť dosah optických prenosových systémov. Pri skúmaní bola vytvorená schéma pre generovanie BFSK kľúčovania. Táto schéma vykazuje dobré prenosové vlastnosti. Ďalším rozvojom môže byť použitie viacstavového FSK formátu prípadne kombinácie s inými viacstavovými moduláciami. Podľa analýzy súčasného stavu v optických prenosových systémov možno ďalší rozvoj zamerať na úpravu signálu do tvaru solitónov, ktorý by umožňoval prenos na väčšie vzdialenosti. Takto prenášané signály možno analyzovať z hľadiska použitých zariadení v systéme, napr. použité modulátory, lasery a rôzne optické zosilňovače.

Zoznam použitej literatúry

- [AJM15] Ajmani M., Singh P., *FWM in WDM System, Effects and Techniques to Minimize: A Review*, In Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies ACCT, ISBN: 978-1-4799-8487-9, February 2015.
- [ALL03] Ch. T. Allen, P. K. Kondamuri, D. L. Richards, D. C. Hague, *Measured Temporal and Spectral PMD Characteristics and Their Implications for Network-Level Mitigation Approaches*, Journal of lightwave technology, vol. 21, NO. 1, January 2003
- [AUY03] AuYeung J., Yariv A., *Spontaneous and stimulated Raman scattering in long low loss fibers*, In IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 14, Issue: 5, ISSN: 0018-9197, January 2003.
- [BAL09] Bale B. G., Boscolo S., Turitsyn S. K., *Dissipative dispersion-managed solitons in mode-locked fibre lasers*, Conference on Optical Communication, Vienna, ISBN:978-1-4244-5096-1, September 2009.
- [BER05] Bergano S. N., *Wavelength Division Multiplexing in Long-Haul Transoceanic Transmission Systems*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 12, December 2005.
- [BEY14] Beygi L., Agrell E., Kahn M. J., Karlsson M., *Rate-Adaptive Coded Modulation for Fiber-Optic Communications*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 32, No. 2, January 15, 2014.
- [CAN10] F. Cang, K. Onohara, T. Mizuochi, *Forward Error Correction for 100 G Transpor Network*, IEEE Communication Magazine, March 2010 s 48 - 55.
- [CAR02] Carter A.C. Griffin R.A., *"Optical differential quadrature phase-shift key (oDQPSK) for high capacity optical transmission,"* Technical Digest of Optical. Fiber Communication Conference, WX6, 2002.
- [CHA06] Charlet G., *Progress in Optical Modulation Formats for High-Bit Rate WDM Transmissions*, In IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 12, No. 4, August 2006.

- [CHA09] Chandrasekhar S., Liu X., *Experimental investigation on the performance of closely spaced multi-carrier PDM-QPSK with digital coherent detection*, *InOpt. Exp.*, Vol. 17, No. 24, pp. 21350–21361, 2009.
- [CHI12] Chi N., Fang W., Shao Y., Zhang J., Tao L., *FSK Modulation Scheme for High-Speed Optical Transmission*, In *ZTE Communications*, Vol. 10, No. 3, September 2012.
- [CHO01] Cho S.-H., Kumagai H., Midorikawa K., *Fabrication of multi-core structures in optical fibers using plasma self-channeling excited by a femtosecond laser*, In *Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO/Pacific Rim 2001. The 4th Pacific Rim Conference*, Vol. 1, July 2001.
- [CUC06] J. Čuchran, R. Róka, *Optocommunication systems and networks*. STU Publishing house Bratislava, 2006, pp. 6-140.
- [DIN11] Ding W., Gorbach A.V., Wadsworth W.J., Knight, J.C., *Time- and frequency-domain measurements of solitons in subwavelength silicon waveguides using cross-correlation*, In *Lasers and Electro-Optics Europe, 12th Conference on European Quantum Electronics Conference*, ISBN:978-1-4577-0533-5, 22-26 May 2011.
- [DJO04] Djordjevic B. I., Vasic B., Neifeld A. M., *LDPC-Coded OFDM for Optical Communication Systems with Direct Detection*, In *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 13, No. 5, October 2004.
- [DJO06] Djordjevic B. I., Sankaranarayanan S., Chilappagari K. S., Vasic B., *Low-Density Parity-Check Codes for 40-Gb/s Optical Transmission Systems*, In *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 12, No. 4, August 2006.
- [DJO07] Djordjevic I. B., *Generalized LDPC Codes and Turbo-Product Codes with Reed-Muller Component Codes*, In *Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, 2007, Serbia*, ISBN: 978-1-4244-1468-0, September 2007.
- [ESS10] Essiambre R., Kramer G., Winzer P.J., Foschini G.J., *Capacity Limits of Optical Fiber Networks*, In *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, Issue: 4, ISSN: 0733-8724, February 2010.

- [EVA11] Evans P. et al., "*Multi-channel coherent PM-QPSK InP transmitter photonic integrated circuit (PIC) operating at 112 Gb/s per wavelength,*" Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference, PDPC7, 2011.
- [FUK01] Fukuchi K., Kasamatsu T., Morie M., Ohhira R., Ito T., Sekiya K., Ogasahara D., Ono T., *10.92-Tb/s (273 x 40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM opticalrepeated transmission experiment,* In Proc. Optical Fiber Communication Conf. (OFC), 2001, Paper PD24.
- [GEO97] Georges T., Charbonnier B., *Reduction of the dispersive wave in periodically amplified links with initially chirped solitons,* In Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 9, Issue: 1, ISSN: 1041-1135, January 1997.
- [GNA11] Gnauck A.H. et al., "*Generation and transmission of 21.4-Gbaud PDM 64-QAM using a high-power DAC driving a single I/Q modulator,*" Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference, PDPB2, 2011.
- [GRO88] Wayne D. Grover, *Forward Error Correction in Dispersion-Limited Lightwave System,* JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 6. No 5. May 1988.
- [HAS00] Hasegawa A., *Soliton-Based Optical Communications: An Overview,* In IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 6., November/December 2000.
- [HAS12] Hassan Abid Yasser, *Polarization Losses in Optical Fibers,* In Recent Progress in Optical Fiber Research, Dr Moh. Yasin (Ed.), ISBN: 978-953-307-823-6, InTech, January 2012.
- [HEF96] B. L. Heffner, *PMD measurement techniques – a consistent comparison,* In Optical Fiber Communications, ISBN: 1-55752-422-X, March 1996.
- [HIC10] Hiçdurmaz B., Karlik S. E., Yilmaz G., *Analysis of SPM and XPM phenomena in optical fiber communication systems,* In National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering ELECO, ISBN: 978-1-4244-9588-7, December 2010.
- [IAN98] E. Iannone, F. Matera, A. Mecozzi, M. Settembre, *Nonlinear Optical Communication Networks,* John wiley and sons, pp. 20 50, TK5103.59.N66 1998.

- [INO02] Inoue K., *Polarization effect on four-wave mixing efficiency in a single-mode fiber*, In IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 28, Issue: 4, ISSN: 0018-9197, August 2002.
- [IPE07] Ip. E., Lau A. P. T., Barros J. F. D., Kahn M. J., *Coherent detection in optical fiber systems*, In Optics Express, Vol. 16, No. 2, November 2007.
- [JAM05] Z. Jamaludin, A. F. Abas, A. S.M. Noor, M.K. Abfullah, *Issues n polarization mode disperzion (PMD) for high speed fiber optics transmission*, Suranaree J. Sci. Technol., Vol. 12 No. 2, June 2005.
- [JIA12] Jia Z., Yu J., Chien H.-Ch., Dong Z., *Field Transmission of 100 G and Beyond: Multiple Baud Rates and Mixed Line Rates Using Nyquist-WDM Technology*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, Issue: 24, ISSN: 0733-8724, July 2012.
- [KAH05] J. M. Kahn, K.-P. Ho, "Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems", IEEE. J. on Sel. Topics in Quantum Electron. 10, 259-272 (2004)2005.
- [KAL99] Kalmar A. Winzer P.J., "Sensitivity enhancement of optical receivers by impulsive coding," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 17, no. 2, pp.171-177, 1999.
- [KAR07] Karfaa Y.M., Ismail M., Abbou F.M., Shaari S., *Effects of four-wave mixing crosstalk in WDM networks on the transmitted optical frequencies and wavelengths of channels for various fiber types*, In Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics APACE, ISBN: 978-1-4244-1434-5, December 2007.
- [KIS01] Kise T., *Over 100mW high power operation of 1625nm Lb and DFB laser diodes*, LEOS 2001, Technical Digest ThQ5, pp. 802-803, November 2001.
- [KOR12] Korotky S. K., *Price-points for components of multi-core fiber communication systems in backbone optical networks*, In Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal, Vol. 4, Issue: 5, ISSN: 1943-0620, May 2012.
- [KUN02] Kung A., Thevenaz L., Robert P. A., *Polarization analysis of Brillouin scattering in a circularly birefringent fiber ring resonator*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 6, August 2002.

- [LEE14] Lee Y., Tanaka K., Nomoto E., Arimoto H., Sugawara T., *Multi-core fiber technology for optical-access and short-range links*, In Optical Internet 2014 (COIN), 2014 12th International Conference, pp 1-2, August 2014.
- [LIN12] Lin Ch., Djordjevic B. I., Zou D., Arabaci M., Cvijetic M., *Nonbinary LDPC-Coded Mode-Multiplexed Coherent Optical OFDM 1.28-Tbit/s 16-QAM Signal Transmission Over 2000 km of Few-Mode Fibers With Mode-Dependent Loss*, In IEEE Photonics Journal, Vol. 4, No. 5, October 2012.
- [LIY14] Li Y., Hua N., Zheng X., *An analysis of optimized CapEx for multi-core fiber based optical networks*, In Optical Communications and Networks (ICOON), 2014 13th International Conference, pp. 1 -4, November 2014.
- [MIZ05] T. Mizuochi, *Recent Progress in Forward Error Correction for Optical Communication Systems*, published in IEICE TRANSACTIONS on Communications, 2005/05/01, ISSN 0916-8516, Vol.E88-B No. 5, pp. 1934-1946.
- [OLM13] Olmedo M.I., Tianjian Z., Jensen J.B., Qiwen Z., *Multiband Carrierless Amplitude Phase Modulation for High Capacity Optical Data Links*, In Journal of Lightwave Technology, ISSN:0733-8724, Vol. 32, Issue: 4, October 2013.
- [OUC06] Ouchi D., Kubo K., Mizuochi T., Miyata Y., *A fully integrated block turbo code FEC for 10 Gb/s optical communication systems*, In Optical Fiber Communication Conference, 2006, ISBN: 1-55752-803-9, March 2006.
- [RAH15] Rahman T., Rafique D., Napoli A., de Man E., *Ultralong Haul 1.28-Tb/s PM-16QAM WDM Transmission Employing Hybrid Amplification*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 33, Issue: 9, ISSN: 0733-8724, February 2015.
- [RAS12] Rasheed I., Abdullah M., Mehmood S., Chaudhary M., *Analyzing the non-linear effects at various power levels and channel counts on the performance of DWDM based optical fiber communication system*, In International Conference on Emerging Technologies ICET, ISBN: 978-1-4673-4452-4, October 2012.
- [ROH14] Rohde H., Gottwald E., Teixeira A., Dias Reis J., *Coherent Ultra Dense WDM Technology for Next Generation Optical Metro and Access*

- Networks*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 32, Issue: 10, ISSN: 0733-8724, April 2014.
- [SAK08] Sakamoto T. et al., "50-km SMF transmission of 50-Gb/s 16 QAM generated by quad-parallel MZM," Proceedings of European Conference on Optical Communication, Tu.1.E.3, 2008.
- [SAL91] Saleh B. E. A., Teich M. C., *Fundamentals of photonics*, A Wiley-Interscience publication, 1991, pp. 739, TA1520.S2, ISBN: 978-0-471-35832-9.
- [SEA05] J. Seams, *A Comparison of Resistive Terminators for High Speed Digital Data Transmission*, *High Frequency Electronics*, Submit Technical Medium, October 2005.
- [SEG04] Segev M., Fleischer J.W., Cohen O., Buljan, H., *Wave propagation and solitons in 2D photonic structures*, In Conference on Lasers and Electro-Optics, Vol. 1, ISBN: 1-55752-777-6, May 2004.
- [SHA11] Sharma R. L., Singh R., *Solitons, its Evolution and Applications in High Speed Optical Communication*, In International Journal on Emerging Technologies, ISSN: 0975-8364, 2011.
- [SHT99] Shtaif M., Gnauck H. A., *The Relation Between Optical Duobinary Modulation and Spectral Efficiency in WDM Systems*, In IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 6, June 1999.
- [SIN07] Singh S. P., Singh N., *Nonlinear Effects in Optical Fibers: Origin, Management and Applications*, In *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 73, 249-275, 2007.
- [SON02] Song L., Yu M. L., Shaffer S. M., *10- and 40-Gb/s Forward Error Correction Devices for Optical Communications*, In IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 37, No. 11, November 2002.
- [SUL12] Sultana N., Islam M.S., *Analysis of XPM effect with SPM and GVD in WDM fiber optic transmission system*, In International Conference on Computer and Communication Engineering ICCCE, ISBN: 978-1-4673-0478- 8, July 2012.
- [SUZ94] Suzuki M., Edagawa N., Taga H., Tanaka H., *10 Gb/s, over 12200 km soliton data transmission with alternating-amplitude solitons*, In Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 6, Issue: 6, ISSN: 1041-1135, June 1994.

- [TAG96] Taga H., *Long distance transmission experiments using the WDM technology*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, Issue: 6, pp.1287-1298, ISSN: 0733-8724, June 1996.
- [TAK03] Takaki K., Kise T., Maruyama K., Yamanaka N. H. K., Funabashi M., Kasukawa A., *High-Power CW-DFB LDs for Optical Communications*, In Furukawa Review, No. 23 2003.
- [TOM97] M. Tomizawa, Y. Yamabayashi, K. Murata, T. Ono, Y Kobayashi, K. Hagimoto, *Forward Error Correcting Codes in Synchronous Fiber Optic Transmission Systems*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 15, No. 1, January 1997.
- [TOT12] Tottori Y., Kobayashi T., Watanabe M., *Low loss optical connection module for 7-core multi-core fiber and seven single mode fibers*, In Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 24, Issue: 21, September 2012.
- [WIN06] Winzer P.J., Essiambre, R., *Advanced Optical Modulation Formats*, In Proceedings of the IEEE, Vol. 94, Issue: 5, ISSN:0018-9219, May 2006.
- [WUM14] Wu M., Han D., Zhang X., Zhang F., Zhang M., Yuel G., *Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems*, In Optics Express, Vol. 22, No. 5, February 2014.
- [XIE04] Xie Ch., Möller L., Ryf R., *Improvement of Optical NRZ- and RZ-Duobinary Transmission Systems With Narrow Bandwidth Optical Filters*, In IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 9, September 2004.
- [XIO00] Xiong F. G., *Digital Modulation Techniques*, Artech House, 2000 INC., pp. 23-234, ISBN 0-89006-970-0.
- [XUC03] Xu Ch., Liu X., Mollenauer L. F., Wei X., *Comparison of Return-to-Zero Differential Phase-Shift Keying and ON-OFF Keying in Long-Haul Dispersion Managed Transmission*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 4, April 2003.
- [XUC04] Xu Ch., Liu X., Wei X., *Differential Phase-Shift Keying for High Spectral Efficiency Optical Transmissions*, In IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 10, No. 2, April 2004.
- [YUC06] Yu Ch., Xu L., Ip E., Ji N. P., Wang T., *Comparison of Modulation Formats for 40- Gbit/s DWDM Optical Fiber Transmission Systems with 50-GHz*

Channel Spacing, In Sarnoff Symposium, 2006 IEEE, ISBN: 978-1-4244-0002-7, March 2006.

[YUJ03] Yu J., Kwon I., Oh K., *Analysis of Brillouin frequency shift and longitudinal acoustic wave in a silica optical fiber with a triple-layered structure*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, No. 8, August 2003.

Zoznam publikácií autora

Kapitoly vo vedeckých monografiách vydané v zahraničných vydavateľstvách

1. RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (50%). Simulation Tools for Broadband Passive Optical Networks. In *Simulation Technologies in Networking and Communications: Selecting the Best Tool for the Test*. 1. ed. New York : CRC Press, Taylor and Francis Group, 2015, s. 337-364. ISBN 978-1-4822-2549-5

Vedecké práce v ostatných recenzovaných zahraničných časopisoch

1. ČERTÍK, Filip(100%). Utilization of Encoding Techniques at the Signal Transmission in the Optical Fiber. In *Advances in Signal Processing*. Vol. 3, No. 2 (2015), pp. 17 - 24. ISSN 2332-6883
2. ŠALÍK, Pavol - ČERTÍK, Filip(35%) - RÓKA, Rastislav. Duobinary modulation format in optical communication systems. In *Advances in Signal Processing*. Vol. 3, No. 1 (2015), pp. 1-7. ISSN 2332-6883
3. RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip(50%). Modeling of Environmental Influences at the Signal Transmission in the Optical Transmission Medium. In *International Journal of Communication Networks and Information Security*. Vol. 4, No. 3 (2012), pp.146-162. ISSN 2073-607X

Odborné práce v ostatných zahraničných časopisoch

1. ČERTÍK, Filip(100%). The Simulation of advanced modulation techniques and their resistance to the polarization mode dispersion PMD. In *Elektrorevue*, ISSN 1213-1539.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

1. ČERTÍK, Filip (50 %) - RÓKA, Rastislav. Simulation and Analysis of the Signal Transmission in the Optical Transmission Medium. In *SIMULTECH 2015*, July 21-23, 2015. Colmar, Alsace, France
2. ČERTÍK, Filip (50 %) - RÓKA, Rastislav. Nonlinear SPM and XPM effects and their influence on optical signals utilized different modulation techniques in WDM transmission systems. In *Optical Communications 2014 : 26th conference and*

exhibition. Prague, Czech Republic, October 23-24, 2014. Prague : Action M, 2014, pp. 28-33. ISBN 978-80-86742-39-7

3. ČERTÍK, Filip (50 %) - RÓKA, Rastislav. The Nonlinear FWM Effect and its Influence on Optical Signals Utilized Different Modulation Techniques in the WDM Transmission Systems. In *Optické komunikace 2012 : 24th Conference and Exhibition on Optical Communications 2012. Prague, Czech Republic, October 25-26, 2012. Prague : Action M, 2012, pp. 20-25. ISBN 978-80-86742-36-6*

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

1. ČERTÍK, Filip (100 %). The simulation of different encoding and modulation techniques utilized in optical transmission system. In APCOM 2015, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovak Republic, June 24-26.
2. RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (50 %). Modeling of Nonlinear Influences at the 2-state Modulated Signal Transmission in the Optical Transmission. In APCOM 2015, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovak Republic, June 24-26
3. ŠALÍK, Pavol - RÓKA, Rastislav – ČERTÍK (35 %), Filip. Digitálne modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2014, ELOSYS. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 43-47. ISSN 1335-2547*
4. ŠALÍK, Pavol - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (35 %). Digitálne modulačné formáty v opticom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2014 [elektronický zdroj]: Zborník vybraných prác 2014, Bratislava, 29. apríl 2014. 1. vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, CD-ROM, s. 347-352. ISBN 978-80-227-5154-5*
5. ŠALÍK, Pavol - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (35 %). Modulačný formát DUOBINARY v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2013 [elektronický zdroj]: Zborník vybraných prác, Bratislava, 23. apríl 2013. 1. vyd. Bratislava : FEI STU, 2013, s.CD ROM, s. 396-401. ISBN 978-80-227-3909-2*
6. ČERTÍK, Filip (100 %). The Propagation of 10 Gbit/s OOK Modulated Signal via SM Optical Fiber. In *RTT 2013. Research in Telecommunication Technology [elektronický zdroj] : 15th International Conference. Senec, Slovak Republic, September 11-13, 2013. 1. vyd. Bratislava : FEI STU, 2013, s.CD-ROM, s. 96-101. ISBN 978-80-227-4026-5*

7. ČERTÍK, Filip (100 %). The Propagation of Higher Modulated Formats Via Single Mode Optical Fiber. In *RTT 2013. Workshop popri konferencii Research in Telecommunication Technology [elektronický zdroj] : Proceedings; Senec, Slovak Republic, September 11-13, 2013*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD ROM, p. 71-82. ISBN 978-80-227-4025-8
8. ČERTÍK, Filip (100 %). Using Matlab Tools for Simulation of the optical Transmission Medium. In *Technical Computing Bratislava 2012 [elektronický zdroj] : 20th Annual Conference Proceedings. Bratislava, 7.11. 2012*. Bratislava : RT Systems, 2012, s.CD-ROM, [8] s. ISBN 978-80-970519-4-5
9. ČERTÍK, Filip (50 %) - RÓKA, Rastislav. Analysis of Modulation Techniques Utilized in the Optical Transmission Medium. In *Elektro 2012 : 9th International Conference, May 21-22, 2012, Žilina - Rajecké Teplice*. Žilina : Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita, 2012, s.30-35. ISBN 978-1-4673-1178-6
10. ČERTÍK, Filip (25 %) - MOKRÁŇ, Martin - ŠPIRKOVÁ, Miroslava - RÓKA, Rastislav. Modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2012 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác, Bratislava, 25. apríl 2012*. Bratislava : FEI STU, 2012, s.CD-ROM, s. 512-517. ISBN 978-80-227-3697-8
11. ČERTÍK, Filip (50 %) - RÓKA, Rastislav. Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011*. Roč. 17, mimoriadne č (2011), s.42-45. ISSN 1335-2547
12. ČERTÍK, Filip (50 %) - RÓKA, Rastislav. Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011*. Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2011, s.590-595. ISBN 978-80-227-3508-7

Skriptá a učebné texty

1. KOTULIAKOVÁ, Kvetoslava - TRNOVSKÝ, Tibor - KOŽIČKA, Róbert - ČÍŽ, Pavol - DODEK, Dušan - ČERTÍK, Filip(10%) - DVORSKÝ, Peter. *Metódy modelovania komunikačných funkcií II. Riadenie toku*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2011. CD-ROM [61 s. ISBN 978-80-227-3521-6

Rôzne publikácie a dokumenty, ktoré nemožno zaradiť do žiadnej z predchádzajúcich kategórií

1. ČERTÍK, Filip(100%). Advanced Modulation Techniques and their Resistance to the Polarization Mode Dispersion PMD. In *KTTO 2013. Knowledge in Telecommunication Technologies and Optic : 13th International Conference. Hradec nad Moravicí, Czech Republic, September 4-6, 2013*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, 2013, s. 15

Riešené výskumné úlohy

1. VEGA 1/0106/11 - Analysis and proposal for advanced optical access networks in the NGN converged infrastructure utilizing fixed transmission media for supporting multimedia services, zodpovedný riešiteľ: doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.
2. KEGA039STU-4/2013 - Utilization of Web-based Training and Learning Systems at the Development of New Educational Programs in the Area of Optical Transmission Media, zodpovedný riešiteľ: doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.
3. PPMV 1325PS/2014 -Advanced Optical Signal Processing Techniques, zodpovedný riešiteľ: Ing. Filip Čertík

Príloha Parametre SMF vlákna G.652:

General Parameters

Reference Standard	ITU-T G.652.B
Fiber Type	Standard Single-Mode
Refractive Index Profile	Matched-Clad, Step-Index

Dimensional Parameters

Fiber Coating	Dual-Layer Acrylate
Cladding Diameter	$125 \pm 0.7 \mu\text{m}$
Outer Coating Diameter	$245 \pm 5 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$\leq 0.5 \mu\text{m}$
Cladding Non-Circularity	$\leq 1\%$
Fiber Curl	$\geq 2.0\text{m}$ radius

OTDR Settings

IOR @ 1310 nm	1.467
IOR @ 1550 nm	1.468

Optical Parameters

Mode Field Diameter @ 1310 nm	$9.2 \pm 0.4 \mu\text{m}$
Mode Field Diameter @ 1550 nm	$10.4 \pm 0.5 \mu\text{m}$
Cabled Cut-off Wavelength	$\leq 1260 \text{ nm}$
Zero Dispersion Wavelength (λ_0)	$1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$
Dispersion (1285-1330 nm)	$\leq 3.5 \text{ ps}/(\text{nm}^*\text{km})$
Dispersion (1550 nm)	$\leq 18.0 \text{ ps}/(\text{nm}^*\text{km})$
Zero Dispersion Slope	$\leq 0.092 \text{ ps}/(\text{nm}^2*\text{km})$
Attenuation (α) vs. Wavelength	
1285 nm to 1330 nm	$\alpha_{1310} \pm 0.05 \text{ dB/km}$
1525 nm to 1575 nm	$\alpha_{1550} \pm 0.05 \text{ dB/km}$
Attenuation at Water Peak (1383 nm)	$\leq 1.0 \text{ dB/km}$
Point Discontinuity	$\leq 0.08 \text{ dB}$
Attenuation with Bending	
1 turn on a 32mm mandrel	$\leq 0.05 \text{ dB @ } 1550 \text{ nm}$
100 turns on a 50mm mandrel	$\leq 0.05 \text{ dB @ } 1550 \text{ nm}$
PMD Coefficient	
Max. Value in uncabled fiber	$\leq 0.2 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$
Link Design Value	$\leq 0.08 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$