

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

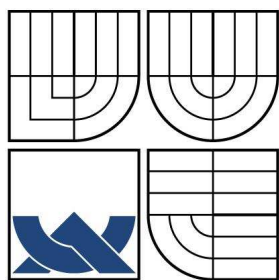
DISPERZNÍ VLIVY OPTICKÝCH VLÁKEN NA MULTIPLEXNÍ PŘENOSY

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

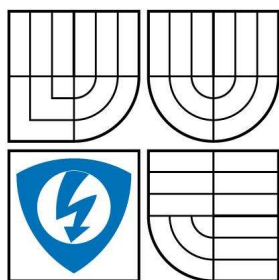
Ing. MARTIN KYSELÁK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologií

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DISPERZNÍ VLIVY OPTICKÝCH VLÁKEN NA MULTIPLEXNÍ PŘENOSY

THE OPTICAL FIBRE DISPERSION EFFECTS ON MULTIPLEX TRANSMISSION SYSTEMS

DOKTORSKÁ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. MARTIN KYSELÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2008

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mě jakkoli podporovali a byli nápomocni ve výzkumu týkajícího se tématu mé disertační práce, a také těm, kteří mi v rámci řešení svých vědecko-výzkumných či studijních aktivit byli jakkoli nápomocni s ověřováním vybraných principů publikovaných v této práci.

Zejména rád děkuji svému školiteli Doc. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za příkladné odborné vedení v oblasti mého doktorského studia a to především za cenné rady, studijní materiály a připomínky, které mi k tématu mé disertační práce poskytl. Ze studentů, kteří v rámci svých studijních či vědecko-výzkumných aktivit přispěli zejména k ověřování některých principů publikovaných v této práci, děkuji zejména Ing. Petru Dorociakovi a Ing. Liboru Krejčovi.

Společnosti PROFiber Networking CZ s.r.o. (Mezi Vodami 205/29, 143 00 Praha 4), Ing. Petru Kormaňákovi, děkuji za laskavé poskytnutí výstupů měřicího přístroje FTB 5500B a společnosti EXFO Electro-Optical Engineering Inc. (400 Godin Avenue, Quebec, Kanada) děkuji za laskavé poskytnutí EXFO ToolBoxu verze 6.

Za finanční podporu mého výzkumu pak děkuji zejména agentuře FRVŠ, která jej podporovala v rámci projektu 714/2007/G1 Měření chromatické a polarizační vidové disperze a její začlenění do výuky.

Mé manželce Martině děkuji za obětavý přístup a toleranci k mému vědeckému úsilí.

Tato práce vznikala v letech 2006-2008 na Ústavu telekomunikací Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Děkuji tedy celému ústavu za veškerou podporu a pracovní podmínky, které vedly k úspěšnému dokončení mého výzkumu i práce.

ABSTRAKT

Prezentovaná práce se zabývá současným trendem zvyšování přenosových rychlostí optických vláken s využitím vlnových multiplexů. S novými trendy vyvstávají nové teoretické a praktické problémy. Kromě známé vidové disperze existují problémy způsobené chromatickou a polarizační vidovou disperzí. V úvodu práce jsou proto postupně představeny všechny dnes známé jevy negativně ovlivňující signál přenášený optickým vláknem. Zvláštní pozornost je věnována jevu polarizační vidové disperze.

V rámci disertační práce byl naprogramován statistický kalkulátor využívající výpočetní metodu Monte Carlo pro vyhodnocení naměřených hodnot diferenciálního grupového zpoždění. Dalším významným výsledkem disertační práce je projekční aplikace, jež může sloužit k výuce a projektování různých typů optických tras. Zahrnuje vliv útlumu, chromatické a polarizační vidové disperze na optický signál. Polarizační vidovou disperzi lze matematicky jednoznačně definovat pomocí Jonesových a Stokesových matic a též v Poyntingově prostoru. Tyto složité matematické operace byly zmechanizovány a jako simulační aplikace umožňující vyhodnotit vlivy PMD u multiplexních systémů dovolují simulovat jejich význam při měnících se vstupních parametrech. Práce následně obsahuje kompletní studii vlivu modulačních formátů na PMD s výsledky získanými simulacemi a ověřenými srovnáním s výstupy jiných vědců. Zvláště cenná jsou závěrečná praktická ověření výsledků, kterých bylo dosaženo zejména díky možnosti použít měřicí přístroje FTB-5500B.

ABSTRACT

This doctoral thesis deals with present trend to turn up the bit rate of the optical fibres making use of wavelength multiplex systems. There are new theoretical and practical problems caused by the new technologies. Except the known modal dispersion there exist problems caused by chromatical and polarization mode dispersion. In the opening of the thesis the known effects, which influence the payload signal, are introduced. The polarization mode dispersion has the main attention.

Within the scope of this thesis there has been programmed the statistical calculator which can analyses the measured values of differential group delay by Monte Carlo calculation. Next meaningful output is the designating application of the optical routes. It is possible to mathematically unambiguously define the polarization mode dispersion by Jones, Stokes and Poynting vectors. This complicated calculations are mechanized and in the simulation application make possible to simulate the signification of the PMD influence at different input parameters. The thesis includes the study of the PMD modulation format impact with the results of simulations and confrontation with other scientists results. The significant output are the final practical results examinations, which can be implemented thanks to the possibility of using the FTB-5500B measuring device.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
ASK	Amplitude Shift Keying
AWGN	Additive white Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
CD	Chromatic Dispersion (chromatická disperze)
DB	Dual Band
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DGD	Differential Group Delay
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex (hustý vlnový multiplex)
FBG	Fibre Bragg gratings
FTB	Fiber Termination Box
FWM	Four-Wave Mixing (čtyřvlnné směšování)
GUI	Graphical User Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
IR	Infrared Light
ITU	International Telecommunication Union
JME	Metoda analýzy vlastních čísel Jonesovy matice
LWP	Low Water Peak
MM	Multi Mode Fiber (mnohavidové optické vlákno)
MPMD	Momentka polarizační vidové disperze
NA	Numerical Aperture (numerická apertura)
NLSE	Non-Linear Schrödinger Equation
NRZ	Non Return to Zero
NZDF	Nonzero Dispersion-shifted Fiber
OOK	On Off Keying
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PMD	Polarization Mode Dispersion (polarizační vidová disperze)
PMDC	Polarization Mode Dispersion Compensator
POTDR	Polarimetric Optical Time Domain Reflectometry
PSK	Phase Shift Keying
PSP	Principal State of Polarization
RZ	Return to Zero
SM	Single Mode Fiber (jednovídné optické vlákno)
SNR	Signal to Noise Ratio
SOPMD	Second Order Polarization Mode Dispersion
SPM	Self-Phase Modulation (vlastní fázové modulace)
SSFM	Split Step Fourier Method
UV	Ultraviolet Light
WDM	Wavelength Division Multiplex
XPM	Cross-Phase modulation (křížová fázová modulace)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1.	Ztráty ohybem u optického vlákna.	15
Obr. 1.2.	Rozložení vektoru Elektrického pole do dvou polarizačních stavů.....	20
Obr. 1.3.	Maxwellovo rozložení DGD.....	21
Obr. 1.4.	Amplitudová modulace (ASK).	30
Obr. 1.5.	Konstelční diagram amplitudové modulace (ASK).	30
Obr. 1.6.	Diferenční dvojstavová fázová modulace (DBPSK).	31
Obr. 1.7.	Konstelční diagram diferenční dvojstavové fázové modulace (DBPSK).	31
Obr. 1.8.	Konstelční diagram diferenční čtyřstavové fázové modulace (DQPSK)..	32
Obr. 1.9.	Unipolární a bipolární NRZ a RZ.	33
Obr. 1.10.	Vznik diagramu oka.....	33
Obr. 1.11.	Souvislost Q-faktoru v diagramu oka.	34
Obr. 1.12.	Hustota pravděpodobnosti BER.....	36
Obr. 1.13.	SNR v diagramu oka.....	38
Obr. 1.14.	Pokles diagramu oka (Power Penalty).	38
Obr. 1.15.	Závislost Power Penalty na $\langle DGD \rangle$ pro různé druhy modulací.	40
Obr. 2.1.	Původní schématický diagram simulace v prostředí MATLAB.....	42
Obr. 2.2.	CD Analyzer – FTB-5500B (vpravo) a PMD Analyzer – FTB-5800.	43
Obr. 3.1.	Hlavní záložka statistické metody Monte Carlo.	48
Obr. 3.2.	Podzáložka s výpočty u JME metody.	49
Obr. 3.3.	Návrh trasy.....	51
Obr. 3.4.	Ukázka grafu závislosti úrovně na délce optické trasy.....	52
Obr. 3.5.	Ukázka grafu závislosti velikosti PMD na délce optické trasy.	52
Obr. 3.6.	Impuls bez PMD při $P_0 = 1$ mW (vlevo) a při $P_0 = 50$ mW (vpravo).	54
Obr. 3.7.	Diagram oka $D_{PMD} = 1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$ (vlevo) a $D_{PMD} = 3$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$	55
Obr. 3.8.	Diagram oka odpovídající 40 Gb/s a RZ kódování, $D_{PMD}=1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$	55
Obr. 3.9.	Výsledek přenosu pulsů na blízkých vlnových délkách, $P_0=1$ mW.	56
Obr. 3.10.	Výsledek přenosu pulsů na blízkých vlnových délkách, $P_0=50$ mW.	56
Obr. 3.11.	Graf závislosti PMD na délce vlákna při přenosové rychlosti 80 Gb/s.	58
Obr. 3.12.	Maxwellovy křivky pro různé hodnoty PMD.....	59
Obr. 3.13.	Výstup aplikace MPMD, modře znázorněn vznik PMD.	60
Obr. 3.14.	Obecný případ pokles hodnoty SNR v závislosti na DGD.....	65
Obr. 3.15.	Blokové schéma zapojení modelu NRZ-OOK.	66
Obr. 3.16.	Nastavované parametry bloku Bipolar to Unipolar Converter.	66
Obr. 3.17.	Nastavované parametry bloku Raised Cosine Transmit Filter.	66
Obr. 3.18.	Blokové schéma zapojení modelu RZ-OOK.	67
Obr. 3.19.	Blokové schéma zapojení modelu NRZ-DBPSK.	68
Obr. 3.20.	Nastavované parametry bloku DBPSK Modulator Baseband.	68
Obr. 3.21.	Blokové schéma zapojení modelu RZ-DBPSK.....	68
Obr. 3.22.	Blokové schéma zapojení modelu NRZ-DQPSK.....	69
Obr. 3.23.	Blokové schéma zapojení modelu RZ-DQPSK.....	69
Obr. 3.24.	Závislost L_{max} na PMD a přenosové rychlosti pro $L_2 = 100$ km.....	71
Obr. 3.25.	Pokles SNR u NRZ-OOK modulace pro $L_2 = 100$ km (G.655.B).....	72
Obr. 3.26.	Pokles SNR u NRZ-OOK modulace pro $L_3 = 1000$ km (G.655.B).....	73
Obr. 3.27.	Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DQPSK, G.655.B.	76
Obr. 3.28.	Shrnutí všech druhů modulací	77
Obr. 3.29.	Porovnání závislosti Power Penalty s výsledky Jina Wanga.....	78
Obr. 3.30.	Porovnání výsledků modulací s prací autora Dr. Klause Grobe.....	78

Obr. 3.1.	Náhled kitu PMD Analyzer Version B pro první vlákno na trase A.	81
Obr. 3.2.	Graf závislosti intenzity [%] na zpoždění [ps], vlákno 1, trasa A.	82
Obr. 3.3.	Graf závislosti intenzity [%] na zpoždění [ps], vlákno 6, trasa B.	82
Obr. 3.4.	Graf závislosti intenzity [%] na zpoždění [ps], vlákno 8, trasa C.	82
Obr. B.1.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-OOK pro L2 = 100 km (G.655.B).....	90
Obr. B.2.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-OOK pro L3 = 1000 km (G.655.B).....	90
Obr. B.3.	Pokles hodnoty SNR u RZ-OOK pro L2 = 100 km (G.655.B).	91
Obr. B.4.	Pokles hodnoty SNR u RZ-OOK pro L3 = 1000 km (G.655.B).	91
Obr. B.5.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-DBPSK pro L2 = 100 km (G.655.B).	92
Obr. B.6.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-DBPSK pro L3 = 1000 km (G.655.B).	92
Obr. B.7.	Pokles hodnoty SNR u RZ-DBPSK pro L2 = 100 km (G.655.B).	93
Obr. B.8.	Pokles hodnoty SNR u RZ-DBPSK pro L3 = 1000 km (G.655.B).	93
Obr. B.9.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-DQPSK pro L2 = 100 km (G.655.B).	94
Obr. B.10.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-DQPSK pro L3 = 1000 km (G.655.B).	94
Obr. B.11.	Pokles hodnoty SNR u RZ-DQPSK pro L2 = 100 km (G.655.B).....	95
Obr. B.12.	Pokles hodnoty SNR u RZ-DQPSK pro L3 = 1000 km (G.655.B).....	95
Obr. B.13.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-OOK pro L3 = 1000 km (G.652.D).	96
Obr. B.14.	Pokles hodnoty SNR u RZ-OOK pro L3 = 1000 km (G.652.D).	96
Obr. B.15.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-DBPSK pro L3 = 1000 km (G.652.D).	97
Obr. B.16.	Pokles hodnoty SNR u RZ-DBPSK pro L3 = 1000 km (G.652.D).....	97
Obr. B.17.	Pokles hodnoty SNR u NRZ-DQPSK pro L3 = 1000 km (G.652.D).....	98
Obr. B.18.	Pokles hodnoty SNR u RZ-DQPSK pro L3 = 1000 km (G.652.D).....	98
Obr. C.1.	Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-OOK, G.655.B.....	99
Obr. C.2.	Diagram oka a konstelační diagram u RZ-OOK, G.655.B.....	100
Obr. C.3.	Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-DBPSK, G.655.B.....	101
Obr. C.4.	Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DBPSK, G.655.B.....	102
Obr. C.5.	Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-DQPSK, G.655.B.....	103
Obr. C.6.	Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DQPSK, G.655.B.	104
Obr. D.1.	Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-OOK, G.652.D.....	105
Obr. D.2.	Diagram oka a konstelační diagram u RZ-OOK, G.652.D.....	105
Obr. D.3.	Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-DBPSK, G.652.D.....	106
Obr. D.4.	Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DBPSK, G.652.D.	106
Obr. D.5.	Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-DQPSK, G.652.D.	107
Obr. D.6.	Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DQPSK, G.652.D.	107

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1.	Doporučení ITU a limity PMD.....	28
Tab. 1.2.	Počet částí signálového prvku T_{sp} pro různé modulace.	39
Tab. 1.3.	Hodnoty bezrozměrného parametru I.	39
Tab. 2.1.	Specifikace přístroje FTB-5500B.	44
Tab. 3.1.	Srovnání délek vlákna pro různé hodnoty PMD a přenosovou rychlost. ...	57
Tab. 3.2.	Přehled typů modulací v programu.....	61
Tab. 3.3.	Hodnoty DGD zpoždění pro zadané délky vlákna G.655.B.....	71
Tab. 3.4.	Hodnoty DGD pro zadané délky vlákna G.652.D.	71
Tab. 3.5.	Hodnoty SNR při DGD u NRZ-OOK modulace (G.655.B).....	73
Tab. 3.6.	SNR pro vypočtené hodnoty DGD pro délky vláken 1000 km.	74
Tab. 3.7.	SNR pro vypočtené hodnoty DGD pro délky vláken 100 km.	74
Tab. 3.8.	Vliv modulace na pokles diagramu oka (Power Penalty).....	75
Tab. 3.9.	Porovnání modulací s výsledky práce Dr. Klause Grobe.	79
Tab. 4.1.	Přehled vláken a tras měřených přístrojem FTB-5500B.	80
Tab. 4.2.	Výstupy z měření přístrojem FTB-5500B.	82
Tab. 4.3.	Přehled teoretických přenosových rychlostí.	83

Poděkování.....	2
Abstrakt.....	3
Abstract.....	3
Seznam použitých zkratk	4
Seznam obrázků.....	5
Seznam tabulek.....	7
Obsah	8
Úvod.....	10
1. Přehled současného stavu problematiky	11
A. Úvod.....	11
B. Přehled lineárních a nelineárních negativních jevů	11
– Útlum	11
– Disperze	16
– Nelineární jevy.....	18
C. Polarizační vidová disperze	20
– Vliv na optickou síť	21
– Možné způsoby omezení významu PMD	22
D. Matematické vyjádření PMD.....	23
– Stokesův a Jonesův prostor.....	24
– Poyntingův prostor.....	26
E. Současné techniky plánování optických tras	28
F. Optické modulační formáty	29
– Amplitudová modulace (ASK)	29
– Fázová modulace (PSK)	30
– NRZ (Non Return to Zero) a RZ (Return to Zero)	32
G. Diagram oka.....	33
– Vznik diagramu oka.....	33
– Q-faktor.....	34
– Bitová chybovost kanálu (BER)	35
– Odstup signálu od šumu (SNR)	37
– Pokles diagramu oka (Power Penalty)	38
2. Cíle disertační práce.....	41
A. Projekční aplikace.....	41
B. Vliv použitého modulačního formátu	42
C. Praktické ověřování výsledků	42
D. Shrnutí.....	44
3. Přehled dosažených výsledků	46
A. Výpočet PMD statistickou metodou Monte Carlo.....	46
– Výsledek	47
– Závěr	49
B. Návrhová aplikace	49
– Výsledek	50
– Závěr	53
C. Simulační aplikace	53

– Vyhodnocení vlivu PMD u multiplexních systémů.....	53
– Omezení vlivu PMD u multiplexních systémů.....	57
– Aplikace Momentka PMD	59
D. Vliv modulačních formátů na PMD.....	61
– Realizace aplikace.....	61
– Schémata zapojení simulovaných modulací	65
– Výsledky simulací.....	69
– Shrnutí výsledků	75
– Ověření dosažených výsledků	77
– Závěr	79
4. Praktické ověření výsledků	80
– Výsledky	80
– Diskuse k výsledkům	83
5. Závěr	84
Literatura.....	86
Seznam použité literatury	86
Seznam vlastních prací	87
PŘÍLOHY	89
A. Blokové schéma algoritmu programu “Modulační formáty“	89
B. Grafy poklesu hodnot SNR pro jednotlivé modulační formáty	90
C. Diagramy oka a konstelační diagramy, vlákno G.655.B	99
D. Diagramy oka a konstelační diagramy, vlákno G.655.D	105
Curriculum vitae	108

Obsah přiloženého CD disku:

Aplikace 1 „Výpočet PMD“

Aplikace 2 „Projekční aplikace“

Aplikace 3a „Simulace NLSE“

Aplikace 3b “Simulace WDM”

Aplikace 3c „Simulace PMD”

Aplikace 4 “Modulační formáty”

Protokoly z měření přístrojem FTB-5500B ve formátu PDF

Náměry z měření přístrojem FTB-5500B ve formátu PMDB

ÚVOD

Věda již dokázala vyřešit problémy s prvotním vysokým útlumem vláken. Novými technologiemi výroby se podařilo odstranit vlivy vidové disperze a použitím kompenzačních vláken a vláken s upravenou disperzní charakteristikou je v podstatě vyřešena disperze chromatická. Pokud však přenosová rychlost jednoho kanálu přesáhne určitou mez, začne nabývat na významu dosud nevyřešený jev zvaný polarizační vidová disperze (Polarization Mode Dispersion - PMD), jemuž především je tato práce věnována.

Tato disertační práce přináší ve své první části soupis všech negativních jevů působících na signál přenášený optickým vláknem. Velká pozornost je věnovaná právě polarizační vidové disperzi a dále teorii, která byla nutně použita při řešení zadané problematiky. Jedná se zejména o přehled ve vláknové optice používaných modulačních formátů, teorii chybovosti a diagramu oka.

Následuje soupis cílů disertační práce a vlastní řešení, které je obsaženo v kapitole „Přehled dosažených výsledků“. Postupně jsou představovány výsledky práce a dílčí závěry, někdy teoretické, ale častěji podložené důkazy převážně v podobě výstupů softwarových aplikací či simulací a jejich vzájemným srovnáváním. Některé domněnky jsou podloženy i praktickým měřením na různých optických trasách. Tato měření byla provedena díky společnosti PROFiber Networking CZ s.r.o. použitím profesionálního měřicího přístroje FTB-5500B. Dosažené výsledky práce popisují nejprve ucelený soubor aplikací umožňující jev PMD cíleně simulovat, studovat princip jeho vzniku a měřit jeho dopad na přenášený signál. Součástí je i poloprofesionální aplikace, která umožňuje projektovat optickou trasu se zahrnutím jevu PMD.

Nejobsáhlejší částí je subkapitola D kapitoly 3 „Vliv modulačních formátů na PMD“, ve které je představena kompletní studie s výsledky získanými simulacemi a ověřenými srovnáním s výstupy jiných vědců. Přehledná obrazová dokumentace je uvedena odděleně v přílohách A, B, C a D.

1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

A. Úvod

Práce je zaměřena na současný trend zvyšování přenosových rychlostí optických vláken s využitím vlnových multiplexů. S novými trendy vyvstávají nové teoretické a praktické problémy. Kromě známé vidové disperze existují problémy způsobené chromatickou a polarizační vidovou disperzí. V úvodu práce jsou proto postupně představeny všechny dnes známé jevy negativně ovlivňující signál přenášený optickým vláknem. Zvláštní pozornost je věnována jevu PMD a následně teorii užitou v kapitole 3.

B. Přehled lineárních a nelineárních negativních jevů

V literatuře je často velmi obtížné získat ucelený přehled negativních jevů optického vlákna na přenášený signál. Pro další výzkum bylo nutno shrnout všechny negativní jevy do přehledného souboru a stanovit tak priority při hledání možného způsobu optimalizace optických tras.

V následujících dvou podkapitolách jsou proto popsány nejvýznamnější druhy negativních jevů působících na optický trakt během přenosu. Jsou přehledně rozděleny do systematické struktury jejich kategorizací se základním rozdělením na lineární a nelineární jevy. Lineární jevy zahrnují jak vnitřní a vnější útlum, tak jednotlivé druhy disperzí i problematiku šumu. Fenomémem dnešní doby se stávají takzvané nelineární jevy, jejichž dopad je patrný zvláště při vysokých přenosových rychlostech, tedy při navázání vysokého výkonu do optického vlákna. Jsou zde popsány možné příčiny těchto jevů, přičemž jestliže je to technicky možné, vyplývá z uvedeného i možný způsob kompenzace, resp. vyrovnání ztrát ve vlnovodu. Popsaná doporučení vycházejí z praktických poznatků doplněných o doporučení ITU-T.

– **Útlum**

Podobně jako u metalického vedení také v optickém vlákně výkon signálu se vzdáleností od zdroje signálu postupně klesá. Útlum optického vlákna je udáván v dB/km a je definován jako poměr výstupního světelného výkonu P_2 a vstupního světelného výkonu P_1 pro danou vlnovou délku λ podle vztahu:

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{dB}]. \quad (1)$$

Útlum je celkovým měřítkem ztrát optické energie ve vlákně. Závisí na absorpci a rozptylu v jádře i plášti optického vlákna a je vidově závislý. Vyšší vid má větší útlum, a proto má také jednovidové vlákno (SM) nižší útlum než vlákno mnohavidové

(MM). Ztráty vznikají také náhodnými fluktuacemi příčných rozměrů vlákna, jeho mechanickým nebo tepelným namáháním [6].

Měrný útlum vlákna α představuje útlum na 1 km délky. Získáme jej ze vztahu (1) podělíme-li jej délkou vlákna L.

$$\alpha = \frac{A}{L} \quad [\text{dB/km}]. \quad (2)$$

Podle místa vzniku lze dále ztráty dělit na ztráty vytvořené vnitřním útlumem a vnějším útlumem. Vnitřní ztráty jsou ztráty způsobené útlumem vnitřním, tedy materiálová absorpce (vlastní a nevlastní) a materiálový rozptyl (Rayleighův, Mieův, Comptonův a Stokesův). Vnější útlum je pak důsledkem absorpcí na povrchových nečistotách a fluktuací na rozhraní, jimiž jsou difuzní odraz, geometrické a materiálové nehomogenity, ohybové ztráty (mikro- a makroohybové) a vazební ztráty vlastní (Fresnelův odraz, rozdílné průměry jader a plášťů, rozdílná numerická apertura - NA, rozdílné profilové parametry) a nevlastní (ztráty sousostí vláken, nerovnost ploch, znečištění).

Útlumu není v této práci věnovaná zvláštní pozornost, jelikož předmětem této práce jsou jevy disperzní.

Vlastní absorpce

Vlastní absorpce spočívá v pohlcení části optického záření vlastními molekulami materiálu optického vlákna [33]. Křemenný materiál vykazuje absorpční maxima jak v ultrafialové (UV), tak i v infračervené (IR) oblasti, tedy dvě dominantní absorpční pásma. V současné době jsou provozovány systémy v okolí tří vlnových délek 850, 1300, 1550 nm, tzv. okna. Tyto absorpce jsou velmi malé. Absorpční pás v UV oblasti spektra odpovídá elektronovým a elektronově-vibračním přechodům. S vlnovou délkou klesá a z technologického hlediska je to zatím neodstranitelný problém.

V IR oblasti pak jde o kmitání (vibrace) celých molekul skla, přičemž roste se zvětšující se vlnovou délkou. Omezuje tak použití optických vláken pro vlnové délky nad 1700 nm. Hodnotu absorpce lze částečně ovlivnit, a pokud jsou molekulové útvary těžší, světlo jej nedokáže rozkmitat. Toho je využito k posunutí IR absorpce k nižším vlnovým délkám a k dosažení nízké absorpce.

Nevlastní absorpce

Naprosté čistoty křemenného skla nelze prakticky dosáhnout, proto bude světlovod zpravidla více či méně znečištěn, které do vlákna pronikly při jeho výrobě a taktéž v důsledku špatně provedené vnější ochrany. Nevlastní absorpce je tak způsobena nečistotami, příp. dopanty přítomnými v optickém materiálu. Jde především o ionty kovů Fe, Cu, Cr a zejména radikálů OH⁻. [6]. Koncentrace iontů v obsahu SiO₂ musí být snížena na hodnotu 10⁻⁹, aby se dosáhlo výkonového útlumu pod 1 dB/km. V křemenných vláknech je minimum útlumu absorpcí a rozptylem situováno v oblasti 1,5 μm, kde jsou nejen menší ztráty Rayleighovým rozptylem, ale rovněž zde leží i minimum materiálové disperze.

Největší nevlastní absorpci má na svědomí zbytková vlhkost, která byla ve vláknu ponechána v průběhu výrobního procesu ve formě iontů OH^- , které ovlivňují na určitých vlnových délkách útlum vlákna. Čistota křemenného skla z hlediska iontů OH^- je tedy neobvykle důležitá. Proto jsou vyráběna vlákna s velkým nebo malým obsahem OH^- (ultra low, low, high a ultra high OH^-).

V současné době je trend vyrábět vlákna s nízkým obsahem OH^- , která jsou označována LWP (Low Water Peak). Tato vlákna mají špičku OH^- absorpce téměř neznatelnou a postupně se velmi prosazují.

Materiálový rozptyl

Materiálový rozptyl je způsoben nepravidelnostmi vznikajícími především při chladnutí skleněného vlákna. Náhodným rozložením (nehomogenitou) molekul ve skle vzniká náhodné rozložení hodnot indexu lomu (prostorová fluktuace). Po dopadu na nehomogenitu dochází k všesměrovému rozptylu, tedy paprsky se tříští do všech stran, čímž je část výkonu ztracena. Podíl rozptylu na celkovém útlumu je různý podle druhu skla, použité technologie a použitého výchozího materiálu.

V pásmu vlnových délek využívaných ve sdělování je typický silný pokles rozptylu s růstem vlnové délky, neboť amplituda rozptýleného pole je funkcí λ^{-2} a intenzita rozptýleného pole je funkcí λ^{-4} . Je tedy žádoucí pracovat na co nejdelší vlnové délce.

Rayleighův rozptyl

Jde o dominující jev v oknech optické komunikace (převážně ve spodní části absorpčního pásma). Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Je důsledkem malých náhodných mikrozměn ve vlákně, menších než vlnová délka, projevující se jako přídavný útlum vlákna. Rayleighův rozptyl je přímo úměrný osmé mocnině indexu lomu a klesá se čtvrtou mocninou vlnové délky.

Tento jev se nedá odstranit. Nelze jej odstranit dokonce ani podchlazením vlákna na absolutní nulu, protože při absolutní nule dojde k „zamrznutí“ jednotlivých pozic atomů v krystalické mřížce, ale světlo se pak kolem těchto útvarů ohýbá a vznikají ztráty rozptylem. Lze jej však částečně eliminovat posunem pracovní frekvence do IR oblasti (provozováním na vyšších vlnových délkách).

Mieův rozptyl

Vzniká na nehomogenitách ve vlákně, které jsou svými rozměry srovnatelné s vlnovou délkou. Rozptyl se významně zvyšuje, pokud geometrické nepravidelnosti překročí 1/10 vlnové délky světla. Tyto ztráty lze částečně eliminovat zdokonalením výrobního procesu vlákna, odstraněním nerovnoměrností při výrobě a pečlivým tažením vlákna a nanášením dalších vrstev.

Comptonův rozptyl

Comptonův rozptyl vychází ze změny frekvence fotonů při jejich pružných srážkách s elektrony v obalu atomů.

Stokesův rozptyl

Je důsledkem foton-fononové interakce v mikrokrystalech materiálu. Svou úrovní je tento barevný rozptyl charakteristický pro každý druh základního materiálu a tvoří minimální možnou hranici celkovému útlumu. Jeho hodnota závisí na λ^{-4} .

Společně s Comptonovým rozptylem jde principiálně o neodstranitelnou vlastnost všech opticky čistých látek.

Difuzní odraz

Difuzní odraz nastává na geometrických a materiálových nehomogenitách a vadách materiálu v oblasti odrazu nebo lomu optického záření, popřípadě pnutí materiálu, které odvádí energii z jádra vlnovodu a značně tlumí přenos. Každý dopadající světelný paprsek je odražen jako mnoho paprsků do různých směrů. Množství difuzně odraženého optického záření je určeno koncentrací bodových poruch v místě dopadu optického záření.

Geometrické a materiálové nehomogenity

Zde ztráty vznikají na makroskopických nehomogenitách. Především jde o makronečistoty, vzduchové bublinky, trhlinky v materiálu, dále poruchy tvaru a rozměrů hranice mezi jádrem a pláštěm, eliptičnost jádra či porušení dokonalé geometrie vlákna. Všechny tyto ztráty jsou zahrnuty v celkových ztrátách uvedených výrobcem a lze je podstatně omezit vhodnou technologií výroby vláken.

Mikroohybové ztráty

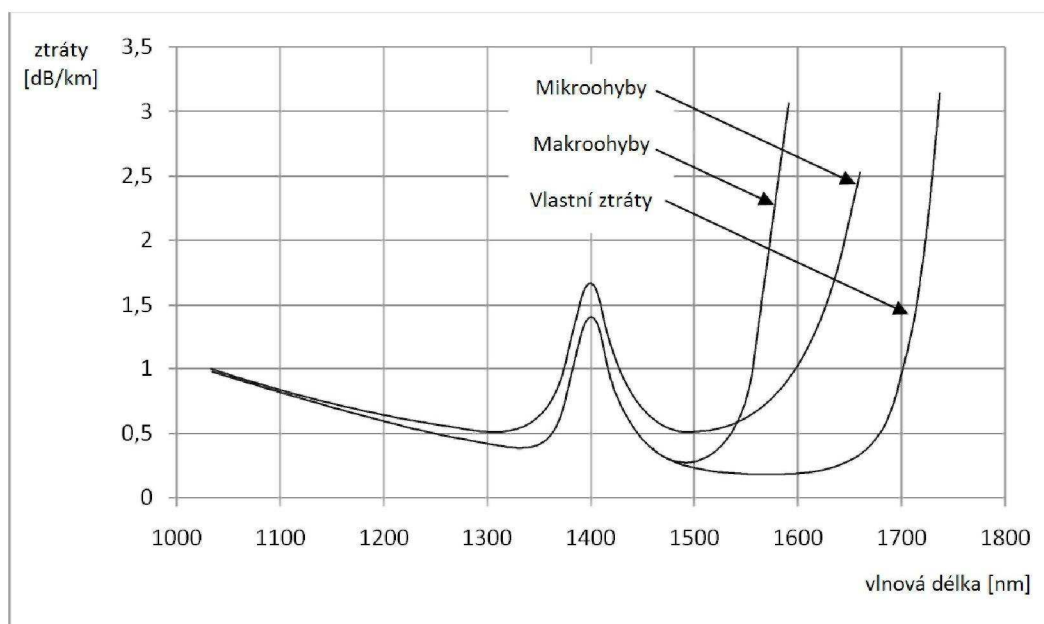
Mikroohyby jsou poruchy přímočarosti osy vlákna. Malé chyby v geometrii vlákna způsobují tzv. mikroohybové ztráty, které mohou vést k přelévání energie mezi sousedními vidy. Vznikají jak při výrobě, tak působením vnějších sil, které deformují plášť kabelu, ale způsobují pouze malý ohyb vlákna. Na mikroohybech jsou některé vidy odráženy pod velkým úhlem, unikají mimo jádro optického vlákna a mohou tak podstatně ovlivnit útlum vlákna [17]. Závisí na vlnové délce a se zvětšující se vlnovou délkou jsou ztráty větší. Počítají se velmi těžko, určují se experimentálně. Graf závislosti viz Obr. 1.1.

Snížení ztrát se docílí vhodným návrhem optického kabelu, který musí odpovídajícím způsobem chránit vlákno před vnějším namáháním, nepravidelným tlakem a podmínkami okolí. Proces nanášení vnějších ochranných vrstev vlákna musí být řádně kontrolován. Je nutné dodržovat pokyny výrobce a vlákno ohýbat s co největším poloměrem.

Makroohybové ztráty

Makroohyby jsou při praktickém použití vlákna běžné, ať již z důvodu připojení ke zdroji a detektoru nebo z důvodu nerovnosti trasy. Dojde-li k ohybu vlákna pod určitou mez poloměru křivosti, může se část energie z vlákna vyvázat (vyzářit) z vlákna ven, čímž se zvýší útlum. Projevují se také především útlumem na vyšších vlnových délkách.

Snížení makroohybových ztrát lze dosáhnout provozem systému ve vlákne na nižších vlnových délkách a navržením vlákna s velkou hodnotou relativní změny indexu lomu. Viz Obr. 1.1



Obr. 1.1. Ztráty ohybem u optického vlákna.

Fresnelův odraz

Uplatňuje se při navázání optického záření do optického vlákna, kdy se část optického záření odráží od čela vlákna a vrací se zpět k světelnému zdroji. Stejným způsobem se tento mechanismus ztrát uplatňuje na konci světlovodu [17].

Rozdílné průměry jader a plášťů

Mají-li spojovaná vlákna různě velký průřez jader, část paprsků dopadá na plášť následujícího vlákna a ztrácí se.

Rozdílná numerická apertura - NA

Spolu s průměrem jádra se veličina NA podílí na účinnosti vazby záření do jádra a má také souvislost s útlumem. Je-li numerická apertura přijímacího vlákna menší než numerická apertura zdrojového vlákna, nebude se část přijímaného světla vláknem šířit a vzniknou ztráty. Je zřejmé, že vazební účinnost světla do vláknového vlnovodu poroste s růstem průměru jádra a s růstem akceptačního úhlu. Ztráty způsobené rozdílností NA se snadno spočítají viz [17].

Ztráty souosostí vláken

Jedná se o ztráty způsobené nepřesností spojování vláken, přičemž dochází k posunutí os vláken a část paprsků není navázána do jádra navazujícího vlákna. Z toho vyplývá nutnost vysoké přesnosti při spojování vláken.

Jedná se o laterální nezarovnání vláken (posuv v ose x či y), separace v ose z (podélné nezarovnání vláken) a úhlové vyosení (úhel mezi osami jader vlákna).

Nerovnost ploch

Je nezbytně nutné zajistit, aby plochy spojovaných vláken byly opticky rovné. Taktéž je důležité, aby řez konce vlákna byl přesně pod úhlem 90° k ose vlákna, jinak dochází ke ztrátám vlivem úhlové odchylky os.

Znečištění

Přítomnost cizích znečišťujících látek ve spojení dvou vláken vede ke ztrátám lomem, odrazem, absorpcí a vlivem překážek pro šíření světla.

Ve všech případech tedy velikost numerické apertury a plochy jádra přímo ovlivňuje vazební účinnost a celkový navázaný výkon. Nejmarkantnější je tato situace u jednovidových vláken, kde je průměr jádra srovnatelný s délkou vlny záření λ . V takovém vláknu, které se současně vyznačuje nízkým útlumem i extrémně velkou šířkou pásma, lze dosáhnout jen velmi nízké vazební účinnosti. Zmíněné nevýhody odstraňuje vláknový optický vlnovod typu W s třívrstvou konstrukcí, v níž je mezi jádro a plášť vložena tenká nízkoindexová vrstva, která za určitých okolností může mít zápornou vlnovodovou disperzi [17]. Tím je možné dále vykompenzovat kladnou materiálovou disperzi ve velkém rozmezí vlnových délek. Lze tak dosáhnout šířky přenášeného pásma až 400 GHz/km i s např. luminiscenční diodou.

– Disperze

Disperze ovlivňuje časový průběh (odezvu) optického signálu, tj. přenosové vlastnosti. U digitálního systému se projevuje rozšířením optických pulsů při průchodu optickým vláknem, u analogového systému je to pak zmenšením frekvenční šířky modulačního signálu optické nosné. Výsledný rozšířený signál zasahuje svou šířkou do okolních bitů a přesahuje rozhodovací úroveň, následkem čehož vzniká tzv. mezisymbolová interference.

Všechny druhy disperzí se podílejí na rozšiřování přenášených impulsů (měřeno v časové oblasti).

Vidová disperze

Vidová disperze je dána časovou diferencí nejrychlejšího a nejpomalejšího vidu při jednom kmitočtu. Omezuje tak mezní šířku pásma či přenosovou rychlost nebo maximální dosah. Je charakteristická pro MM vlákna a úměrná délce vlákna L (pouze u dlouhých vláken je vidová disperze úměrná $L^{1/2}$).

Tento jev se projevuje především u dlouhých vláken impulsového provozu, při přenosu dat na větší vzdálenosti a omezuje počet impulsů, které mohou být za určitý časový interval vyslány. Vidová disperze je zmenšována uspořádáním vlákna, zejména použitím vláken s gradientní změnou indexu lomu. Vzhledem k tomu, že u jednovidových vláken vidová disperze neexistuje, byl odstraněn hlavní faktor omezující přenosovou rychlost v mnohovidových vláknech [17]. Typická hodnota pro vidovou disperzi stepindexových vláken je asi 20 ns/km, což odpovídá 3 dB.

Materiálová disperze $D_{MAT}(\lambda)$

Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu samotného materiálu vlákna na vlnové délce záření. Tím se každá vlnová délka materiálem šíří různě rychle, čímž se snižuje přenosová kapacita. Nenulová šířka spektra je však typickou vlastností optických signálů. Spektrální šířka světla polovodičového laseru je sice nepatrná, ale emisní diody zajišťují šířku 30-40 nm [17].

Materiálová disperze ovlivňuje také dobu průchodu jednotlivých vidů, což má částečný vliv na disperzi vidovou. Udává se v hodnotách časového rozptylu šíření daného vidu na 1 km délky vlákna a 1 nm šířky spektrální čáry [nm.s/km]. Nejmenších ztrát materiálovou disperzí je dosahováno pro křemenné sklo v oblasti 1,27 μm .

Vlnovodná disperze $D_{WG}(\lambda)$

Vychází ze závislosti skupinového zpoždění daného vidu na kmitočtu. Se změnou kmitočtu se mění v dané struktuře tvar podélného pole daného vidu [17]. Hlavní význam má v SM vláknech (jako fázové zkreslení signálu) a na vlnových délkách, kde je materiálová disperze malá (tj. kolem 1300 nm). Pro MM vlákna je tato disperze zanedbatelná, neboť většina vidů je mimo mezní vlnovou délku.

Ovlivňování vlnovodné disperze je možné prostřednictvím geometrické konstrukce vlákna (poloměru jádra nebo profilem indexu lomu). Tento parametr je vždy záporný, umožňuje nám tedy kompenzovat materiálovou disperzi, viz dále. Vlnovodná disperze způsobí časové zpoždění vlny s vyšší vlnovou délkou, naproti tomu materiálová disperze zpomalí vlnu s kratší délkou vlny. Tím se dá u každého materiálu nalézt kmitočtová oblast vzájemné kompenzace materiálové a vlnovodné disperze.

Profilová disperze $D_P(\lambda)$

Je dána závislostí profilu indexu lomu na vlnové délce záření a z toho plynoucí závislosti rychlosti šíření vlny na kmitočtu [17].

Profilová disperze je poměrně malá a projevuje se až u vysokých přenosových rychlostí. Dosahovaná hodnota je 0,5 ps/nm.km.

Chromatická disperze $D_{CH}(\lambda)$

Chromatická disperze vznikne součtem výše uvedených složek: materiálové, vlnovodné a profilové disperze,

$$D_{CH}(\lambda) = D_{MAT}(\lambda) + D_{WG}(\lambda) + D_P(\lambda). \quad [\text{ps}] \quad (3)$$

K snížení vlivu chromatické disperze na přenosový systém vede celá řada postupů. První možnost spočívá v aplikování tzv. podmínky nulové chromatické disperze, podle vztahu, který vychází ze záporné hodnoty vlnovodové disperze,

$$D_{MAT}(\lambda) + D_P(\lambda) = D_{WG}(\lambda). \quad [\text{ps}] \quad (4)$$

Vliv lze však též snížit vhodným výběrem zdroje záření, jelikož širší spektrální pološířka zdroje záření způsobuje větší roztažení impulsů vlivem chromatické disperze. Velmi používaný a vhodný je např. úzkospektrální DFB laser s externím modulátorem. V takovém případě bude spektrální pološířka samotného zdroje záření daleko menší, než spektrální šířka modulační přenášeného signálu. Další cestou jsou vlákna s různě změněnou spektrální charakteristikou koeficientu chromatické disperze. Jsou označována jako vlákna s nenulovou disperzí NZDF (Nonzero Dispersion-shifted Fiber, dle ITU-T G.655), plochou disperzní charakteristikou či kompenzační vlákna DCF (Dispersion Compensation Fiber) s vysokou hodnotou záporné chromatické disperze. Kompenzační vlákna DCF jsou nejpoužívanější, ale vnášejí útlum, speciálně na dlouhé vzdálenosti a zvyšuje účinky nelineárních jevů. Obdobně lze ke kompenzaci CD použít také vláknové Braggovské mřížky FBG (Fibre Bragg gratings). Ty se vyznačují velkou šířkou pásma, filtrují signál, zostřují spektrum, jsou laditelné a ekonomické.

Polarizační vidová disperze $D_{PMD}(\lambda)$

viz kapitola C

– **Nelineární jevy**

Tyto jevy vznikají při vysoké intenzitě světla vedeného vláknem a jsou značně omezující pro vysokorychlostní systémy.

Materiálový rozptyl, nelineární (nepružný)

Je-li světlo rozptylováno na atomech nebo molekulách vlastního materiálu vlákna, nejvíce fotonů je rozptylováno pružným rozptylem. Rozptýlené fotony mají stejnou frekvenci jako vlnová délka incidentního fotonu. Nicméně malá část rozptýleného světla (přibližně 1:1000 fotonů) je rozptýlena s frekvencí různou a obvykle nižší než frekvence incidentního fotonu [16]. Nelineární materiálový rozptyl tedy způsobuje, že výstupní výkon není přímo úměrný vstupnímu výkonu a rozptýlená vlna má odlišnou vlnovou délku od vlny dopadající. Zejména u MM vláken je tento rozptyl zanedbatelný.

Brillouinův rozptyl, SBS (Stimulated Brillouin Scattering)

Brillouinův rozptyl je vyvolán interakcemi monochromatického světla s akustickými vlnami ve světlovodu (generuje se akustický foton), přičemž dochází k frekvenčnímu posuvu ve zpětném směru.

Nad určitou prahovou hodnotou světelného výkonu v médiu může stimulovaný Brillouinův rozptyl odrážet většinu výkonu vyskytujícího se v paprsku. Je zvláště významný pro signály s úzkou šířkou čáry, a proto je tento jev možné účinně potlačit rozšířením spektra signálu.

Ramanův rozptyl, SRS (Stimulated Raman Scattering)

Ramanův rozptyl je jev vznikající při interakci mezi fotony a částicemi světlovodného materiálu, kdy rozptýlené záření má jinou vlnovou délku než dopadající

záření. Tentokrát se generuje optický foton s frekvenčním posunem v dopředném směru tj. posun energie z nižší na vyšší vlnovou délku.

Tento jev lze do jisté míry potlačit vhodným návrhem vlákna, např. zvětšením průměru jádra. Pro jisté aplikace však může být Ramanův rozptyl žádoucí a dobře využitelný. Stimulovaného Ramanova jevu lze využít jako zesilujícího prvku v prostředí jednovidových vláken na bázi SiO₂.

Křížová fázová modulace, XPM (Cross-Phase modulation)

Křížová fázová modulace je změna optické fáze světelného paprsku v důsledku interakce s jiným světelným paprskem v přenosovém mediu a lze ji vyjádřit jako změnu indexu lomu [16].

Vliv XPM může být snížen pečlivým výběrem bitové rychlosti pro jednotlivé sousední kanály systému s vlnovým multiplexem (WDM), kde pro dálkové WDM sítě může být kritická, neboť vede ke kanálovým přeslechům. Křížová fázová modulace roste se zvyšujícím se optickým vstupním výkonem navázaného do vlákna a se zvyšováním přenosové rychlosti.

Čtyřvlnné směřování, FWM (Four-Wave Mixing)

Čtyřvlnné směřování je typem optického Kerrova jevu, při němž interakcí dvou a více signálů různých vlnových délek vznikají signály o nových vlnových délkách. Tento jev je buzen silnými optickými signály o vlnových délkách

$$\lambda_1 = \frac{c}{\nu_1} \text{ a } \lambda_2 = \frac{c}{\nu_2}, \quad [\text{m}] \quad (5)$$

jehož výsledkem jsou signály s kmitočty

$$\nu_{12} = 2\nu_1 - \nu_2 \text{ a } \nu_{21} = 2\nu_2 - \nu_1. \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

Křížová modulace a FWM jsou označovány za aditivní šum.

S tímto jevem musí být počítáno při přenosu s využitím hustého vlnového multiplexu (DWDM). Při použití DWDM technologie jsou jednotlivé přenosové kanály blízko sebe. Vzájemným působením přenosových kanálů se objevuje ve spektrální oblasti nová složka, která může být právě v oblasti jednoho z přenosových kanálů.

Vlastní fázové modulace, SPM (Self-Phase Modulation)

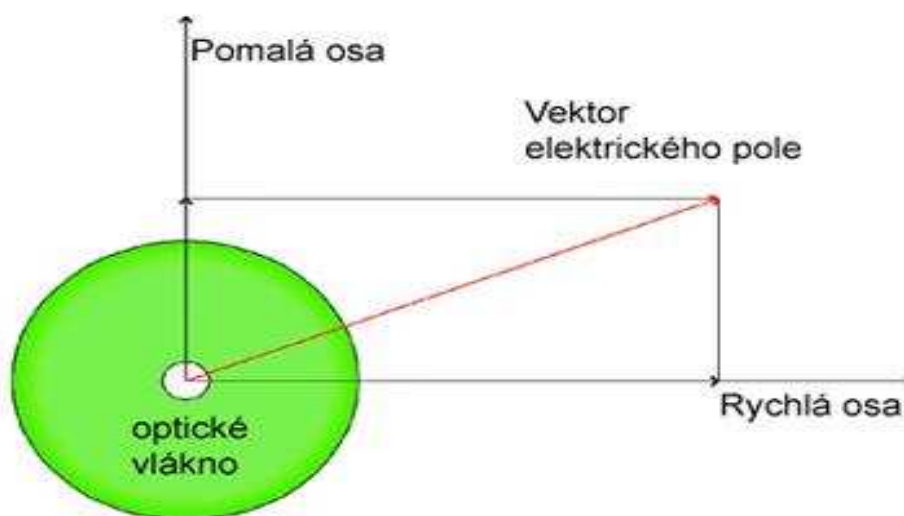
SPM je důležitým jevem u optických systémů, ve kterých bývají použity velmi krátké a intenzivní pulsy světla, jako jsou lasery a přenosové systémy vybudované na optických vláknech. Přichází-li laserové záření s velkou intenzitou, může být tento signál modulován svojí vlastní fází v závislosti na koeficientu chromatické disperze. Vlivem SPM pak ve WDM systémech dochází k vzájemné interferenci mezi přenosovými kanály [16].

Stejně jako u křížové fázové modulace SPM roste se zvyšujícím se optickým vstupním výkonem navázaného do vlákna, se zvyšováním přenosové rychlosti a lze SPM eliminovat nulovou nebo mírně kladnou hodnotou chromatické disperze, či zvýšením efektivní oblasti.

C. Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze je do jisté míry náhodný jev. Vlivem dvojlomu se světlo šíří vlnovodem dvěma vidy ve dvou, navzájem k sobě kolmých, rovinách, přičemž působením nehomogenit a jiných vlivů se tyto šíří nestejnou rychlostí

V ideálních jednovidových vláknech je světlo vedeno celým jádrem a z části i pláštěm. V takovém případě lze uvažovat pouze jeden vid šíření. Protože však reálná vlákna jsou materiály, ve kterých vzniká dvojlom, je tento jediný vid polarizován dvěma různými způsoby, které kopírují polarizační osy daného vlákna. Tyto osy jsou také nazývány “hlavními stavy polarizace” (Principal State of Polarization - zkráceně PSP), což vede ke vzniku dvou polarizačních vidů – znázorněno na obrázku Obr. 1.2.



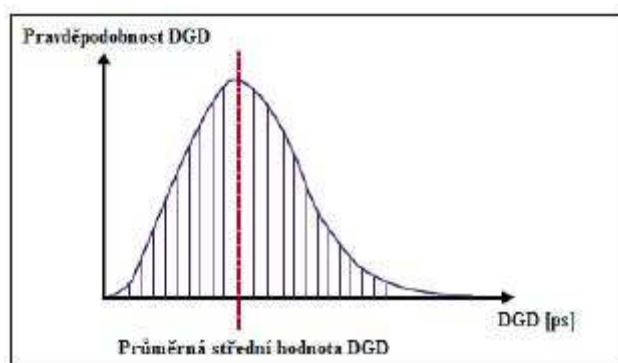
Obr. 1.2. Rozložení vektoru Elektrického pole do dvou polarizačních stavů.

Signál se tedy jednovidovým optickým vláknem šíří ve dvou navzájem kolmých tzv. polarizačních rovinách prostřednictvím dvou polarizačních vidů. Pokud by vlákno bylo po celé své délce zcela homogenní a dokonale kruhové, podmínky šíření signálu budou pro oba tyto vidy (tzn. v obou rovinách) stejné. Žádné optické vlákno ale ideálně kruhové a homogenní není a proto je ve vláknu přítomen tzv. dvojlom. Jednotlivé vidy se pak šíří v obou polarizačních videch různě rychle a dochází tak k časovému zpoždění – DGD (Differential Group Delay). Jelikož impuls nesoucí informaci je tvořen oběma polarizačními vidy, dochází tím k jeho degradaci – rozptylu v čase.

Časové rozšíření impulsu vede ke snižování výkonové špičky signálu, čímž se zhoršuje odstup signálu od šumu (SNR) a může dojít i k roztažení impulsu až do sousedních bitových mezer.

Důvod pro dvojlom v jednojádrových vláknech může být popsán jako vnitřní a vnější. Vnitřní faktory jsou ty, které byly přítomny ve vláknech hned po výrobě. I při specializované výrobě se ve vláknech objevuje nesouměrnost, která způsobuje dvojlom. Takto vyrobená vlákna mohou mít i vysokou hodnotu PMD. Dnešní vlákna jsou již vyráběná se zvláštní péčí a tedy i minimální nesouměrností. PMD úrovně takového vlákna jsou typicky $< 0,1 \text{ ps.km}^{-1/2}$. Vnější vlivy jsou ty, které navodí dvojlom bez ohledu na výrobu, mezi ně patří kabeláž vlákna, ohýbání, změna teploty a další. Jsou to vlivy, které výrobou nelze ovlivnit.

Protože PMD závisí na náhodném dojlomu vlákna, nemůže být definována přímo. Také okamžitá hodnota DGD nemůže být použita ke kalkulacím, protože má malou vypovídací hodnotu. DGD hodnoty kolísají náhodně okolo průměrné hodnoty, které popisuje Maxwellova křivka.



Obr. 1.3. Maxwellovo rozložení DGD.

Jev nabyl na významu při navyšování přenosových rychlostí existujících vláken, často vyrobených před rokem 1990. Většina takových vláken má nyní problémy s PMD u bitových rychlostí vyšších než 10 Gbit/s. Základním přidruženým jevem je nestálost PMD v závislosti na vlnové délce – SOPMD (Second Order PMD) => nerovné hrany of optical Eye Pattern. Jeho význam je však o několik řádů méně významný, než význam samotné PMD.

– **Vliv na optickou síť**

Vliv dvojlomu je uvažován jinak pro krátká a jinak pro dlouhá jednojádrová vlákna. Všechna sdělovací vlákna spadají do kategorie dlouhých vláken. Pro pochopení však bude vhodnější popsat PMD nejdříve pro případ vláken krátkých.

V krátké části vlákna může být napětí (pnutí) uvažováno jako rovnoměrné podél délky. Část jednojádrového vlákna se stává dvou-módovou díky dvojlomu vlákna. Šíření těchto paprsků se mírně liší. Díky zpoždění dochází k rozšíření vstupního pulsu. Toto rozšíření můžeme matematicky popsat [22]:

$$\beta_s - \beta_f = \frac{\omega n_s - \omega n_f}{c} = \frac{\omega \Delta n}{c} \quad [rad; rad \cdot s^{-1}, -, m \cdot s^{-1}], \quad (7)$$

kde

c rychlost světla,
 ω úhlový kmitočet světla,
 β_s, β_f konstanty pomalého a rychlého šíření,
 n_s, n_f indexy lomu.

A dále

$$\frac{\Delta \tau}{L} = \frac{d}{d\omega}(\beta_s - \beta_f) = \frac{\Delta n}{c} - \frac{\omega \cdot d\Delta n}{c \cdot d\omega} \quad [ps \cdot km^{-1}; -, m \cdot s^{-1}], \quad (8)$$

odtud

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta \tau}{L} \quad [ps \cdot km^{-1}; ps, km], \quad (9)$$

kde

$D_{PMD}(\lambda)$ PMD součinitel vlákna [ps / km].

U krátkých vláken je vztah mezi PMD a vláknovou délkou lineární. Dlouhá (sdělovací) vlákna tuto charakteristiku již nemají lineární [22], nýbrž platí vztah

$$D_{PMD}(\lambda) = \frac{\Delta \tau}{\sqrt{L}} \quad [ps \cdot \sqrt{km^{-1}}]. \quad (10)$$

– Možné způsoby omezení významu PMD

Vliv dopadu polarizační vidové disperze lze do jisté míry ovlivnit. Následující odstavce přináší soupis technik, které lze užít v případě, kdy hodnota PMD přesahuje mez stanovenou normou, či je zapotřebí hodnotu PMD z jiného důvodu snížit [34].

a. Rozčlenění optické trasy a použití regenerátoru/opakovače.

Při použití regenerátoru optického signálu je signál detekován ještě před jeho znehodnocením přes hraniční hodnotu DGD. Bohužel tato metoda s sebou přináší celou řadu jiných negativních jevů a nevýhod a proto bývá používána jen řídce. Největší překážkou se stává u multiplexních systémů.

b. Použití vlnového multiplexu pro rozptýlení kapacity.

Použití vlnového multiplexu je velmi účinný způsob, jak snížit vliv PMD pod únosnou mez. Principem je rozdělení kapacity jednoho kanálu do více s tím, že je možno dramaticky snížit přenosovou rychlost na kanál. Zjevnou nevýhodou je neekonomický provoz optické trasy.

c. Použití jiné vlnové délky.

Pokud nevyhovuje přenosová cesta pro konkrétní vlnovou délku, je možné použít pro přenos jinou vlnovou délku. Tato metoda vyplývá z fyzikální podstaty světla popsané v kapitole 1. Účinnost je spekulativní, ale na první pohled ekonomičtější než ostatní metody.

d. Použití jiného vlákna optického kabelu.

Optická cesta bývá zpravidla zajištěna i několika rezervními, servisními vlákny, či vlákny určenými pro přenos pouze režijních informací. Pro nejnižší hodnotu PMD zpravidla zkoušíme všechna vlákna v kabelu a ta použijeme pro nejdůležitější přenosovou cestu. Pokud nemáme k dispozici měřicí přístroj, je to spolu se způsobem změny vlnové délky jediný způsob jak se vyhnout nákladné změně celého kabelu, či zavádění přídavných zařízení do sítě.

e. Výměna celé optické trasy.

Tato metoda patří ke krajním způsobům řešení. Zpravidla však bývá doporučována pro optické trasy se starými optickými vlákny vyrobenými v 90. letech, pro trasy s vlákny poškozenými či nevyhovujícími a pro špičkové aplikace. Výměna optických kabelů je výhodná zejména na trasách se staršími opt. kabely a tam, kde se kabely zatahují či zafukují a jejich výměna není příliš nákladná.

f. Výměna úseku vlákna.

Tato metoda vyžaduje proměření optické trasy reflektometrickým přístrojem POTDR (Polarimetric Optical Time Domain Reflectometry). Tento způsob je velmi efektivní a lze jej použít na všech druzích optických tras. Přejímkové měření přístrojem POTDR je na vysokorychlostních spojích nezbytnou podmínkou funkčnosti. Přístroj POTDR umožní zjistit místa se zhoršenými poměry PMD a následně je vyměnit. [34]

g. Kompenzace PMD

V případě kompenzace PMD nelze užít statických pasivních kompenzačních prvků, jak tomu je u chromatické disperze, jelikož tento jev je do značné míry náhodný a v čase proměnný. Využívá se proto aktivních kompenzátorů, které umí vyhodnocovat stavy polarizace a podle nich přizpůsobují své vlastnosti. Není možné úspěšně kompletně odstranit PMD, ale lze ho snížit na únosnou mez.

D. Matematické vyjádření PMD

Polarizační vidová disperze optického vlákna se obvykle popisuje pomocí Stokesových, Jonesových či Poyntingových matic. Součástí této práce není kompletní odvození všech vztahů nutných k popisu PMD, ale jen ta část matematických operací a vztahů, které jsou v práci dále zmíněny či přímo využity při návrzích simulačních aplikací, jejichž úkolem je výpočty uživatelsky maximálně zpříjemnit. Detailní

odvození matematického aparátu je k dispozici v literatuře, např. [2], odkud byla čerpána teorie v následujících odstavcích.

Ve Stokesově prostoru je PMD popsána následovně. Průsečík Poincarovy sféry s přímkou jdoucí podél PMD vektoru Ω definuje dvě hlavní ortogonální polarizace. Velikost vektoru je definována rozdílem zpoždění těchto dvou hlavních polarizací. N-tý řád PMD je charakterizovaný n-tou derivací PMD vektoru v závislosti na použitém kmitočtu.

Další způsob popisu PMD je v Jonesově prostoru. Stokesovy vektory vychází z Jonesových vektorů (sloupcové matice). Vztah mezi vstupem a výstupem se zapisuje do přenosové matice $\mathbf{T}$ typu 2x2. Vektor Ω je dán vztahem:

$$\Omega = \frac{d\mathbf{T}}{d\omega} \quad [-]. \quad (11)$$

N-tý řád disperze popisuje derivace n+1 matice $\mathbf{T}$. Graf výstupu se stanovuje z přenosové funkce $\mathbf{T}^T(\omega)\mathbf{T}(\omega')$.

Vznik PMD je dán rozdílnou skupinovou rychlostí vidů ve dvou hlavních polarizacích. Z toho důvodu je pojem skupinová rychlost základní pro teorii PMD. Skupinová rychlost je rychlost energetického šíření. Proto existuje blízké spojení mezi charakteristikou energie a PMD vektorem. Energie je kvadratický tvar pole vektorů. Definici PMD v rámci skupinové rychlosti a energie můžeme ukázat popisem PMD v Poyntingově prostoru.

Použitými operacemi jsou: standardní násobení dvojrozměrných matic a skalární součin trojrozměrných vektorů. K označení sloupcových matic v Jonesově prostoru používáme malá tučná písmena a nebo b ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$). Matice typu 2x2 značíme velkými tučnými písmeny ($\mathbf{T}$), vektory malými tučnými písmeny, a tenzory s $\tilde{s}$.

– **Stokesův a Jonesův prostor**

Ve Stokesově prostoru vytváří vstupní polarizační vektor $\mathbf{s}_a$ výstupní polarizační vektor $\mathbf{s}_b$. Zvýší-li se frekvence na $\omega + d\omega$ a vstupní polarizační vektor převezme hlavní frekvenci, pak změna výstupního polarizačního vektoru je

$$\frac{d}{d\omega}\mathbf{s}_b = \Omega \times \mathbf{s}_b. \quad (12)$$

Stokesův PMD vektor Ω je funkcí frekvence. N-tý řád disperze je určený n-tou derivací vektoru v závislosti na frekvenci. Další popis PMD je v Jonesově prostoru. Označíme-li sloupcovou matici popisující výstup $\mathbf{b}$ a sloupcovou matici vstupu $\mathbf{a}$, pak Jonesova matice $\mathbf{T}$ popisující vstup a výstup je rovna

$$\mathbf{b} = \mathbf{T}\mathbf{a}. \quad (13)$$

To je běžné k přizpůsobení vstupu k jednotce energie. Uvažujeme-li jen část, ve které je energie zachována, pak dostaneme

$$\mathbf{T}^T \mathbf{T} = \mathbf{T} \mathbf{T}^T = 1, \quad (14)$$

kde matice $\mathbf{T}$ je unitární. Unitarita $\mathbf{T}$ nám dává čtyři reálné skalární rovnice jako omezení pro osm reálných skalárů potřebných k určení komplexní matice typu 2×2 , čímž zbývají ještě čtyři reálné parametry. Hlavní tvar matice je

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} re^{-j\theta} & jte^{j\psi} \\ -jte^{-i\psi} & re^{j\theta} \end{bmatrix} \exp(-j\phi), \quad (15)$$

kde $t = \sqrt{1-r^2}$. Matice má čtyři nezávislé parametry r, θ, ψ, ϕ . Běžný fázový faktor $\exp(-j\phi)$ je v charakterizaci PMD ve Stokesově prostoru potlačený a zajímavé je v něm pouze relativní časové zpoždění. Zachování energie dává

$$\mathbf{T}^T \frac{d\mathbf{T}}{d\omega} = -\frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega} \mathbf{T}. \quad (16)$$

Vztah mezi Stokesovými prostorovými vektory a Jonesovými prostorovými maticemi je znázorněný v „matici vektoru“ $\vec{\mathbf{Q}}$. Matici vektoru značíme velkým tučným písmenem se šipkou. $\vec{\mathbf{Q}}$ je definovaná v Pauliho maticích [1] jako

$$\vec{\mathbf{Q}} = \mathbf{i}_x \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + \mathbf{i}_y \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{i}_z \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{i}_x \sigma_x + \mathbf{i}_y \sigma_y + \mathbf{i}_z \sigma_z, \quad (17)$$

pro které platí komutativní vztahy.

Nyní lze vyjádřit Hermitovskou matici $\mathbf{H}$ v Jonesově prostoru pomocí čtyř reálných skalárů X, Y, Z, U následovně:

$$\vec{\mathbf{H}} = X\mathbf{i}_x \sigma_x + Y\mathbf{i}_y \sigma_y + Z\mathbf{i}_z \sigma_z + U1. \quad (18)$$

Z anti-Hermitovské matice dostaneme Hermitovskou matici násobkem j nebo jejím analogickým rozložením. Písmena X, Y, Z znázorňují tři složky vektoru. Transformace z Jonesova prostoru na Stokesův prostor dosáhneme přes matici vektoru $\vec{\mathbf{Q}}$:

$$\mathbf{s}_b = \mathbf{b}^T \vec{\mathbf{Q}} \mathbf{b}. \quad (19)$$

Odtud lze odvodit:

$$\begin{aligned}\frac{ds_b}{d\omega} &= \frac{d\mathbf{b}^T}{d\omega} \bar{\mathbf{Q}}\mathbf{b} + \mathbf{b}^T \bar{\mathbf{Q}} \frac{d\mathbf{b}}{d\omega} = \mathbf{a}^T \frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega} \bar{\mathbf{Q}}\mathbf{T}\mathbf{a} + \mathbf{a}^T \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{Q}} \frac{d\mathbf{T}}{d\omega} \mathbf{a} = \\ &= \mathbf{b}^T \mathbf{T}^T \frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega} \bar{\mathbf{Q}}\mathbf{b} + \mathbf{b}^T \bar{\mathbf{Q}} \frac{d\mathbf{T}}{d\omega} \mathbf{T}^T \mathbf{b} = \mathbf{b}^T \left[\mathbf{T}^T \frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega}, \bar{\mathbf{Q}} \right] \mathbf{b}.\end{aligned}\quad (20)$$

Symbolem „ $\cdot$ “ značíme komutátory. Následně lze napsat Hermitovskou matici ve tvaru

$$-j\mathbf{T}^T \frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega} = j \frac{d\mathbf{T}}{d\omega} \mathbf{T}^T = \frac{1}{2} [\Omega_x \sigma_x + \Omega_y \sigma_y + \Omega_z \sigma_z] + U1, \quad (21)$$

kde $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ jsou složky dosud neurčeného vektoru a určením x -složky dostaneme:

$$\begin{aligned}\mathbf{i}_x \cdot \mathbf{b}^T \left[\mathbf{T}^T \frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega}, \bar{\mathbf{Q}} \right] \mathbf{b} &= \mathbf{b}^T \left[\mathbf{T}^T \frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega}, \sigma_x \right] \mathbf{b} = \frac{1}{2} j \mathbf{b}^T [(\Omega_y \sigma_y + \Omega_z \sigma_z), \sigma_x] \mathbf{b} \\ &= -\mathbf{b}^T (\Omega_y \sigma_y - \Omega_z \sigma_z) \mathbf{b} = \Omega_y s_z^{(b)} - \Omega_z s_y^{(b)} = \mathbf{i}_x \cdot (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{s}_b),\end{aligned}\quad (22)$$

kde x -složka vektoru je trojitým skalárním součinem složeného z $\mathbf{i}_x, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{s}_b$. Proto je vhodné psát tuto matici v Jonesově představení ve formě

$$-j\mathbf{T}^T \frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Omega_x & \Omega_y - j\Omega_z \\ \Omega_y + j\Omega_z & -\Omega_x \end{bmatrix} + U1 = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega} + U1. \quad (23)$$

– Poyntingův prostor

Matice $\mathbf{T}^T \frac{d\mathbf{T}^T}{d\omega}$ popisuje šíření vlnových paketů vytvořených ze dvou harmonických křivek o stejné velikosti s mírně rozdílnými frekvencemi. Takové vlnové pakety si mezi sebou nevyměňují energii a energie obsažená v každém vlnovém paketu se pohybuje s rychlostí pláště, tzv. skupinovou rychlostí. Jestliže se dva různě polarizované degenerované vidy sečtou, nemohou se vytvořit vlnové pakety, dokud se neurčí hlavní (principální) polarizace. Tímto krátce popisujeme PMD v Poyntingově prostoru. Energetický teorém vychází z Maxwellových rovnic. Jestliže $\mathbf{E}$ a $\mathbf{H}$ jsou elektrické a magnetické pole, pak energetický teorém vypadá následovně:

$$\frac{1}{4} \oint d\mathbf{S} \cdot \left\{ \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \omega} \times \mathbf{H}^* + \mathbf{E}^* \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \omega} \right\} = -\frac{j}{4} \int dv \left[\mathbf{H}^* \cdot \frac{\partial}{\partial \omega} (\omega \bar{\mu}) \cdot \mathbf{H} + \mathbf{E}^* \cdot \frac{\partial}{\partial \omega} (\omega \bar{\epsilon}) \cdot \mathbf{E} \right] = -jw. \quad (24)$$

Pravá strana se rovná energii w o velikosti uzavřené plochy. Plošný integrál je dán uzavřenou plochou obsahující vstupní a výstupní příčné řezy a obsahový integrál končí s velikostí uzavřené plochy. Obsahový integrál je $-j$ násobek energie w . Tenzor dielektrické konstanty a magnetické permeability je předpokládáný. V případě

optického vlákna je magnetická permeabilita dána volným prostorem. Dielektrický tenzor způsobuje transformaci polarizace (vlnové šíření). $\bar{\epsilon}$ tenzor je Hermitovský.

V případě vlnovodu nebo vlákna podporujícího dva ortogonálně polarizované vidy uvažujeme šíření v Jonesově prostoru. Předpokládejme excitaci $a_i(\omega)$, která tvoří sloupcovou matici v Jonesově prostoru. Schémata rozmístění polí dvou vidů pak označme $\mathbf{e}_i(\mathbf{r}_T)$ a $\mathbf{h}_i(\mathbf{r}_T)$, kde $\mathbf{r}_T$ koordinuje vektor v příčném řezu vlnovodu. Jsou stejného typu, ale jejich příčné složky jsou vzájemně otočené o 90° . To je vhodné k popsání společné excitace ve dvou polarizacích v rámci vektorové Jonesovy matice. To pak také popisuje prosté pole vektorového prostoru Maxwellovými rovnicemi v Jonesově prostoru. Vektory sloupcové matice definujeme

$$\bar{\mathbf{E}}_a \equiv \begin{bmatrix} a_1 \mathbf{e}_1 \\ a_2 \mathbf{e}_2 \end{bmatrix} \quad \text{a} \quad \bar{\mathbf{H}}_a \equiv \begin{bmatrix} a_1 \mathbf{h}_1 \\ a_2 \mathbf{h}_2 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Schéma rozmístění polí je normalizované tak, že integrál jejich Poyntingova vektoru přes příčný řez dává

$$\int d\mathbf{S} \cdot \mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_i^* = \int d\mathbf{S} \cdot \mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_i = 1 \quad (26)$$

Po dalších operacích uvedených např. v [1] lze pro energetickou matici $\mathbf{W}_a$ v rámci elektrického a magnetického pole vidových vzorů představených sloupcovými maticemi vektoru výstižně napsat

$$\bar{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1(x, y) \\ \mathbf{e}_2(x, y) \end{bmatrix} \quad \text{a} \quad \bar{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(x, y) \\ \mathbf{h}_2(x, y) \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Jonesův vektor $\mathbf{a}$ se přeměňuje na vidové šíření podél systému $\mathbf{a}(z) = T(z)\mathbf{a}(0)$. Za pomoci těchto matic dostaneme:

$$\mathbf{W}_a = \frac{1}{4} \int dV \mathbf{T}^T(z) \left[\bar{\mathbf{h}}^T \cdot \frac{\partial}{\partial \omega} (\omega \bar{\mu}) \cdot \bar{\mathbf{h}} + \bar{\mathbf{e}}^T \cdot \frac{\partial}{\partial \omega} (\omega \bar{\epsilon}) \cdot \bar{\mathbf{e}} \right] \mathbf{T}(z) \quad (28)$$

a dále pak odvození pokračuje podle [1].

PMD lze definovat ve Stokesově, Jonesově a Poyntingově prostoru. Formulace ve Stokesově prostoru popisuje jen PMD ve stoupajících řádech, ale ignoruje izotropní disperzi, čímž neposkytuje úplnou informaci. Formulace v Jonesově prostoru obsahuje úplnou informaci a to v Jonesově matici $\mathbf{T}$, která je funkcí frekvence. Stokesův vektor je

funkcí frekvence obsažené v matici $\frac{\mathbf{T} d\mathbf{T}^T}{d\omega}$. Poyntingův prostor poskytuje plnou informaci o PMD vektoru v energetické matici $\mathbf{W}_b$ o hodnotě výstupních polarizací. Matice $\mathbf{W}_b$ obsahuje informace o PMD vektoru všech řádů. Navíc má informaci o izotropní disperzi. Na základě této samotné informace lze zkonstruovat kompenzační strukturu, která odstraňuje PMD a disperzi ve všech řádech. Znalost PMD vektoru ve funkci frekvence nezahrnuje informaci o izotropní disperzi.

Konstrukce diagramu oka (použitá v kapitole 3) vyžaduje znalost $\mathbf{W}_a$. Tato informace je k dispozici v Jonesově prostoru v rámci matice $\mathbf{T}(\omega)$, ale není obsažena v PMD vektoru.

E. Současné techniky plánování optických tras

Pokrok v optických komunikacích umožnil problémy útlumu a chromatické disperze prakticky zanedbat při plánování vysokorychlostních optických spojů [15]. Jediným skutečným problémem zůstává polarizační vidová disperze PMD, která se na degeneraci vysokorychlostního signálu podílí měrou sice zdaleka ne největší, ale nejvýznamější pro svou obtížnou odstranitelnost. Mezinárodní telekomunikační unie ITU stanovila limity pro maximální hodnoty PMD. V praxi se však častěji užívá deklarace 1/10 doby trvání jednoho signálového prvku, ale ve skutečnosti jsou trasy projektovány s ještě o řád lepšími parametry. V Tab. 1.1 jsou všechna doporučení přehledně srovnána.

Tab. 1.1. Doporučení ITU a limity PMD.

přenosová rychlost	155 Mb/s	622 Mb/s	2,5 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s
SDH	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
trvání jednoho bitu	6,43 ns	1,61 ns	401,88 ps	100,47 ps	25,12 ps
limit PMD ITU	640 ps	160 ps	40 ps	10 ps	2,5 ps
limit PMD deklarace 1/10	643 ps	161 ps	40,1 ps	10 ps	2,51 ps
koeficient PMD na 400 km $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	<32	<8	<2	<0,5	<0,125

Současné softwarové možnosti projektanta optických tras jsou vynikající, ale právě řešení problémů s PMD jsou do jisté míry velmi omezená. Existuje celá řada nástrojů pro tvorbu projektové dokumentace i podrobných výpočtů znehodnocujících vlivů na přenášený signál. Některé se vyznačují uživatelsky příjemným prostředím umožňujícím přehledně graficky plánovat, jiné jsou zaměřeny spíše developersky pro pokusy na trasách a testování různých variant. V následujících odstavcích jsou popsány všechny dostupné návrhové programy.

OptSim - je intuitivní modelovací a simulační prostředí společnosti RSoft podporující návrh a stanovení výkonnosti fyzické vrstvy (přenosové části) optických komunikačních systémů. Jako jediný z uvedených umožňuje volit hodnotu PMD optických vláken. Není však možné sledovat pouze tento parametr ani tvořit jakékoliv parametrické simulace. Aplikace pouze zahrne vliv PMD do všech nepříznivých vlivů trasy, vykreslí diagram oka pro zvolený modulační kmitočet a umožní výsledné hodnoty exportovat do prostředí MATLAB.

EXFO Optical software - aplikace vyvinutá speciálně pro zpracování výstupů měřicích přístrojů EXFO, chybí jakákoliv možnost trasy konfigurovat či měnit vstupní parametry.

FIBERCORE - Polarisation Mode Dispersion Emulators – jsou emulátory pro měření. Jedná se o hardwarové řešení sloužící k emulaci imaginární optické trasy. Chybí jakákoliv možnost trasy konfigurovat či měnit vstupní parametry.

OpTaliX – simulátor geometrické optiky, možnost simulovat optické přenosy, sledovat parametrické změny indexu lomu, útlumu prostředí, pohyblivě graficky vyobrazovat výsledky v závislosti na parametrech. Simulace disperzních vlivů je však možná pouze pro chromatickou disperzi.

Soubor simulačních programů **OptiWave** – jedná se o japonský software, bohužel s absencí anglického jazykového prostředí. Součástí souboru jsou jednotlivé aplikace OptiSystem (sloužící pro jednotlivý návrh optických tras s možností kalkulace útlumu a chromatické disperze), OptiBPM (VB skript sloužící pro konformní mapování), OptiGratings (mřížkové struktury sloužící k parametrickému rozkladu světla; vhodné pouze jako školní pomůcka), OptiFiber (umožňuje simulace měnících se parametrů vlákna mimo PMD) a OptiAmplifier (simulátor optických zesilovačů).

Žádná z uvedených projekčních pomůcek však neobsahuje simulace PMD ani neumožňuje jakýmkoliv způsobem zobrazovat výslednou hodnotu PMD na základě dynamicky se měnících parametrů trasy.

F. Optické modulační formáty

Základní modulační formát pro optické sdělovací systémy je amplitudová modulace ASK (Amplitude Shift Keying), známá taky jako modulace OOK (On-Off-Keying). Další modulační formát je fázová modulace PSK (Phase Shift Keying). Všechny tyto druhy modulace mohou být NRZ (Non Return to Zero) - bez návratu k nule nebo RZ (Return to Zero) – s návratem k nule [19].

– **Amplitudová modulace (ASK)**

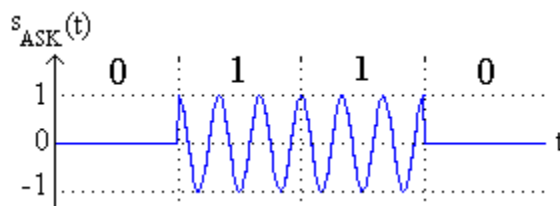
Amplitudová modulace (ASK), nebo-li OOK (On-Off-Keying). Tato modulační technika je založena na změně intenzity nosného signálu. Signál lze popsat podle rovnice

$$s_{ASK}(t) = s_c(t) \cdot g(t) = S_c \cos \omega_c t \cdot g(t), \quad (29)$$

kde:

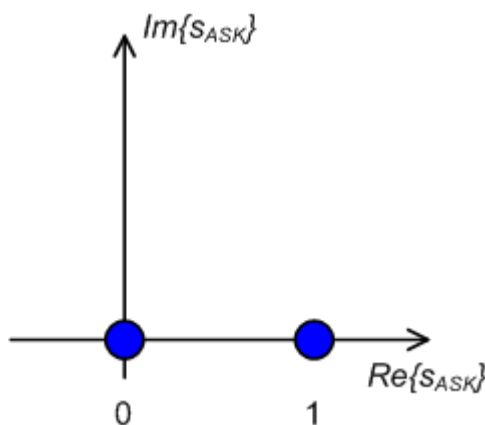
S_c amplituda,
 ω_c úhlový kmitočet nosné,

t čas,
 $g(t) = 0$ nebo 1 ...obdélníkový modulační signál.



Obr. 1.4. Amplitudová modulace (ASK).

ASK modulační formát se vyznačuje jednoduchou generací a detekcí signálu. V bloku vysílače je použit amplitudový modulátor. V bloku přijímače je pro detekci použita fotodioda. Bitové hodnoty $\{0, 1\}$ jsou vyjádřeny symboly $\{0, 1\}$. Jedná se o unipolární signál. Jeden symbol přenáší informaci jednoho bitu. Konstelační diagram amplitudové modulace je vidět na Obr. 1.5.



Obr. 1.5. Konstelační diagram amplitudové modulace (ASK).

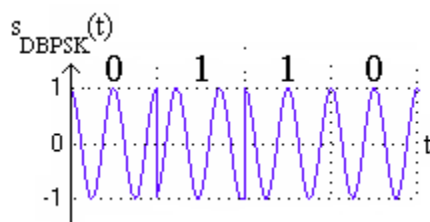
– Fázová modulace (PSK)

Fázová modulace (PSK) je založena na změně počáteční fáze nosného signálu. V optice je častěji používána diferenční dvojstavová fázová modulace DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) nebo kvadrurní diferenční fázová modulace DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying).

Diferenční dvojstavová fázová modulace (DBPSK)

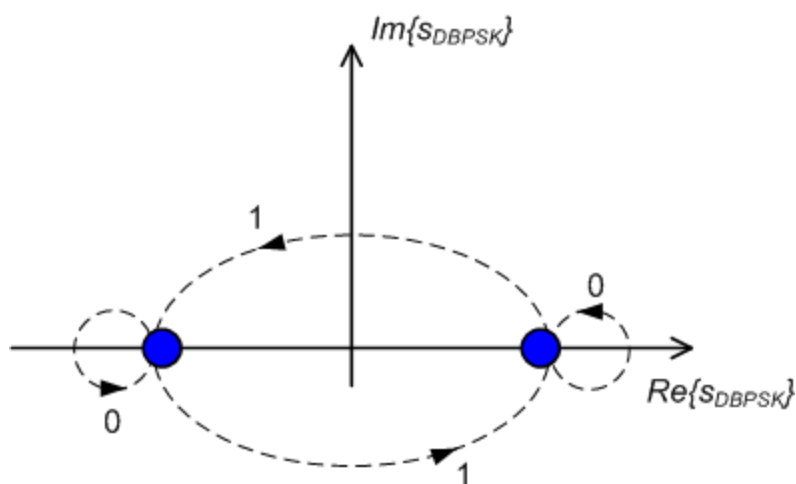
U diferenční dvojstavové fázové modulace (DBPSK) se nuly a jedničky binární posloupnosti vyjadřují zachováním fáze a obrácením počáteční fáze signálu. Například nula se vyjádří zachováním počáteční fáze a jednička změnou fáze o 180° . Viz Obr. 1.6. Signál se dá popsat podle rovnice

$$s_{DBPSK}(t) = s_c(t) \cdot g(t) = S_c \cos \omega_c t \cdot g(t). \quad (30)$$



Obr. 1.6. Diferenční dvojstavová fázová modulace (DBPSK).

V bloku vysílače je použit amplitudový modulátor. V bloku přijímače je pro demodulaci použit interferometr se zpožděním T . Bitové hodnoty $\{0, 1\}$ jsou vyjádřeny symboly $\{-1, 1\}$, respektive $\{e^{j\pi}, e^{j0}\}$. Jedná se o bipolární signál. Jeden symbol přenáší informaci jednoho bitu. Konstelační diagram dvojstavové fázové modulace (DBPSK) je vidět na Obr. 1.7.

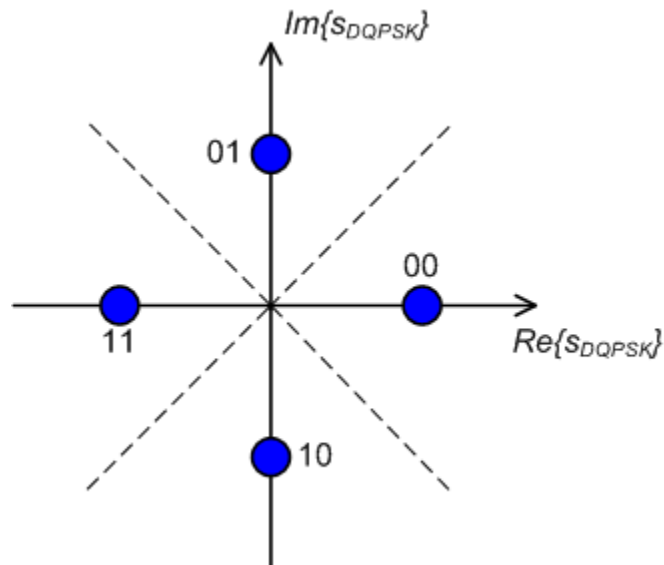


Obr. 1.7. Konstelační diagram diferenční dvojstavové fázové modulace (DBPSK).

Diferenční čtyřstavová fázová modulace (DQPSK)

Diferenční čtyřstavová fázová modulace (DQPSK) je podobná dvojstavové fázové modulaci (DBPSK), má čtyři stavy.

V bloku vysílače je použit amplitudový modulátor. V bloku přijímače je pro demodulaci použit interferometr se zpožděním T . Bitové hodnoty $\{00, 01, 10, 11\}$ jsou vyjádřeny symboly $\{e^{\pm j\pi/4}, e^{\pm j3\pi/4}\}$. Jeden symbol přenáší informaci dvou bitů. Konstelační diagram diferenční čtyřstavové fázové modulace (DQPSK) je vidět na Obr. 1.8.



Obr. 1.8. Konstelační diagram diferenční čtyřstavové fázové modulace (DQPSK).

– **NRZ (Non Return to Zero) a RZ (Return to Zero)**

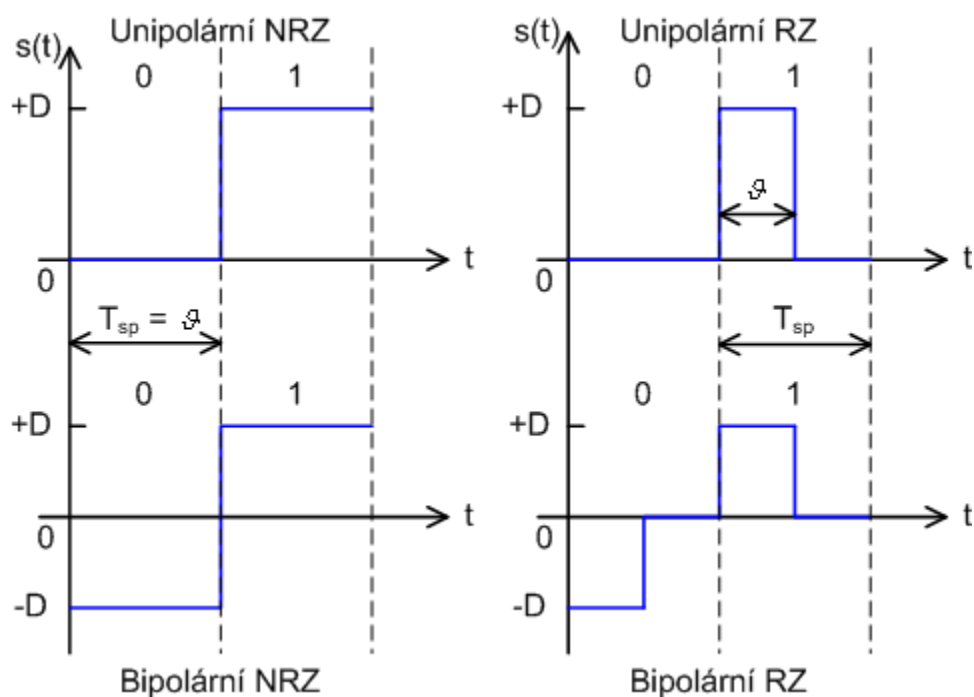
Všechny výše uvedené optické modulace mohou být NRZ (Non Return to Zero) - bez návratu k nule nebo RZ (Return to Zero) – s návratem k nule. T_{sp} je dobá trvání jednoho signálového prvku a θ je počet částí jednoho signálového prvku.

NRZ (Non Return to Zero)

U ASK modulace se používá unipolární NRZ a u PSK modulací se používá bipolární NRZ. Viz Obr. 1.9.

RZ (Return to Zero)

U ASK modulace se používá unipolární RZ a u PSK modulací se používá bipolární RZ. Viz Obr. 1.9.



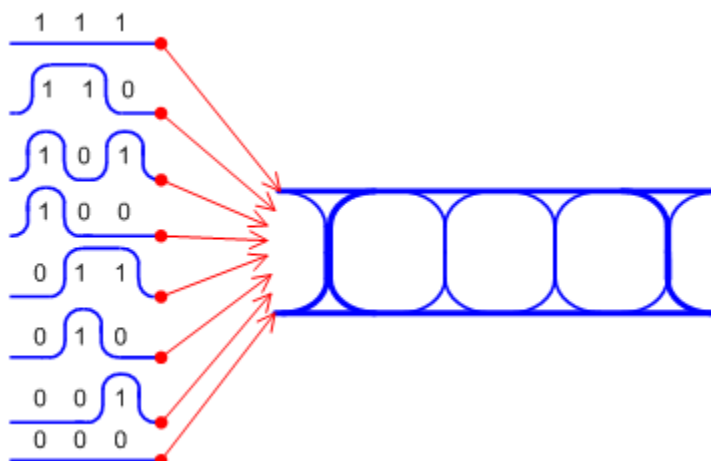
Obr. 1.9. Unipolární a bipolární NRZ a RZ.

G. Diagram oka

Diagram oka je užitečný nástroj pro kvalitativní analýzu signálu používaného v digitálních přenosech. Poskytuje pohled na vyhodnocení přenosové charakteristiky systému a lze podle něj diagnostikovat kanálové chyby. S diagramem oka souvisí pojmy jako je bitová chybovost kanálu BER (Bit Error Rate) či odstup signálu od šumu SNR (Signal to Noise Ratio).

– Vznik diagramu oka

Správný tvar diagramu oka by měl obsahovat všechny možnosti bitové sekvence. Podle nich dokážeme diagnostikovat chyby v systému. Viz příklad vzniku diagramu oka na Obr. 1.10.



Obr. 1.10. Vznik diagramu oka

Rezerva pro rozhodnutí je maximálně polovina výšky oka, snižuje se přidáním rušení a chybnou časovou polohou prvku (vliv disperze).

– **Q-faktor**

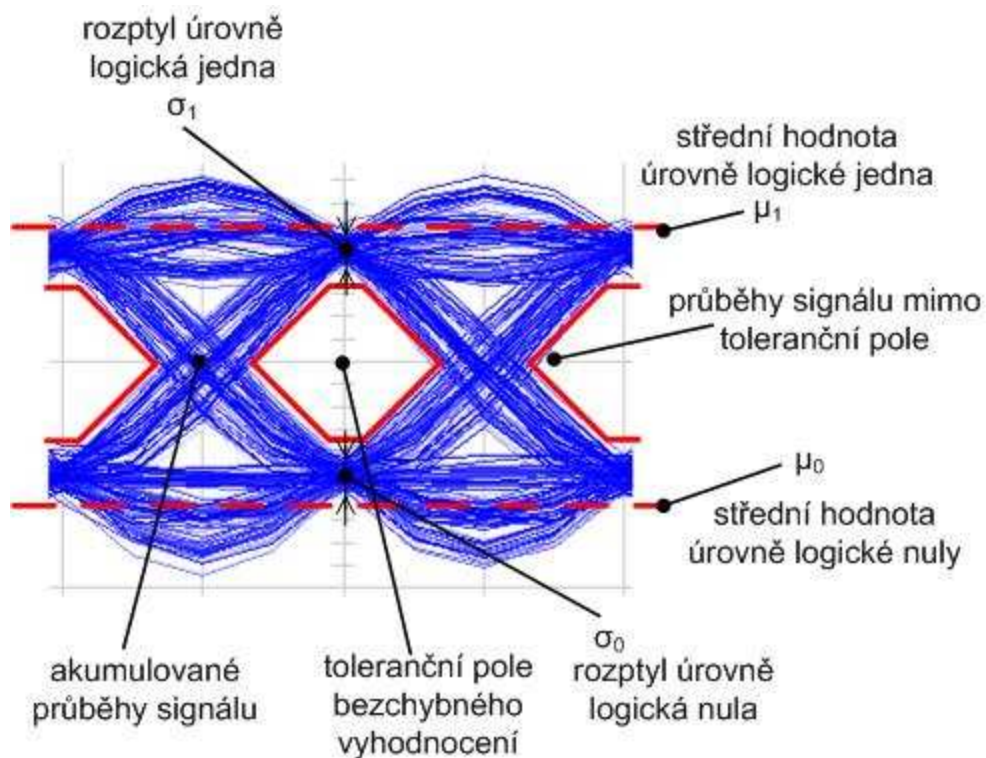
Diagram oka graficky znázorňuje vliv rušení v místě realizovaného měření. Kvalitu oka vyjadřuje Q-faktor, který se vypočítá podle rovnice

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad [-], \quad (31)$$

kde

Q	Q-faktor,
μ_1	střední hodnota úrovně logické jedničky,
μ_0	střední hodnota úrovně logické nuly,
σ_1	rozptyl hodnot úrovně logická jedna,
σ_0	rozptyl hodnot úrovně logická nula.

Obr. 1.11 vysvětluje Q-faktor a jeho souvislosti v diagramu oka. Q-faktor značí optimální rozhodovací úroveň.



Obr. 1.11. Souvislost Q-faktoru v diagramu oka.

– Bitová chybovost kanálu (BER)

V případě, že rušení přesáhne rozhodovací úroveň, dojde k chybnému vyhodnocení symbolu a ke vzniku chyby. Četnost těchto chyb se popisuje pomocí bitové chybovosti kanálu (BER).

Bitová chybovost kanálu (BER) je kritérium kvality digitálních přenosových traktů. Bitová chybovost kanálu se dá vypočítat relativně jednoduchou metodou založenou na počítání chyb v přijatých bitových znacích. Pokud je počet chyb známý, můžeme BER vyjádřit jako

$$BER = \frac{N_E}{N_A} \quad [-], \quad (32)$$

kde

N_E počet chybných bitů,
 N_A počet všech bitů.

Výpočet počtu chyb může být dosti zdlouhavý proces vzhledem k nízkým hodnotám ($BER < 10^{-12}$). Výpočet BER se pak stane komplikovaným a časově náročným.

Modelovým případem výpočtu BER je kanál s bílým Gaussovským šumem (AWGN - Additive white Gaussian Noise). Káňál AWGN lze dá popsát rovnicí

$$s_{out}(t) = s_{in}(t) + n(t) \quad [-], \quad (33)$$

kde

$s_{out}(t)$ výstupní signál,
 $s_{in}(t)$ vstupní signál,
 $n(t)$ bílý šum.

AWGN – aditivní bílý gaussovský šum, znamená, že šum se přičítá „aditivní“, má konstantní spektrální výkonovou hustotu „bílý“ a má normální rozložení amplitudy „gaussovský“.

Bitová chybovost kanálu BER souvisí s Q-faktorem. Q-faktor se získá odečtením optimální hodnoty γ_{opt} od střední hodnoty úrovně logické jedna a od střední hodnoty úrovně logické nula. Viz Obr. 1.12 [10].

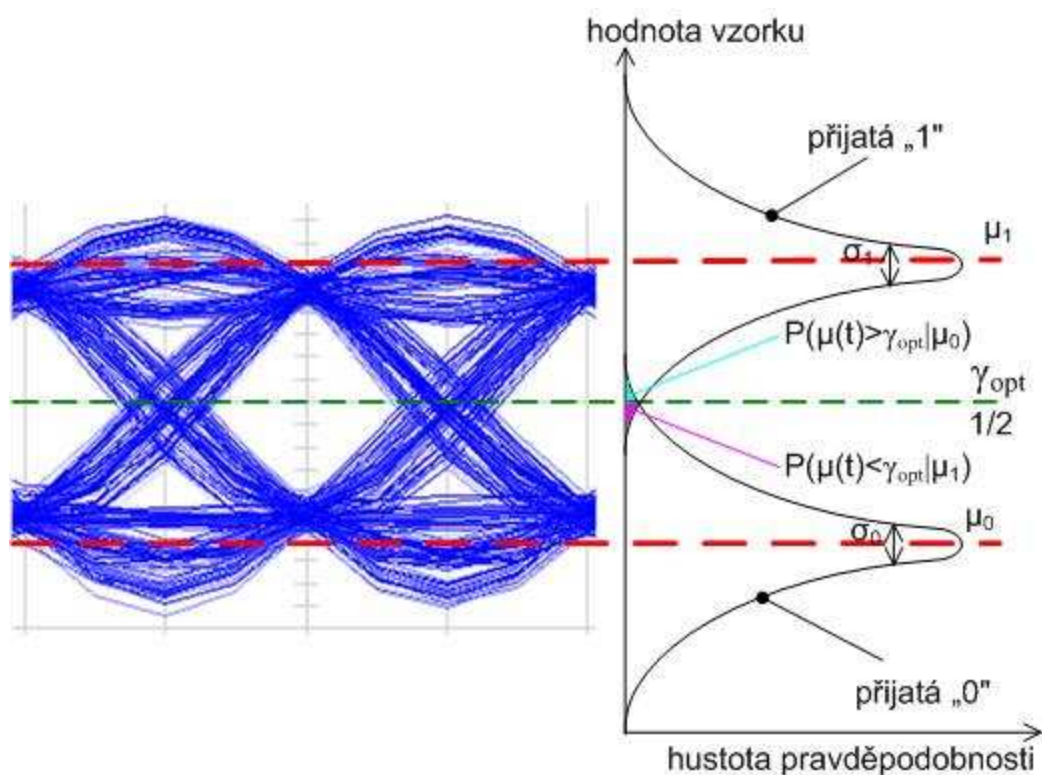
$$Q = \frac{\mu_1 - \gamma_{opt}}{\sigma_1} = \frac{\gamma_{opt} - \mu_0}{\sigma_0} = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad [-], \quad (34)$$

kde

γ_{opt} optimální hodnota.

Optimální hodnotu γ_{opt} lze dále vyjádřit jako

$$\gamma_{opt} = \frac{\sigma_0 \mu_1 - \sigma_1 \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (35)$$



Obr. 1.12. Hustota pravděpodobnosti BER.

Hustota pravděpodobnosti BER $P(\mu(t) > \gamma_{opt} | \mu_0)$ z Obr. 1.12 udává hodnotu, která nastane, když pravděpodobnost $\mu(t)$ je větší než optimální hodnota nebo střední hodnota úrovně logické nuly.

Hustota pravděpodobnosti BER $P(\mu(t) < \gamma_{opt} | \mu_0)$ z Obr. 1.12 udává hodnotu, která nastane, když pravděpodobnost $\mu(t)$ je menší než optimální hodnota nebo střední hodnota úrovně logické jedna.

V důsledku překrytí těchto dvou oblastí vzniká problém rozhodnutí, jestli zde je „0“ nebo „1“.

Rozhodnutí lze určit podle pravděpodobnosti zvlášť pro logickou nulu a jedničku podle rovnic [10]

$$P(1|0) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_{\gamma_{opt}}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu - \mu_0}{\sigma_0} \right)^2} d\mu = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\gamma_{opt} - \mu_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) [-] \quad (36)$$

a

$$P(0|1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{\gamma_{opt}}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2} d\mu = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_1 - \gamma_{opt}}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) [-]. \quad (37)$$

Z uvedených rovnic lze vyjádřit BER a dostaneme

$$BER = \frac{1}{2} [P(1|0) + P(0|1)] = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\gamma_{opt} - \mu_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_1 - \gamma_{opt}}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) \right] [-]. \quad (38)$$

Z čehož lze usoudit, že

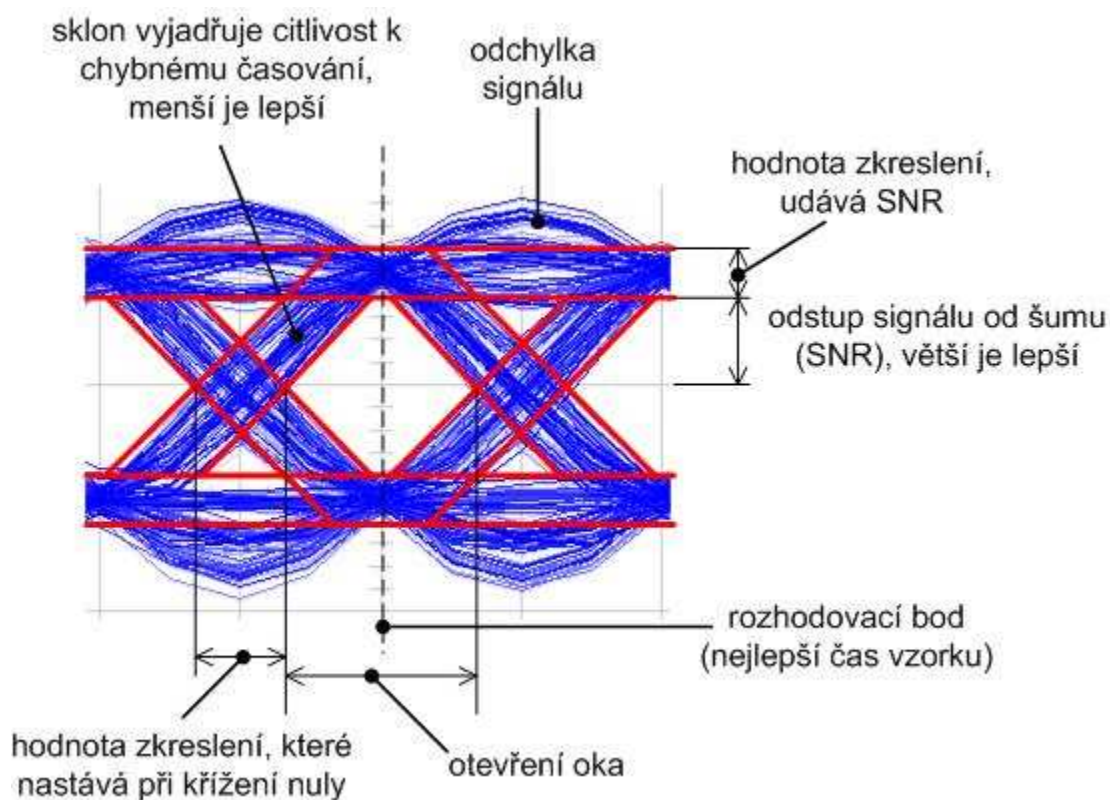
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{e^{(-Q^2/2)}}{Q\sqrt{2\pi}} [-]. \quad (39)$$

Bitová chybovost kanálu BER je pro každý modulační signál odlišná. Závisí i na přenosové rychlosti. Pro přenosovou rychlost $B = 40\text{Gb/s}$ musí být minimálně $BER = 10^{-12}$. [10]

– **Odstup signálu od šumu (SNR)**

Bitová chybovost kanálu (BER) také souvisí s odstupem signálu od šumu (SNR), který je definován jako míra výkonu signálu (P_S) k šumu (P_N). Horizontální část diagramu oka vyznačuje odstup signálu od šumu. Viz Obr. 1.13.

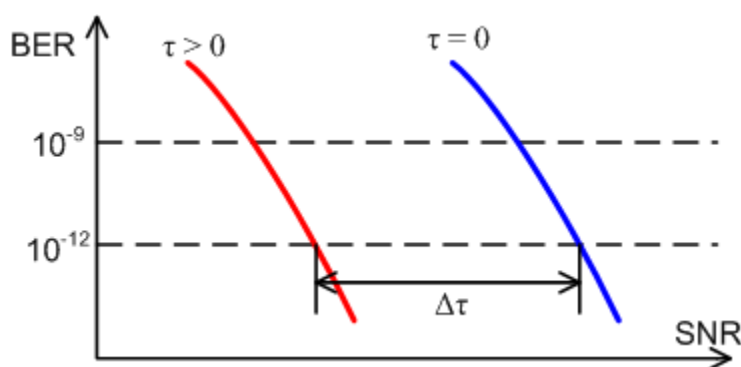
$$SNR = \frac{P_S}{P_N} [-]. \quad 40$$



Obr. 1.13. SNR v diagramu oka.

Odstup signálu od šumu (SNR) můžeme vyjádřit pomocí BER. Čím více se zmenšuje BER, tím větší bude SNR. Na Obr. 1.14 vidíme závislost BER na SNR.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{SNR}{2}} \quad [-]. \quad (41)$$



Obr. 1.14. Pokles diagramu oka (Power Penalty).

– **Pokles diagramu oka (Power Penalty)**

Pokles diagramu oka udává vliv na pokles hodnoty SNR [19]. Vliv poklesu, který má diagram při dané PMD (DGD) lze určit podle vztahu

$$\varepsilon = 2 \frac{A \Delta \tau^2 \gamma (\gamma - 1)}{\vartheta T_{sp}^2} \quad [\text{dB}], \quad (42)$$

kde

A bezrozměrný parametr,

γ výkonový poměr,

$\Delta \tau$ diferenční skupinové zpoždění (DGD),

T_{sp} doba signálového prvku,,

ϑ počet částí jednoho signálového prvku T_{sp} .

Tab. 1.2. Počet částí signálového prvku T_{sp} pro různé modulace.

Modulační formát	Počet částí T_{sp}
NRZ-ASK/DBPSK	$\vartheta = 1$
RZ-ASK/DBPSK	$\vartheta = 2$
NRZ-DQPSK	$\vartheta = 4$
RZ-DQPSK	$\vartheta = 8$

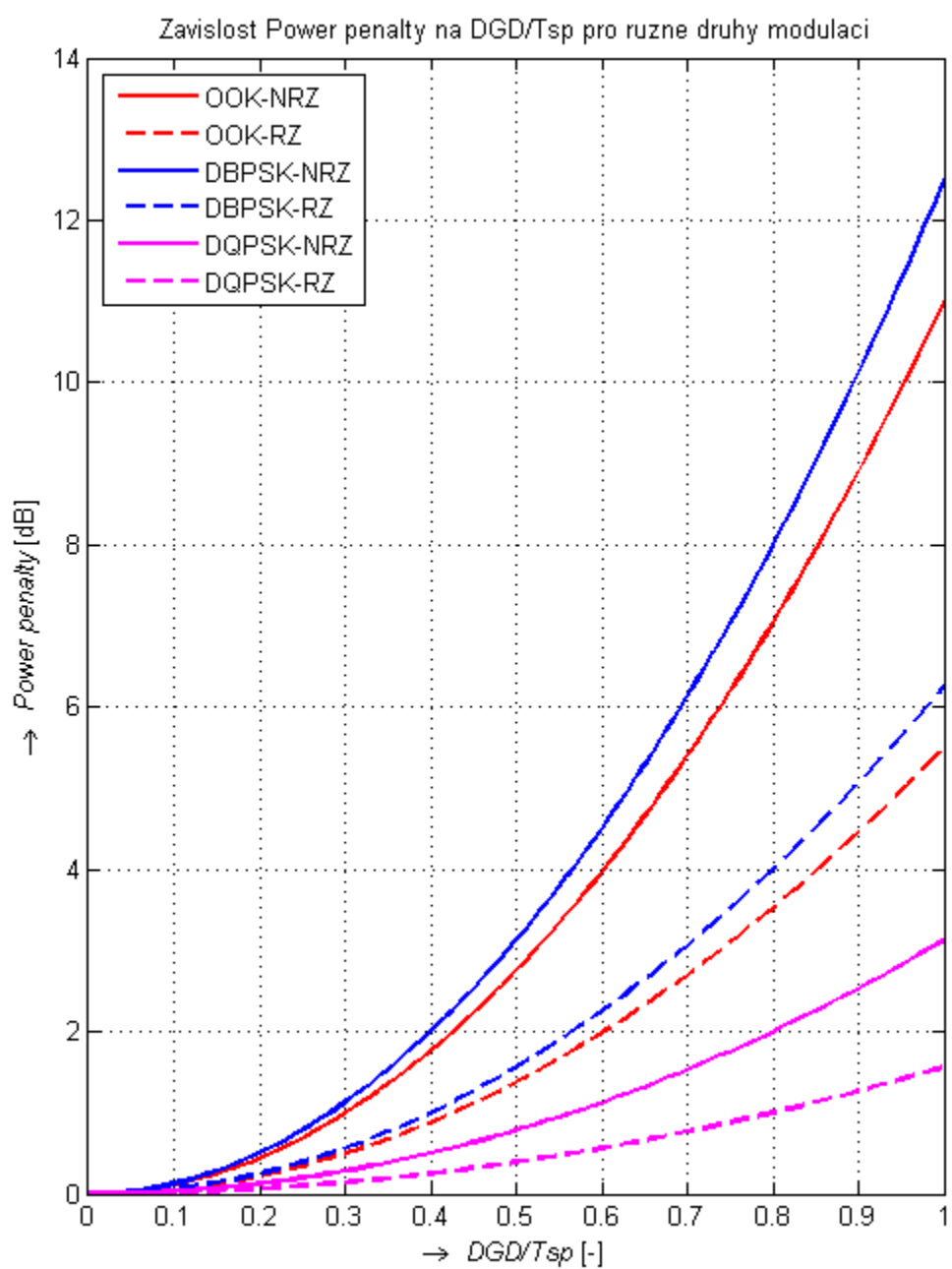
Bezrozměrný parametr A je závislý na druhu a tvaru pulsu, modulačním formátu a charakteristice přijímače. A tedy souvisí s ϑ - počtem částí signálového prvku T_{sp} . Viz Tab. 1.3.

Tab. 1.3. Hodnoty bezrozměrného parametru A .

Modulační formát	Bezrozměrný parametr A
NRZ-ASK / RZ-ASK	$A = 22$
NRZ-DBPSK / RZ-DBPSK	$A = 25$
NRZ-DQPSK / RZ-DQPSK	$A = 25$

Vidíme, že pro modulaci ASK je tento parametr $A = 22$, pro PSK modulace je tento parametr $A = 25$. Pro různý modulační formát se bude bezrozměrný parametr A měnit [13]. Výkonový poměr γ je hodnota v intervalu ($0 \leq \gamma \leq 1$). Obvykle se používá hodnota $\gamma = 0,5$. Obr. 1.15 ukazuje závislost Power Penalty na normované $\langle \text{DGD} \rangle$ (normDGD), která se počítá jako DGD/T_{sp} .

Výraz Power Penalty ε vyjadřuje pokles oka jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru.



Obr. 1.15. Závislost Power Penalty na $\langle DGD \rangle$ pro různé druhy modulací.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Jak bylo zmíněno v úvodu disertační práce, polarizační vidová disperze je v současné době velmi významným omezujícím faktorem optovláknové komunikace. Přehled současného stavu problematiky jasně představuje veškeré negativní jevy, které degenerují užitečný signál přenášený optickým vláknem. Téměř všechny jevy dokážeme předem přesně definovat výpočtem či zpětně stanovit měřením. Současná věda již dávno vyřešila problematiku vidové disperze a disperzi chromatickou lze snadno kompenzovat či dokonce využít ku prospěchu optické trasy. Jediným jevem, který lze stále nedostatečně stanovit před realizací trasy, dokonce ani měřením nezískáme jeho hodnotu v čase se neměnicí, je polarizační vidová disperze. Tento jev je natolik významný, že se stal jevem omezujícím přenosovou rychlost především páteřních tras, které jsou určeny k přenosu na velké vzdálenosti.

Cílem disertační práce je tedy získání hlubokých znalostí o fyzikální podstatě polarizace světla a jejích důsledcích, které pomohou realizovat programové vybavení počítače, jímž bude možné účinně snížit dopady PMD na přenášený signál, PMD dostatečně přesně předpovědět ještě před realizací trasy, stanovit teoretické možnosti kompenzace a získat dostatečný potenciál pro účinné snížení hodnot DGD (Differential Group Delay) u tras již realizovaných. Cílem je dosáhnout těmito prostředky vyšší kapacity optického spoje, tedy zvýšení užitečné přenosové rychlosti. Produktem práce bude soubor nástrojů umožňujících obecně vylepšovat poměry DGD a snižovat celkový podíl omezujících vlivů PMD na optickou trasu.

V Přehledu současného stavu problematiky byl na základě teoretických znalostí vyhotoven soupis možných způsobů omezení významu jevu PMD. Jednoznačným cílem této disertační práce je předejít nutnosti použít kterékoliv z uvedených metod.

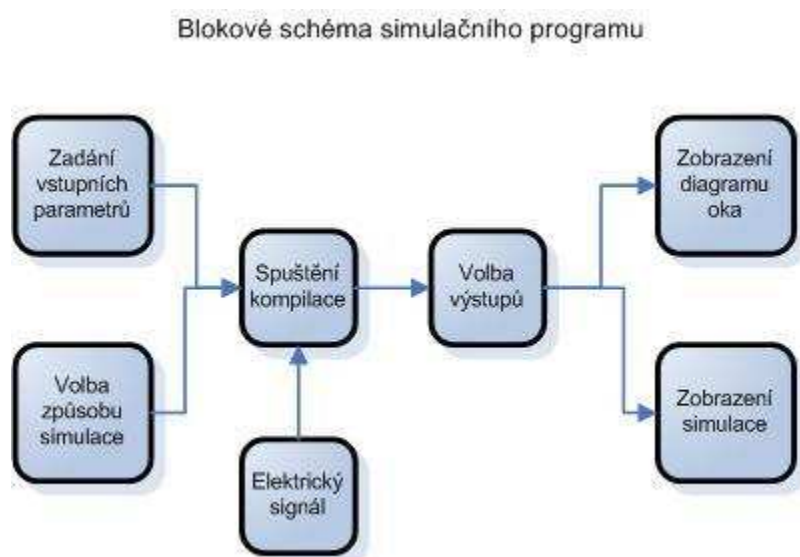
A. Projekční aplikace

Projekční aplikace má za úkol získat celkový přehled o optické trase. Program bude komplexní aplikací umožňující získat celkový přehled o budoucí či stávající optické trase na základě jejích technických údajů. Bude možné vykreslit průběhy základních parametrů jako je útlum, chromatická disperze a polarizační vidová disperze. Základními vlastnostmi bude výběr optických komponent, volba jejich parametrů, možnosti modifikací, načítání knihoven, automatické vyhotovení přehledného protokolu o trase a vykreslení případně tisk doprovodných grafů útlumů a disperzí. Rozšířenou volbou pak bude možné aplikaci zahrnout i do laboratorní výuky předmětu Optické sítě. S nasazením do předmětu je počítáno již při návrhu software. Studenti budou mít možnost volit studijní skupinu a vyplňovat svoje osobní údaje, volit jednotlivé parametry optického spoje a vybírat výsledky do výsledného protokolu, který bude možné snadno exportovat do souboru ve formátu pdf.

Tato aplikace bude naprogramována jako poloprofesionální a její pomocí bude možné projektovat optické trasy různých vzdáleností, typů a kapacit.

B. Vliv použitého modulačního formátu

Velké naděje byly vloženy do studia významu použitého modulačního formátu na výslednou hodnotu PMD. Cílem bylo naprogramovat prostředí MATLAB tak, aby bylo možno testovat na konkrétních optických trasách použití jednotlivých modulačních formátů se zahrnutím vlivu polarizační vidové disperze. V rámci stanovování cílů práce bylo vypracováno blokové schéma simulačního programu podle Obr. 2.1



Obr. 2.1. Původní schématický diagram simulace v prostředí MATLAB.

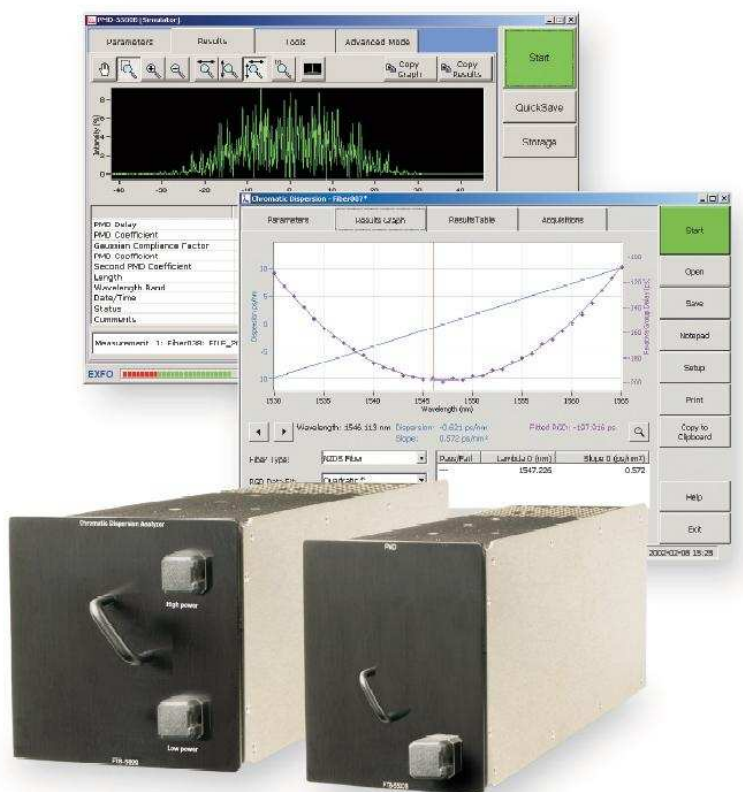
V teoretickém úvodu práce jsou představeny ve vláknové optice používané modulační formáty. Aby bylo možno získat věrohodné výsledky, je nutné modulační formáty naprogramovat a postupně odsimulovat pro různé druhy optických vláken s odlišnými měrnými hodnotami PMD udávanými výrobcem vlákna.

Plánovaným výstupem jsou grafy poklesu diagramu oka „Power Penalty“, díky nimž bude možné stanovit odolnost jednotlivých modulačních formátů vůči polarizační vidové disperzi.

C. Praktické ověřování výsledků

Významnou částí disertační práce by mělo být praktické ověření výsledků. Splnění tohoto bodu je velmi významným cílem, jelikož teoreticky získané hodnoty (buť získané propracovanými simulacemi) nemusí nutně korespondovat s reálnými výsledky, které lze získat pouze spolehlivými měřicími přístroji. Ke splnění tohoto cíle byl

vytipován měřicí přístroj FTB-5500B společnosti EXFO, který je dále představen (Obr. 2.2).



Obr. 2.2. CD Analyzer – FTB-5500B (vpravo) a PMD Analyzer – FTB-5800.

Mezi základní vlastnosti přístroje EXFO FTB-5500B patří:

- maximální doba měření libovolného rozsahu 5 s,
- absence autokorelační špičky pro vyšší přesnost,
- NIST (National Institute of Standards and Technology),
- vhodný pro vnitřní i vnější měření,
- schopnost měřit skrz EDFA zesilovače,
- schopnost měřit při přenosových rychlostech do 100 Gbit/s.

Měřicí modul FTB-5500B je kompatibilní s platformou FTB-400 Universal Test System, kterou je nutno použít jako základní přenosnou stanici. Podrobná specifikace použitého měřicího přístroje je uvedena v tabulce Tab. 2.1.

Rozsah vlnové délky (nm)	1260 až 1675 (pásmo O až U)
Rozsah měření (ps)	0 až 115
Citlivost (dBm)	-45
Doba měření (s)	4,5 (pro každý náměr)
Absolutní chyba	$\pm (0,020 + 2 \% \text{ of PMD})$
Možnost měřit skrz zesilovače EDFA	maximálně 120 zesilovačů
Provozní teplota	0 °C až 40°C
Skladovací teplota	-40 °C až 70 °C
Relativní vlhkost okolí	0 % až 93 %
Rozměry (výška × šířka × hloubka)	96 × 76 × 260 mm
Hmotnost (samotného modulu)	1500 g

Tab. 2.1. Specifikace přístroje FTB-5500B.

Dále byl vytipován profesionální softwarový nástroj ToolBox 6 s nainstalovanými kity Polarization Mode Dispersion Analyzer a Polarization Mode Dispersion Analyzer Version B, aby bylo možné naměřené výsledky zpracovat a přehledně vyhodnotit.

Měřicí přístroj FTB-5500B používá interferometrickou metodu měření GINTY (General analysis INTY) [23].

D. Shrnutí

Pomocí navržených softwarových aplikací bude možné získat maximální množství dostupných údajů o stávající či budoucí optické trase. Výsledky simulací povedou k efektivnímu odhadu výsledné hodnoty polarizační vidové disperze. Dílčí výsledky povedou ke snadnému zjištění nejslabšího místa trasy z hlediska disperze a pomohou při plánování vysokokapacitních dálkových optických tras. Výsledky simulací nebudou sloužit pouze ke stanovení konečných hodnot omezujících polarizačních faktorů, ale s výhodami bude možné stanovit příčiny jednotlivých vlivů a účinně jim předcházet. Nezanedbatelnou výhodou je zamýšlené zpracování obtížného matematického aparátu fyziky polarizace světla do přehledných grafických vyobrazení s možností volby vstupních parametrů.

Díky parciálním výsledkům bude možné usuzovat na příčiny zhoršených poměrů a lokalizovat tak místo s největším podílem na přírůstek celkové hodnoty PMD. A konečně bude součástí vyhodnocení i srovnání teoreticky získaných hodnot s prakticky získanými – naměřenými na existujících optických trasách. K měření bude použit přístroj FTB-5500B. Dostatečný vzorek naměřených hodnot DGD (Differential Group Delay) bude nutné ke spolehlivému stanovení celkové polarizační vidové disperze. Vzájemným porovnáním vypočtených a naměřených hodnot bude možné vyhodnotit úspěšnost celé práce. V případě korespondence nejen celkových, ale i parciálních výsledků se navržené aplikace mohou stát profesionální součástí

návrhových programů pro projektanty vysokorychlostních páteřních (případně multiplexních) optických spojů.

Velkým přínosem práce bude též možnost do jisté míry předpovídat hodnoty PMD jednotlivých úseků optických tras a možnost jejich snižování a účinného potlačení parciálních hodnot DGD a tím i výsledné snížení celkové hodnoty PMD celé optické trasy.

3. PŘEHLED DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Postupně jsou představovány dílčí závěry a výsledky disertační práce.

Prvním výstupem je statistický kalkulátor využívající metodu Monte Carlo pro vyhodnocení naměřených hodnot diferenciálního grupového zpoždění. Výpočet probíhá na základě doporučení ITU. Matematický aparát je součástí doporučení např. ITU G.652.

Významnou částí výsledků disertační práce je vytvořená návrhová aplikace, která byla naprogramována jako poloprofesionální a může sloužit k výuce a projektování optických tras různých typů. Jako jediný z výstupů této práce zahrnuje vliv útlumu, chromatické a polarizační vidové disperze na optický signál.

Matematicky nejnáročnější operace byly zmechanizovány v podkapitole C, která představuje simulační aplikace umožňující vyhodnotit vlivy PMD u multiplexních systémů a následně umožňuje simulovat jejich omezení při měnících se vstupních parametrech. Čistě pro přehlednost a názornost byla vytvořena aplikace Momentka PMD, díky níž lze vykreslit okamžitý průběh rychlé a pomalé osy v libovolném bodě optické trasy.

Nejobsáhlejší částí je subkapitola D této kapitoly „Vliv modulačních formátů na PMD“, ve které je představena kompletní studie s výsledky získanými simulacemi a ověřenými srovnáním s výstupy jiných vědců. Přehledná obrazová dokumentace je uvedena odděleně v přílohách A, B, C a D.

Posledním výstupem jsou cenná praktická ověření výsledků, kterých bylo dosaženo zejména díky možnosti použití měřicího přístroje FTB-5500B. Srovnáním výsledků získaných simulacemi a hodnot prakticky naměřených je práce zakončena.

A. Výpočet PMD statistickou metodou Monte Carlo

Jak je uvedeno v kapitole 1, podstata polarizační vidové disperze neumožňuje její snadný výpočet v libovolném bodě optického vlákna. Pro snadné určení celkové hodnoty PMD je vhodné použít aplikaci Výpočet PMD, která byla v rámci této disertační práce naprogramována v programovacím jazyce Object Pascal ve vývojovém prostředí Delphi 7. Hlavní předností aplikace je její snadná obsluha, uživatelsky vhodné vyhnutí se nepříjemným matematickým operacím a konečně i přehledné grafické výstupy. Matematický aparát vychází částečně z principu polarizace světla podrobně popsané v rámci podkapitol C a D kapitoly 1 a částečně z výpočtu pomocí statistických metod (např. Monte Carlo).

V následujících odstavcích je uveden způsob výpočtu hodnoty PMD_Q metodou Monte Carlo, která byla využita při programování aplikace Výpočet PMD. Ostatní metody výpočtu jsou uvedeny v normě IEC 61282-3 [11].

– Výsledek

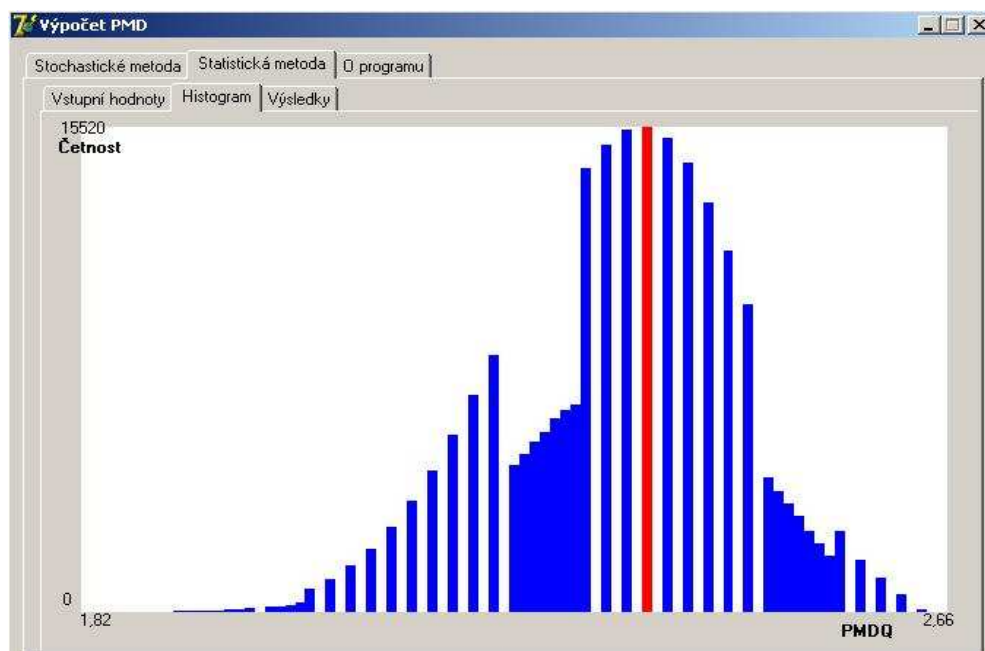
Jednotlivé naměřené hodnoty PMD označíme jako x_i , kde i nabývá hodnot v rozsahu 1 až N , kde N je celkový počet měření. Touto metodou stanovujeme střední hodnotu veličiny, která je výsledkem náhodného děje (v tomto případě jen částečně náhodného). Následně je vytvářen počítačový model, a pokud číslo N je dostatečně velké, lze hodnoty již dále zpracovávat klasicky. Pak je možné stanovovat i průměr a směrodatnou odchylku. Naměřené hodnoty jsou proto použity k vygenerování 100 000 navazujících hodnot PMD, z nichž je následně vypočtena střední kvadratická odchylka dvaceti náhodných hodnot jako výběru z celku. Příkladem výpočtu může být následující: je-li $N = 100$, je možných hodnot celkem $5,3 \cdot 10^{20}$. Pro každou vypočtenou hodnotu je vybráno 20 náhodně vybraných čísel z rozsahu 1- N . Vybrané hodnoty jsou následně označeny indexem “ k ”. Výslednou hodnotu koeficientu PMD pak aplikace získá na základě vztahu

$$y = \left(\frac{1}{20} \sum_{k=1}^{20} x_k^2 \right)^{1/2} . \quad (43)$$

Všechny hodnoty jsou následně znázorněny v histogramu, vykreslí se výsledná pravděpodobnostní funkce a stanoví konečná hodnota PMD s přesností 99,99%. Podrobný popis metody Monte Carlo je součástí například doporučení ITU-T G.652 (Appendix IV) [7].

Je možné zvolit, která metoda výpočtu bude aplikována na vstupní soubor dat. K dispozici jsou dvě základní: Monte Carlo a Metoda analýzy vlastních čísel Jonesovy matice (dále jen JME), přičemž doplnění dalších výpočtových postupů je velmi snadné. Metoda Monte Carlo byla vybrána, jelikož reprezentuje statistické metody a je mezi těmito metodami nejpoužívanější, kdežto metoda JME patří do stochastických metod, přičemž pro výpočet polarizační vidové disperze využívá Jonesových matic a vektorů. Metoda JME je zkušební metoda založená na měření normalizovaných Stokesových parametrů při použití dvou blízkých vlnových délek. Z normalizovaných Stokesových parametrů pak lze vypočíst vlastní čísla Jonesovy matice pro každou vlnovou délku zvlášť a z těchto hodnot následně stanovit diferenciální skupinové zpoždění na střední vlnové délce. Při programování byl použit popis metody v rámci ČSN EN 61290-11-1 (359271) [12], kde je matematický aparát zpracován velmi přehledně a proto je součástí této práce jen okrajově v rámci Kapitoly 1 (podkapitoly C a D).

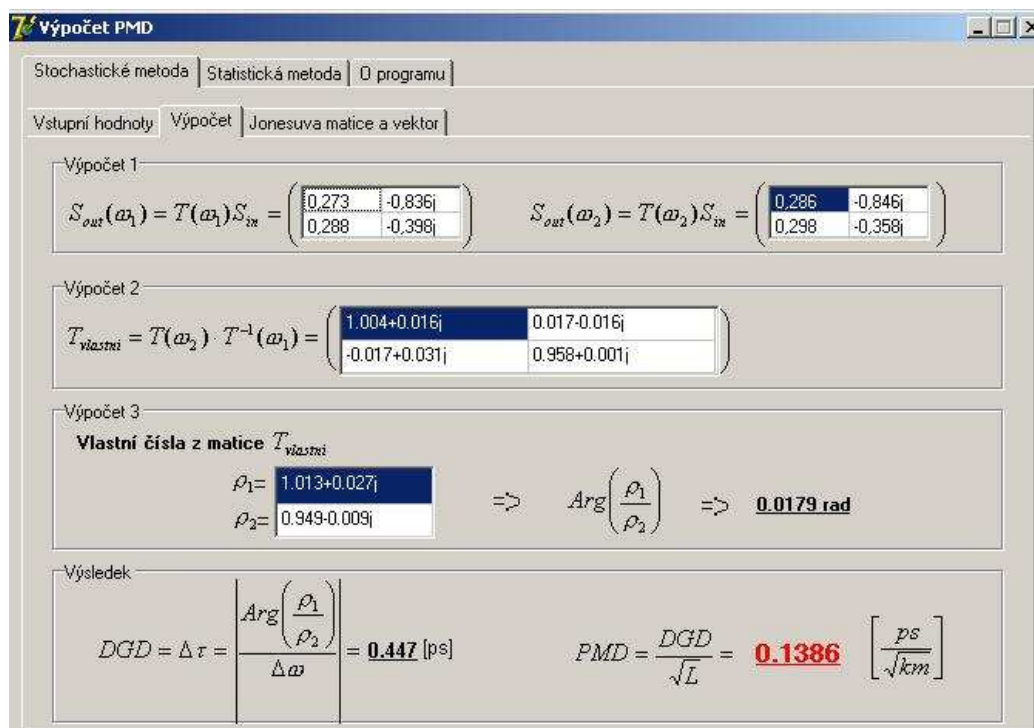
Při spuštění programu a výběru záložky s Monte Carlo metodou lze zadat vstupní hodnoty. Vstupní hodnoty, které jsou při spuštění programu vyplněny, jsou pouze ilustrativní a je možné je měnit podle skutečně naměřených hodnot. Na této podzáložce se vstupními hodnotami je možné načíst soubor s naměřenými hodnotami PMD, nastavit délku optického vlákna a vybrat použitou přenosovou rychlost. Výběrem položky „Histogram“ lze vykreslit výsledný graf histogramu, ve kterém je zvýrazněna hodnota PMD_Q s nejvyšší četností, viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1. Hlavní záložka statistické metody Monte Carlo.

Podzáložka nazvaná „Výsledky“ obsahuje vypočtenou hodnotu PMD_Q a také komentáře, které pro dané optické vlákno definují maximální délku vlákna se zvolenou přenosovou rychlostí či zda vypočtená hodnota PMD_Q nesplňuje vybranou přenosovou rychlost. V opačném případě aplikace doporučí nejbližší vyhovující přenosovou rychlost při zachování délky optického vlákna.

Při zvolení programové části JME lze analogicky zadat vstupní hodnoty. Těmito veličinami jsou Jonesovy přechodové matice, vstupní vektor polarizovaného záření, délka optického vlákna a vlnová délka. Postupy výpočtu PMD a jeho dílčí výsledky jsou uvedeny v Obr. 3.2, kde nalezneme výpočet výstupních vektorů $S_{out}(\omega_1)$ a $S_{out}(\omega_2)$ popisujících polarizaci na konci optického vlákna. Z výpočtu matice T lze následně stanovit vlastní čísla pro výpočet DGD. Vlastní čísla i argument z podílu těchto dvou vlastních čísel jsou vypsány pod vypočtenou matici $T_{vlastní}$. Posledním a nejdůležitějším výpočtem je výpočet DGD.



Obr. 3.2. Podzáložka s výpočty u JME metody.

– Závěr

Výsledek kalkulace je pak zobrazen v závislosti na délce optického vlákna zcela dole na Obr. 3.2. Přínos vytvořené aplikace je tak nesporný. Jeho výstupy sice nepřinášejí žádný nový vědecký objev, avšak jednoznačně usnadňují práci se soubory naměřených hodnot PMD a výrazně zjednodušují výpočty pomocí Jonesových a Stokesových parametrů. Jak se později ukázalo, příprava této aplikace byla nutnou podmínkou pro splnění zadání disertační práce, jelikož její výstupy byly mnohokrát použity při vyhodnocování výsledků jak projekčních aplikací, tak později i experimentálně získaných hodnot (v podkapitolách B, C a 4 této části práce).

B. Návrhová aplikace

Hlavním cílem řešení této části bylo vytvořit pro další potřebu takové programové vybavení počítače, které umožňuje modelovat disperzní vlastnosti optických komunikačních tras a následně určit vliv těchto parametrů na přenášený signál. Během studia problematiky se ukázalo, že je nutno disponovat maximálním počtem informací o trase, abychom mohli stanovit skutečně objektivní příčiny zhoršených disperzních parametrů. Tato simulace umožní získat komplexní přehled o disperzních poměrech podél optického vlákna a umožní operativně měnit parametry a komponenty uvažované optické trasy. Počáteční snahou byla jednoduchost aplikace a zároveň variabilita přidávaných komponent, aby mohla být nasimulována libovolná trasa dle potřeby. Jako dostatečný výstup byl stanoven ucelený protokol demonstrující měření útlumu,

chromatické a polarizační vidové disperze a zobrazení hodnot v grafech s možností odečítat hodnoty v libovolném místě optické trasy.

Program obsahuje databázi všech základních stavebních prvků optických systémů (zdroje, detektory, vlákna, kompenzační vlákna, konektory, zesilovače a útlumové články). Popis kompletní vytvořené trasy lze uložit do protokolu ve formátu HTML a následně vytisknout.

– Výsledek

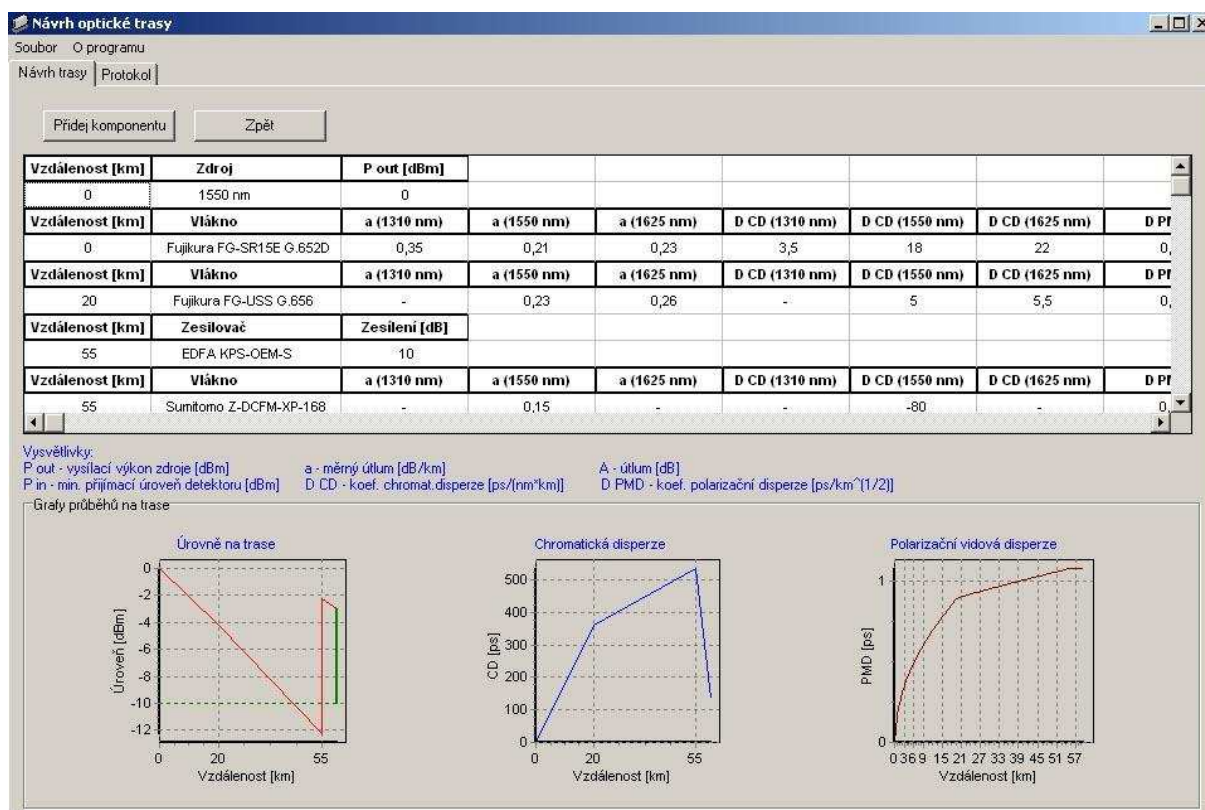
Aplikace byla naprogramována ve vývojovém prostředí Borland C++ Builder 6.0. Celou aplikaci tvoří šest formulářů (Form1 - hlavní obrazovka, návrh a zobrazení trasy, grafů, a tvorba protokolu, Form2 - zadání informací o uživateli, Form3 - okno se zvětšenými grafy, Form4 - výběr prvků trasy, Form5 - vložení závěru, Form6 - okno informací o aplikaci). Hlavní obrazovka je rozdělena na dva základní panely: Návrh trasy a Protokol.

Návrh trasy

Po spuštění programu se zobrazí jako základní panel návrh samotné optické trasy. Vzhled je patrný z Obr. 3.3. Hlavním prvkem je tabulka, do které uživatel přidává jednotlivé prvky trasy po zvolení tlačítka „Přidej komponentu“. Vedle je tlačítko „Zpět“, které smaže naposled vloženou komponentu. Pod tabulkou jsou umístěny tři prvky pro zobrazení grafů, konkrétně pro vykreslení úrovní na trase, průběhu chromatické disperze a průběhu polarizační vidové disperze.

Protokol

V panelu Protokol jsou hlavními prvky okna pro zobrazení HTML zdrojového kódu vytvářeného protokolu a pod ním okno pro zobrazení již zkompilovaného HTML kódu ve výchozím prohlížeči. Dále jsou zde tlačítka pro generování protokolu „Vytvoř protokol“, vložení závěru „Vlož závěr“ nebo zobrazení aktuálního „Zobraz protokol“. V horní části jsou pak obrázková tlačítka pro okno se zdrojovým HTML kódem „Nový“, otevření „Otevřít“ a uložení „Uložit“.



Obr. 3.3. Návrh trasy.

Výpočty a grafy

Klíčovou funkcí tohoto programu je samozřejmě výpočet přenosových parametrů trasy a jejich vynesení do grafů. Provádí se výpočet útlumu trasy (resp. výkonové úrovně trasy) a výpočet chromatické a polarizační vidové disperze.

Jelikož se zejména vlákna, podle různých doporučení, provozují na specifických vlnových délkách, je možno si vybrat, na jaké vlnové délce bude trasa pracovat vybráním zdroje, tedy buď na 1 310 nm, 1 550 nm nebo 1 625 nm. Při všech výpočtech, u kterých je to nutné, se pak volba vstupních dat rozhoduje podle hodnoty proměnné λ .

Výpočet útlumu trasy a chromatické disperze je jednoduchý, dochází pouze ke sčítání/odečítání hodnot útlumu/zisku, resp. hodnot chromatické disperze jednotlivých komponent. Situace u polarizační vidové disperze je složitější, hodnota polarizační vidové disperze PMD [ps] pro úsek vlákna o délce L je

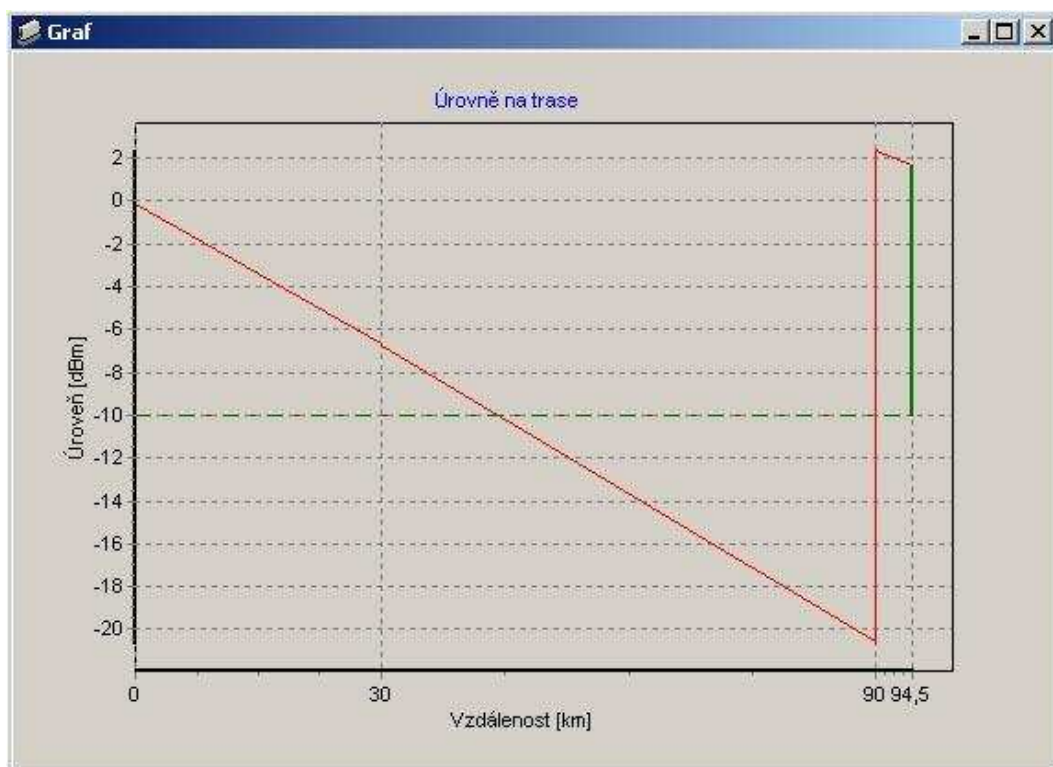
$$PMD = D_{PMD} \times \sqrt{L} \quad [\text{ps}]. \quad (44)$$

Při spojování různých vláken za sebe pak platí, že výsledná hodnota PMDcelk [ps] je

$$PMD_{CELK} = \sqrt{PMD_1^2 + PMD_2^2 + \dots + PMD_n^2} \quad [\text{ps}]. \quad (45)$$

Prvním prvkem trasy musí být vždy zdroj. Když tedy uživatel vybere zdroj, provede se vymazání formuláře pro výběr prvků a dojde k opětovnému naplnění formuláře

všemi dostupnými prvky kromě zdroje. Dále se hodnota proměnné „utlum_celkove“ nastaví na hodnotu, kterou má výstupní výkon zdroje zařízení. Tato hodnota se také vynese do grafu úrovně na trase jako výchozí hodnota.



Obr. 3.4. Ukázka grafu závislosti úrovně na délce optické trasy.



Obr. 3.5. Ukázka grafu závislosti velikosti PMD na délce optické trasy.

– Závěr

Aplikace byla vytvořena jako poloprofesionální, umožňující pohodlnou, plnohodnotnou a komplexní projekci optických tras. Byla nasazena v laboratorních cvičeních předmětu Optické sítě (za tímto účelem byl vypracován návod k laboratorní úloze) a její výstupy byly odprezentovány v zahraničním časopise [31].

C. Simulační aplikace

Pro snadné získání potřebných výsledků a možnosti jejího vzájemného porovnání bylo nutno zmechanizovat velmi náročný matematický aparát. Matematické operace Schrödingerových rovnic, Jonesových a Stokesových vektorů je velmi obtížné ručně zpracovávat, zejména pokud se jedná o zpracování desítek či stovek měření získaných hodnot diferenciálního grupového zpoždění. Třetí aplikací je čistě pro přehlednost a názornost vytvořená aplikace Momentka PMD, díky níž lze vykreslit okamžitý průběh rychlé a pomalé osy v libovolném bodě optické trasy.

– Vyhodnocení vlivu PMD u multiplexních systémů

Matematickým modelem šíření optického pulsu ve vlákne je nelineární Schrödingerova rovnice (NLSE, NonLinear Schrödinger Equation). Klasická NLSE představuje skalární popis šíření světla, ovšem to je v současnosti nedostačující, jelikož při současných vyšších přenosových rychlostech se výrazně uplatňuje vliv PMD. U PMD uvažujeme dvě kolmé polarizované složky vidu šířící se optickým vláknem zvlášť, proto se zavedly vázané NLSE, kde jednotlivé rovnice popisují šíření každé polarizované složky, a tím jsme schopni zahrnout i vliv PMD. NLSE je parciální diferenciální rovnice a její numerické řešení není jednoduché. Pro řešení těchto typů rovnic se prakticky používá Split-Step Fourierova metoda (SSFM).

Odvození nelineární Schrödingerovy rovnice (NLSE) vychází z Maxwellových rovnic a lze ho nalézt např. v literatuře [3] nebo [5]. Úplnou NLSE lze formulovat následovně:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a(z,t)}{\partial z} = & -\frac{\alpha}{2}a(z,t) - \beta_1 \frac{\partial a(z,t)}{\partial t} - j\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 a(z,t)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 a(z,t)}{\partial t^3} + \\ & + j\gamma |a(z,t)|^2 a(z,t) - j\gamma \cdot T_R \frac{\partial |a(z,t)|^2}{\partial t} a(z,t) - \frac{\gamma}{\omega_0} \frac{\partial |a(z,t)|^2}{\partial t} a(z,t), \end{aligned} \quad (46)$$

kde

$a(z,t)$ je průběh intenzity optického signálu ve vlákne (dále jen a),

z vzdálenost,

t čas,

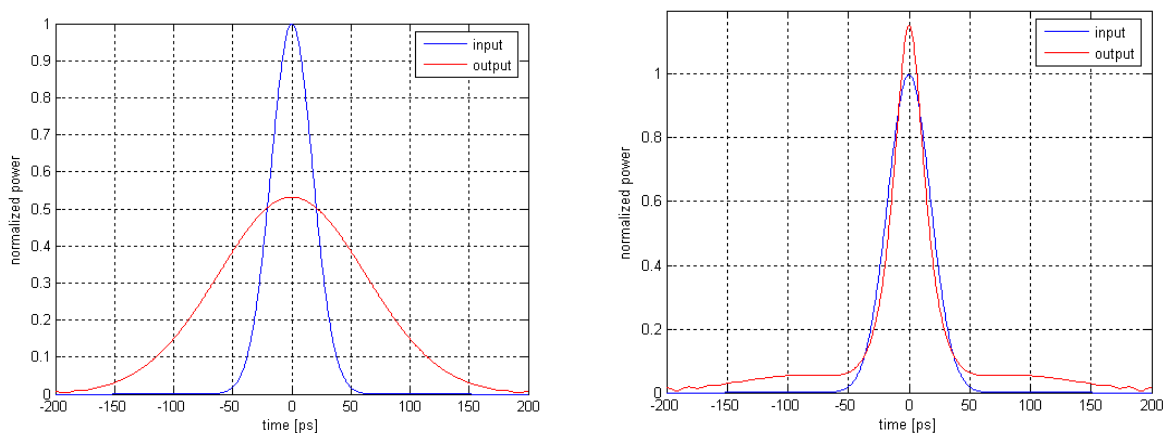
α útlum vlákna,
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ disperzní koeficient prvního, druhého a třetího řádu,
 γ nelineární koeficient [5].

Jednotlivé členy rovnice postupně vyjadřují lineární útlum, disperze 1. řádu, disperze 2. řádu, disperze 3. řádu, Kerrův jev, stimulovaný Ramanův rozptyl (frekvenční přeliv energie) a poslední člen vyjadřuje změnu strmosti pulzu. Podrobně je složitý matematický aparát popsán ve vlastní publikaci [30].

Navržený program realizovaný v prostředí MATLAB porovnává šíření optického pulsu s a bez uvažování PMD. Vstupní hodnoty pro výpočet jsou vybrány tak, aby odpovídaly reálným parametrům resp. uváděným katalogovým hodnotám. Pro názornost jsou, s výjimkou chromatické disperze, zcela zanedbány ostatní vlivy působící na signál přenášený optickým vláknem. Toto zjednodušení umožní efektivně srovnat výstupní signál se vstupním. Další parametry vlákna jsou

$$n_2 = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W} \text{ a } A_{\text{ef}} = 50 \text{ } \mu\text{m}^2.$$

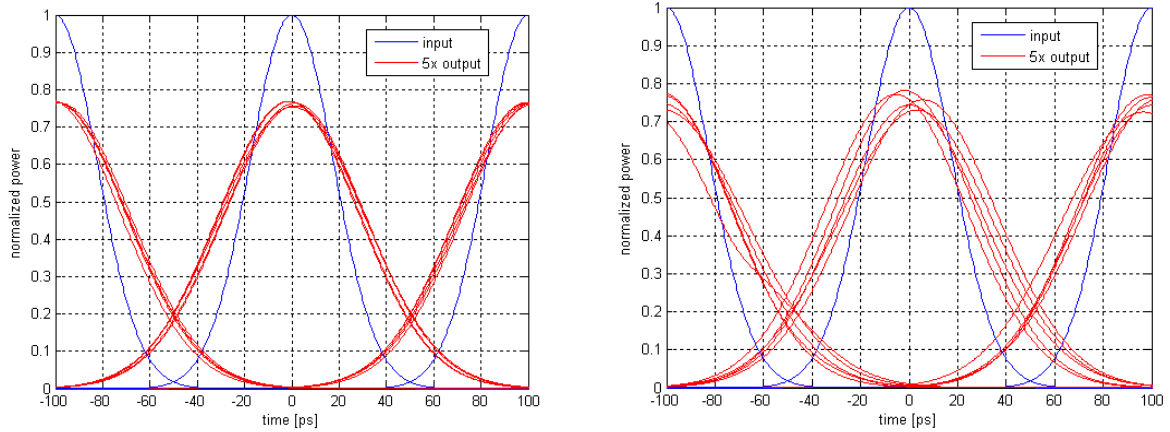
Přenášen je klasický gaussovský impuls bez rozmítání, tj. $C = 0$, $m = 1$. Vlnová délka světelného vidu je 1550 nm. Zbývající parametry jsou následně vždy uvedeny u příslušných simulací. Na obrázku Obr. 3.6 je zobrazeno šíření impulsu na vzdálenost 50 km s $D = 17 \text{ ps/nm.km}$ a šířkou pulsu $T_0 = 50 \text{ ps}$. Výstupní puls se vlivem chromatické disperze zplošťuje a při kritických hodnotách by zasahoval do vedlejších bitů. Při vyšších hodnotách výkonu se začne uplatňovat i Kerrův efekt a při výkonech nad přibližně 0,4 W je dle výpočtů signál již nečitelný. Na obrázku Obr. 3.6 je patrné, že při vyšším výkonu může dojít ke zvýšení strmosti pulsu a možné kompenzace chromatické disperze, avšak při zahrnutí vlivu PMD je zhoršení signálu výrazné. V praxi jsou používány výkony řádu 0 dBm, čemuž odpovídají uvedené simulace.



Obr. 3.6. Impuls bez PMD při $P_0 = 1 \text{ mW}$ (vlevo) a při $P_0 = 50 \text{ mW}$ (vpravo).

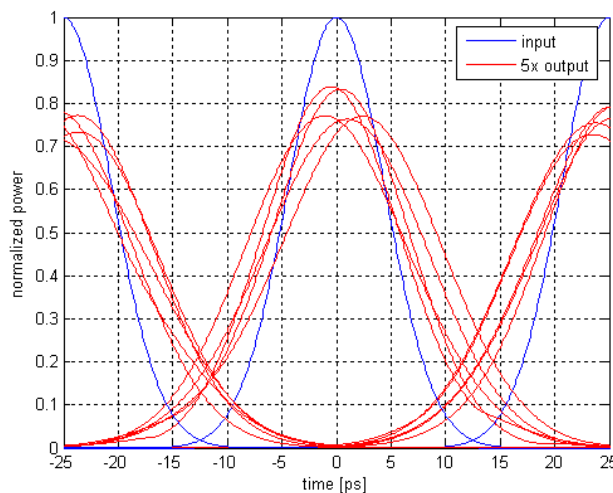
Na obrázku Obr. 3.7 vidíme, jak velikost PMD ovlivňuje přenášený signál. U přenosové rychlosti 10 Gb/s a kódování RZ je vliv méně významný a pokud uvažujeme, že výrobci vláken garantují velikosti $PMD < 0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, pak při srovnání s hodnotami při simulacích zjistíme, že vliv nebude významný. Problém může nastat

u stávajících starších typů vláken nebo při vyšších přenosových rychlostech. Hodnota $T_0=50$ ps je určena tak, aby výpočet odpovídal RZ kódování u přenosu 10 Gb/s, signál je přenášen 20 km s $D = 17$ ps/nm.km, $P_0=1$ mW.



Obr. 3.7. Diagram oka $D_{\text{PMD}} = 1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$ (vlevo) a $D_{\text{PMD}} = 3$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

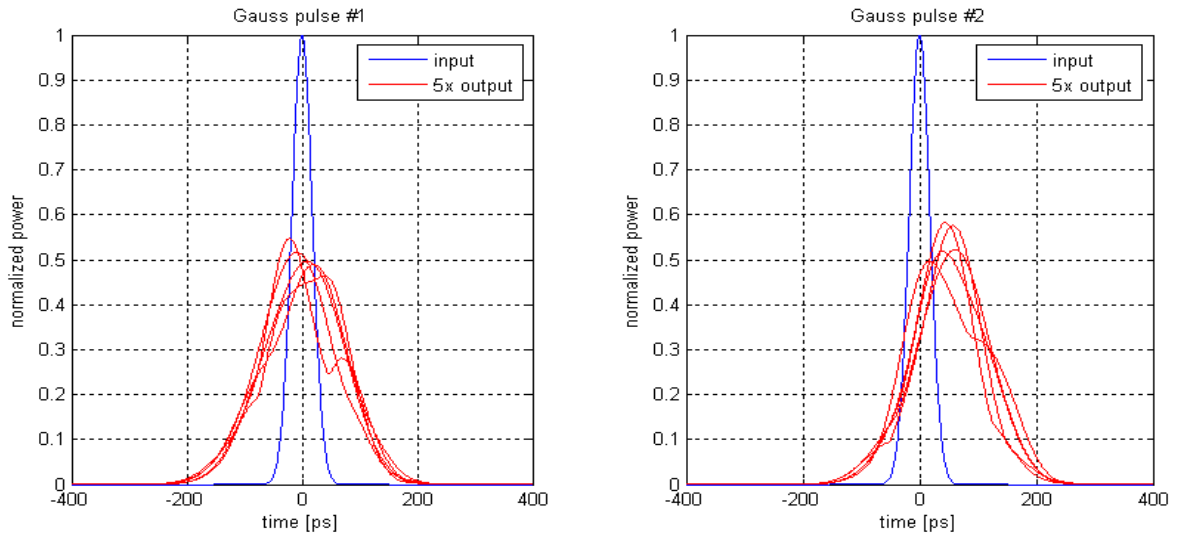
Na obrázku Obr. 3.7 můžeme srovnat, jak se bude lišit výstupní signál při vyšších hodnotách PMD, při dalším zvyšování D_{PMD} již signál bude více degradovaný. Při přenosových rychlostech přes 40 Gb/s (tedy při šířce pulsu $T_0 = 12,5$ ps) chromatickou disperzi snížíme na $D = 1$ ps/nm.km, protože signál bude na tuto disperzi více náchylný, a ponecháme-li $D_{\text{PMD}} = 1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$, můžeme srovnat Obr. 3.7 s Obr. 3.8. Z čehož vyplývá, že výstupní signál je značně horší než na Obr. 3.7. Při přenosových rychlostech 40 Gb/s je vliv disperzí mnohem významnější a na zařízení této technologie musí být kladeny náročnější požadavky. U moderních zařízení se při takto vysokých přenosových rychlostech používají již nové typy kódování než RZ.



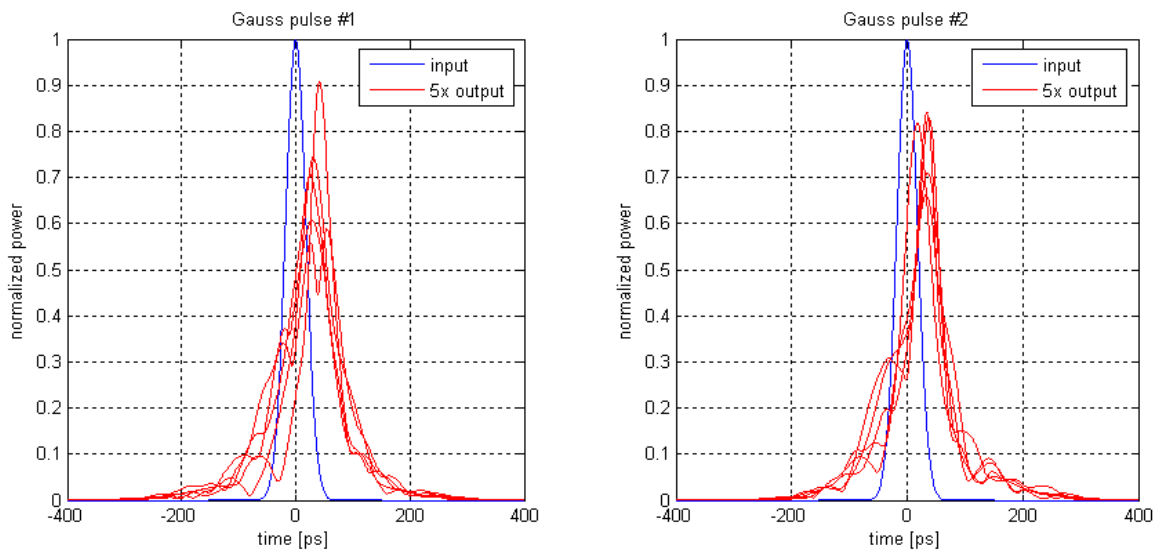
Obr. 3.8. Diagram oka odpovídající 40 Gb/s a RZ kódování, $D_{\text{PMD}}=1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

Uvažujme multiplexní přenosy zahrnující vliv XPM [30] a dvě vlnové délky 1550 nm a 1551 nm, vzdálenost 50 km a $T_0= 50$ ps, $D = 17$ ps/nm.km, $P_0 = 1$ mW. Zvolíme

hodnoty $d_1 = -100 \cdot 10^{-16}$, $d_2 = 20 \cdot 10^{-16}$, $d_3 = 100 \cdot 10^{-16}$. Obr. 3.9 zobrazuje výsledek výpočtu. Signály jsou časově posunuty a velikosti DGD se mohou pro obě vlnové délky lišit. Zvýšíme-li P_0 na 50 mW, pak výstupní signál je vyobrazen na Obr. 3.10. Vliv nelineárních jevů je při zvyšování výkonu pulsu více patrný než v případech, kde figurovala pouze jedna vlnová délka, především na krajích pulsu.



Obr. 3.9. Výsledek přenosu pulsů na blízkých vlnových délkách, $P_0 = 1$ mW.



Obr. 3.10. Výsledek přenosu pulsů na blízkých vlnových délkách, $P_0 = 50$ mW.

U výše uvedených simulací je při zahrnutí vlivu PMD zobrazeno vícero výstupních pulsů, smysl vyplývá z principu vzniku PMD popsaného v kapitole 1. Kvůli přehlednosti a rychlosti bylo zvoleno pět pulsů, ale v aplikaci lze pochopitelně nastavit libovolný počet.

Výsledky této subčásti disertační práce byly publikovány v zahraničním časopise [30].

– Omezení vlivu PMD u multiplexních systémů

Principem odstranění následků polarizační vidové disperze pomocí použití vlnového multiplexu je snížení přenosové rychlosti na jeden kanál. V MATLABu naprogramovaná aplikace umožňuje jednoduše demonstrovat použití multiplexního systému a zobrazí přímo tabulku hodnot (teoretických vzdáleností) a grafy.

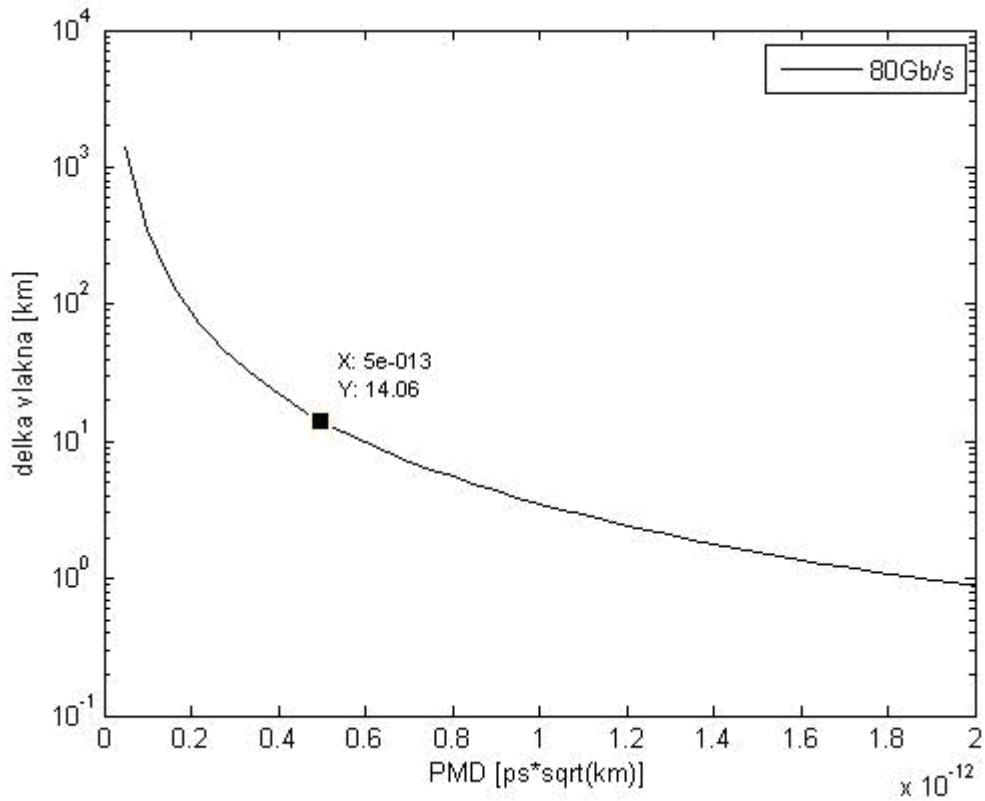
Vstupními hodnotami je vždy hodnota polarizační vidové disperze v $\text{ps.km}^{-1/2}$ a požadované přenosové rychlosti v Gb/s. Následuje výpočet maximální teoretické délky vlákna s jedním kanálem, v systému „hustého“ vlnového multiplexu (DWDM) a v systému „řídkého“ vlnového multiplexu (CWDM). Aplikace zobrazuje závislost PMD na vypočítané délce vlákna pro zadanou přenosovou rychlost a vypočte maximální teoretickou přenosovou rychlost na zadaném úseku pro jeden kanál a pro systémy vlnových multiplexů. Následuje uživatelské zadání požadované délky vlákna v [km]. A konečně závěrečný výpočet, jehož výsledkem je vykreslení Maxwellovy křivky hustoty pravděpodobnosti.

Z testování aplikace pro různé hodnoty a vyhodnocení množství souborů hodnot z náměrů diferenciálního grupového zpoždění byla vytvořena tabulka Tab. 3.1 obsahující srovnání délek vlákna pro různé hodnoty PMD a dvě hodnoty přenosových rychlostí.

Tab. 3.1. Srovnání délek vlákna pro různé hodnoty PMD a přenosovou rychlost.

PMD $\text{ps.km}^{-1/2}$	teoretická délka vlákna v km					
	pro 80 Gb/s			pro 1 Tb/s		
	1 kanál	CWDM	DWDM	1 kanál	CWDM	DWDM
0,5	14	4000	360000	0,09	26	2304
1	3,5	1016	90000	0,022	6,5	576
1,5	1,5	451	40000	0,01	2,89	255
2	0,8	254	22500	0,005	1,6	144

Pro jednotlivé systémy vykresluje aplikace logaritmické grafy závislosti délky vlákna na polarizační vidové disperzi. Tyto závislosti Obr. 3.11 jsou zajímavé svým grafickým uspořádáním, které umožňuje získat základní představu o dramaticky klesajícím vlivu nízkých hodnot PMD.



Obr. 3.11. Graf závislosti PMD na délce vlákna při přenosové rychlosti 80 Gb/s.

Z grafu je patrné, že mez přenosové rychlosti je tvořena délkou a hodnotou PMD.

Výsledná Maxwellova křivka (Obr. 3.12) je vytvořena podle Maxwellovy distribuční funkce

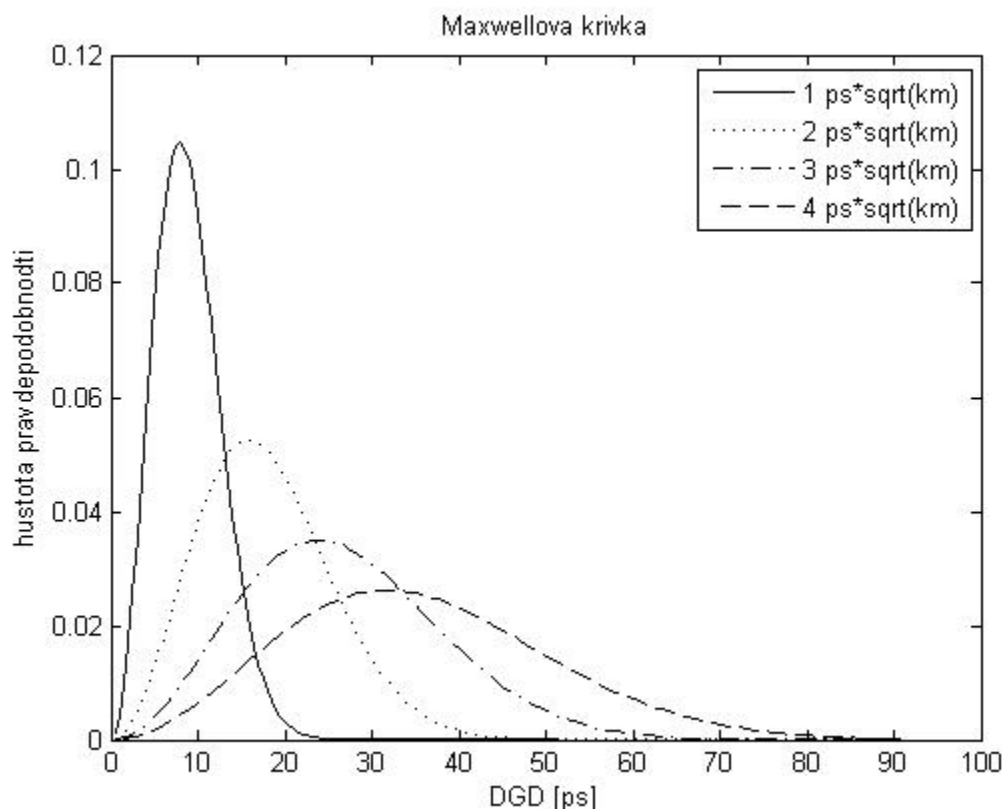
$$\rho(\Delta t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta t^2}{\sigma^3} e^{-\frac{\Delta t^2}{2\sigma^2}}, \quad (47)$$

kde Δt je DGD, jehož hodnoty programové rozhraní MATLAB načítá z textového souboru, a σ je určena podle

$$\sigma = \frac{\sqrt{2\pi}\Delta t_{avg}}{4}. \quad (48)$$

Hodnota Δt_{avg} závisí na hodnotě PMD a délce vlákna a je dána vztahem

$$\Delta t_{avg} = PMD * \sqrt{L}. \quad (49)$$



Obr. 3.12. Maxwellovy křivky pro různé hodnoty PMD.

Všechny grafy a tabulky je možno exportovat do formátu JPEG nebo TIFF pro další zpracovávání výsledků.

Vytvořená aplikace počítá maximální teoretickou délku vlákna a maximální teoretickou přenosovou rychlost na jednom kanálu v systémech vlnového multiplexu při uvažování pouze vlivu PMD.

– **Aplikace Momentka PMD**

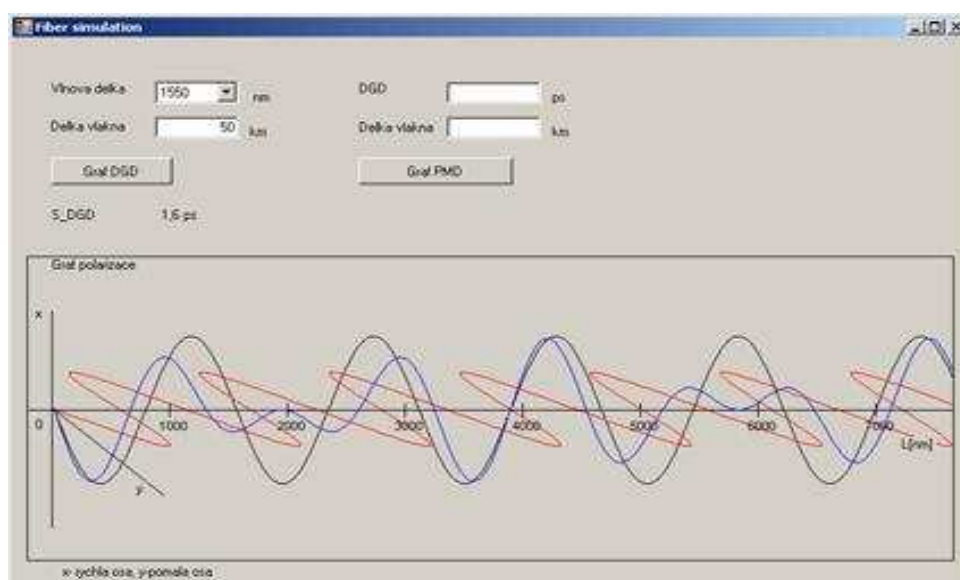
Aplikace Momentka polarizační vidové disperze (dále jen MPMMD) byla vytvořena v rámci této disertační práce za účelem možnosti zobrazení okamžitého průběhu vektorového součtu horizontální a vertikální roviny polarizace v libovolném bodě optické trasy (v libovolné vzdálenosti od počátku vlákna). Obrovskou předností aplikace je získání představy uživatele o vzniku PMD. Původní představou bylo vytvořit aplikaci v takové podobě, aby mohla být i součástí laboratorních úloh předmětu Optické sítě vyučovaného na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, ovšem složitost problematiky polarizační vidové disperze byla nakonec stažena z laboratorních úloh a nahrazena jednoduššími a názornějšími aplikacemi vláknové optiky.

Pro potřeby simulace polarizační vidové disperze je nutno dále uvažovat pouze paraxiální optiku, kruhově polarizované světlo a jediný dominantní vid ve vlákně.

U kruhové polarizace rozlišujeme pravotočivou $\varphi = +\pi/2$ a levotočivou $\varphi = -\pi/2$ polarizaci v závislosti na směru rotace elektrického pole ve směru či proti směru pohybu hodinových ručiček.

Podle teoretických podkladů uvedených v 1. kapitole je světlo v ideálních jednovíkových vláknech vedeno celým jádrem a z části i pláštěm. V takovém případě bychom uvažovali pouze jeden vid šíření. Protože však reálná vlákna jsou materiály, ve kterých vzniká dvojlom, je tento jediný vid polarizován dvěma různými způsoby, které kopírují polarizační osy daného vlákna. Tyto osy jsou také nazývány “hlavními stavy polarizace” (Principal State of Polarization - zkráceně PSP), což vede ke vzniku dvou polarizačních vidů.

Aplikace byla vyvíjena v prostředí MATLAB, které umožnilo snadno a hojně využít jeho matematického aparátu a schopností pracovat s maticemi. Byla použita nástavba Graphical User Interface (GUI), která uživatelsky velmi příjemně umožňuje snadněji modifikovat parametry simulace a zobrazovat výsledné grafy.



Obr. 3.13. Výstup aplikace MPMD, modře znázorněn vznik PMD.

Aplikace simuluje 3D průběh momentky vektoru elektrického pole světla procházejícího optickou trasou. Na Obr. 3.13 je modře vykreslen průběh momentky vektorového součtu horizontálního a vertikálního vidu.

Vstupními hodnotami simulace jsou vlnová délka, délka vlákna a hodnota DGD konkrétního typu vlákna nebo konkrétní označení doporučení ITU, dle kterého bylo vlákno vyrobeno. Průběh se vykreslí do grafu po stisknutí tlačítka Ideální Průběh. Výstupem simulace je vykreslení vektorového součtu - typicky spirálový průběh momentky vektoru elektrického pole v závislosti na délce optického vlákna. Výstupy této části práce jsou velmi přínosné pro získání okamžité teoretické hodnoty a fáze vektorového součtu hlavních stavů polarizace.

D. Vliv modulačních formátů na PMD

Aplikace byla naprogramována za účelem vyhodnocení vlivu jednotlivých modulačních formátů na hodnotu polarizační vidové disperze optické trasy. V celém programu se tak počítá pouze se zkreslením způsobeným polarizační vidovou disperzí. Aplikace byla naprogramována pro program MATLAB a uložena jako skript v souboru *m-file*. Jeho název je *oko.m* a je uložen na přiloženém kompaktním disku.

– Realizace aplikace

Aplikace je navržena především pro vykreslení diagramu oka v závislosti na určitých parametrech. Mezi tyto parametry patří poměr bitové energie k spektrální výkonové hustotě, bitová rychlost, koeficient polarizační vidové disperze, délka optického vlákna a typ modulace. Tyto parametry tedy tvoří rovněž vstupní hodnoty programu. Simulace se spouští příkazem

$$[T] = oko(EbNo, B, PMD, L, typ), \quad (50)$$

kde

[T]	výstupní parametr funkce, který vrací hodnotu periody v [s],
oko	název m-filu,
EbNo	poměr bitové energie [Joule] k spektrální výkonové hustotě [Watts/Hz] v intervalu $[x_1:x_n]$,
B	bitová rychlost v [bit/s],
PMD	koeficient polarizační vidové disperze v $[s/\sqrt{\text{km}}]$,
L	délka vlákna v [km],
Typ	typ modulace, který se zadává čísly 0 – 5 v závislosti na typu modulace (viz Tab. 3.2).

Tab. 3.2. Přehled typů modulací v programu.

Číslo	Zkratka	Typ modulace
0	NRZ-OOK	bez návratu k nule – amplitudová modulace - unipolární
1	RZ-OOK	s návratem k nule – amplitudová modulace - unipolární
2	NRZ-DBPSK	bez návratu k nule – diferenční dvojstavová fázová modulace - bipolární
3	RZ-DBPSK	s návratem k nule – diferenční dvojstavová fázová modulace - bipolární
4	NRZ DQPSK	bez návratu k nule – diferenční čtyřstavová fázová modulace - bipolární
5	RZ-DQPSK	s návratem k nule – diferenční čtyřstavová fázová modulace - bipolární

Program má vytvořen vlastní nápovědu, kterou lze spustit příkazem „*help oko*“ do okna *command window*.

Program má dva výstupy, grafický a textový výpis do *command window*. Graficky se vykreslují závislosti maximální délky vlákna při zadané *PMD* a bitové rychlosti *B*, dále graf poklesu odstupu signálu od šumu (SNR) v závislosti na bitové chybovosti (BER) a diferenčním skupinovým zpoždění (DGD) a graf závislosti Power Penalty (poklesu doporučené hodnoty SNR) na normovaném diferenčním skupinovém zpoždění (DGD) pro různé modulační formáty.

Do okna *command window* se vypisují vypočtené hodnoty: maximální délka vlákna $L_{\max}$ pro zadanou *PMD* a bitovou rychlost *B*. Zároveň program zjistí, jestli zadaná vstupní délka vlákna *L* je větší nebo menší než maximální možná délka vlákna $L_{\max}$ pro zadanou vstupní hodnotu *PMD* a bitovou rychlost *B*. Na základě algoritmu se rozhodne, jestli je zadaná vstupní délka $L < L_{\max}$ nebo $L > L_{\max}$.

Pokud je vstupní délka $L < L_{\max}$, program nevypisuje do *command window* nic. Ale pokud je vstupní délka $L > L_{\max}$, vypíše, že zadaná vstupní délka *L* je větší než maximální délka vlákna $L_{\max}$. Zároveň přiřadí $L_{\max}$ maximální délku vlákna pro zadanou vstupní hodnotu *PMD* a bitovou rychlost *B*.

Vstupní parametr *L* slouží k záměrnému zadání větší délky vlákna, než je maximální možná. Tuto možnost lze využít v případě, kdy je potřeba dosáhnout větších hodnot diferenčního skupinové zpoždění (DGD). Stejného výsledku dosáhneme, pokud zvýšíme hodnotu koeficientu polarizační vidové disperze (*PMD*).

Nakonec program vypisuje hodnotu Power Penalty pro zvolený modulační formát při vypočteném diferenčním skupinovém zpoždění (DGD), respektive při <DGD> (normDGD).

Výpočetní postup je vysvětlen dále.

Výpočet bitové chybovosti BER

Pro výpočet bitové chybovosti BER je používána v MATLABU funkce *berawgn*. Funkce simuluje bitovou chybovost v AWGN (Additive White Gaussian Noise) kanálu pro různé modulační formáty. Zadává se ve tvaru

$$ber = berawgn(EbNo, 'X', M), \quad (51)$$

kde

<i>ber</i>	bitová chybovost,
<i>EbNo</i>	poměr bitové energie k spektrální výkonové hustotě v intervalu $[x_1:x_n]$,
<i>X</i>	druh modulace (pro ASK = pam; pro DPSK = dpsk),
<i>M</i>	počet stavů.

MATLAB využívá pro výpočet funkce *berawgn* složité rovnice. V následujících bodech je popsán výpočet alespoň pro ASK a DPSK modulace.

BER pro ASK modulaci

K výpočtu BER pro amplitudovou modulaci je použit následující vztah pro výpočet impulsové amplitudové modulace o M stavech (M-PAM):

$$BER = \frac{2}{M \log_2 M} \times \sum_{k=1}^{\log_2 M} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})M-1} \left\{ (-1)^{\left\lfloor \frac{i2^{k-1}}{M} \right\rfloor} \left(2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i2^{k-1}}{M} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) Q \left((2i+1) \sqrt{\frac{6 \log_2 M}{M^2 - 1} \frac{E_b}{N_0}} \right) \right\}, \quad (52)$$

kde

M počet stavů,
 E_b/N_0 poměr bitové energie k spektrální výkonové hustotě.

BER pro DPSK modulace

Pro výpočet BER pro diferenční fázovou modulaci DPSK je použit vztah pro výpočet i o M stavech (M-DPSK) [21]:

$$BER = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^{M/2} (w'_i) A_i \right), \quad (53)$$

kde

k délka zprávy,
 M počet stavů,
 $w'_i = w_i + w_{M-i}$, $w'_{M/2} = w_{M/2}$, w_i Hammingova váha bitů obsažených v symbolu i ,
 A_i vypočtená podle rovnice

$$A_i = F \left((2i+1) \frac{\pi}{M} \right) - F \left((2i-1) \frac{\pi}{M} \right), \quad (54)$$

kde

F lze vypočítat jako

$$F(\psi) = \frac{-\sin \psi}{4\psi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{e^{-kE_b/N_0(1-\cos \psi \cos t)}}{1 - \cos \psi \cos t} dt, \quad (55)$$

kde

ψ přenosová funkce,
 E_b/N_0 poměr bitové energie k spektrální výkonové hustotě,
 t čas.

Výpočet odstupů signálu od šumu SNR

Pro výpočet odstupů signálu od šumu (SNR) v MATLABu je použita rovnice

$$SNR = EbNo + 10 \log(k), \quad (56)$$

kde

E_b/N_0 poměr bitové energie k spektrální výkonové hustotě v intervalu $[x_1:x_n]$,
 K počet informačních bitů u jednoho vstupního symbolu, k je určen podle:

$$k = \log_2 M, \quad (57)$$

kde:

M počet stavů.

Uvedené vzorce se používají pro DPSK modulace. Užijeme-li modulace ASK (bipolární), je nutno k celkovému SNR přičíst ještě hodnotu +3 dB, v případě ASK (unipolární) pak hodnotu +6 dB.

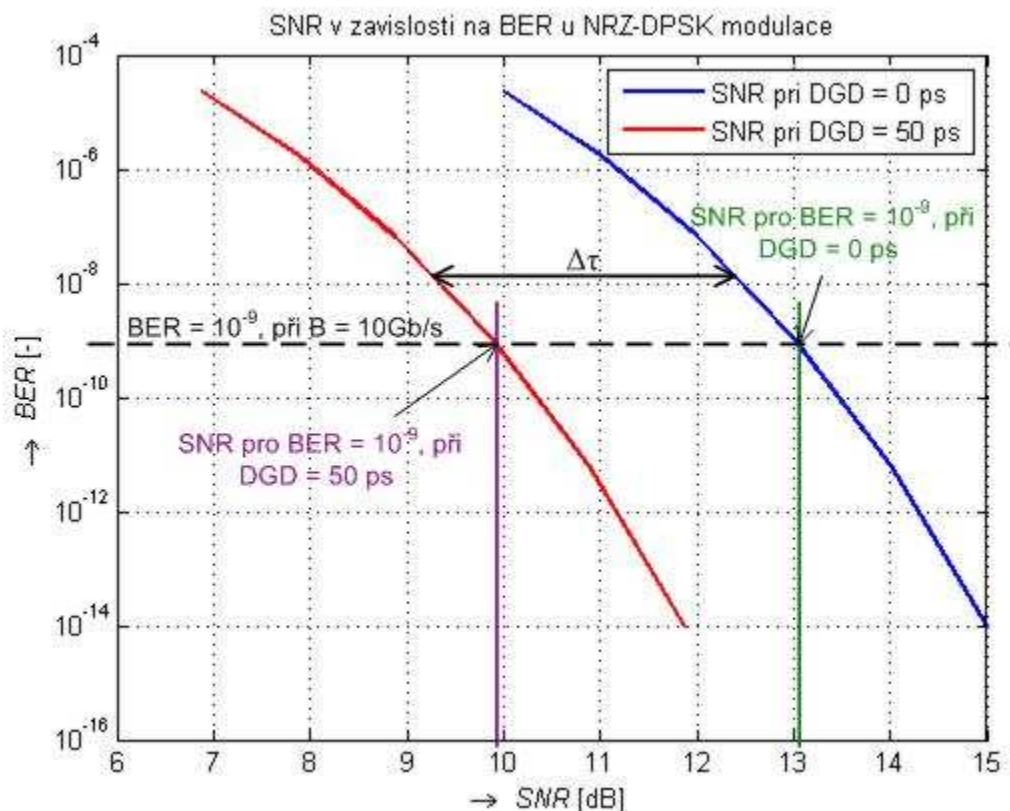
Pokles diagramu oka (Power Penalty)

Power Penalty udává vliv na pokles hodnoty SNR.

Podle uvedených vzorců lze určit minimální hodnotu SNR pro danou modulaci, aby byla dodržena stanovená bitová chybovost BER. Hodnota Power Penalty ε se následně od vypočtené hodnoty SNR odečte, abychom získali novou hodnotu SNR s určitou hodnotou diferenčního grupového zpoždění (DGD).

Tato hodnota se poté zadá do bloku AWGN v simulinku. Pro každou modulaci je v MATLABu v simulinku vytvořen model, který simuluje přenos kanálem s charakteristickou hodnotou SNR.

Následující obrázek Obr. 3.14 ukazuje obecný případ poklesu hodnoty SNR v závislosti na DGD a zvoleném modulačním signálu. Zelená hodnota SNR na Obr. 3.14 je při DGD = 0 ps a BER = 10^{-9} , což odpovídá bitové chybovosti pro přenosovou rychlost $B = 10$ Gb/s. Fialová hodnota SNR je při DGD = 50 ps a BER = 10^{-9} , což odpovídá rovněž bitové chybovosti pro přenosovou rychlost $B = 10$ Gb/s. Tato hodnota je následně zadávána do bloku AWGN v modelu simulinku. Bloky jsou uvedeny v dalších kapitolách.



Obr. 3.14. Obecný případ pokles hodnoty SNR v závislosti na DGD.

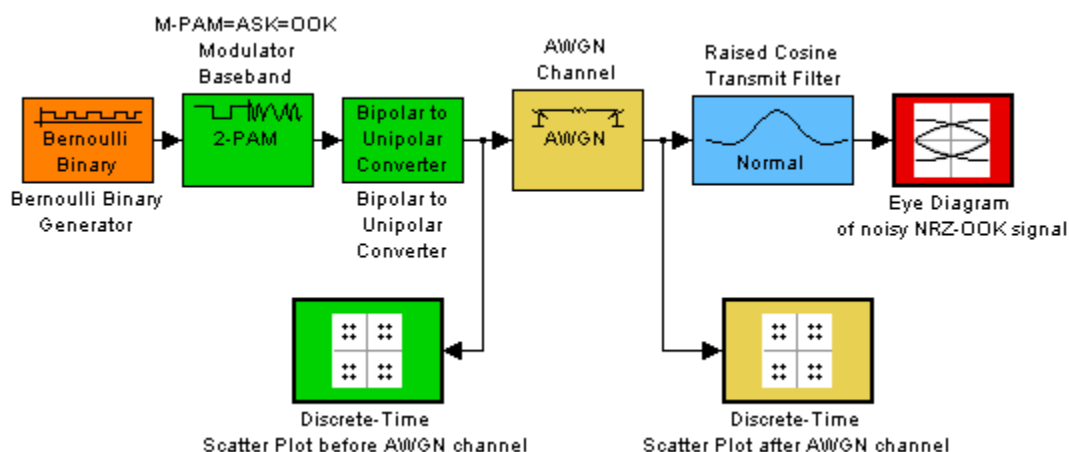
– Schémata zapojení simulovaných modulací

V simulinku je vytvořeno šest modelů pro různé typy používaných modulací (NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DBPSK, RZ-DBPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK). Výstupem každého modelu je diagram oka a konstelační diagram před a po průchodu AWGN kanálem, který znázorňuje, jak působí SNR na jednotlivé stavy.

V následujícím odstavci jsou popsány bloky modulace NRZ-OOK a zobrazena schémata zapojení všech uvažovaných modulací.

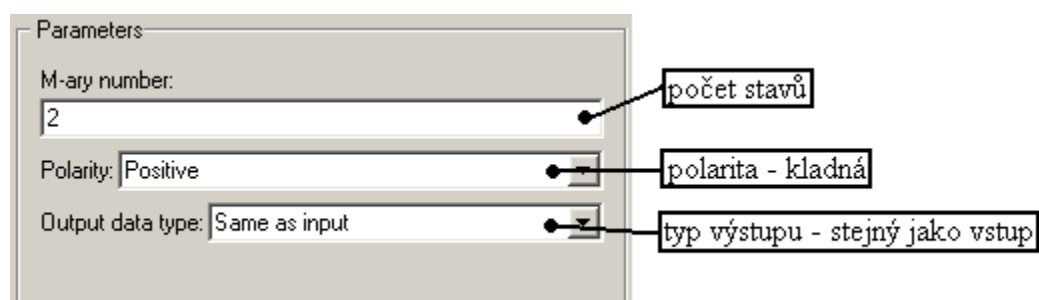
Modulace NRZ-OOK

Modulace NRZ-OOK je unipolární ASK modulace bez návratu k nule. K vytvoření této modulace je použita 2-PAM (Pulse Amplitude Modulation) modulace. Obr. 3.15 ukazuje blokové schéma zapojení modelu NRZ-OOK



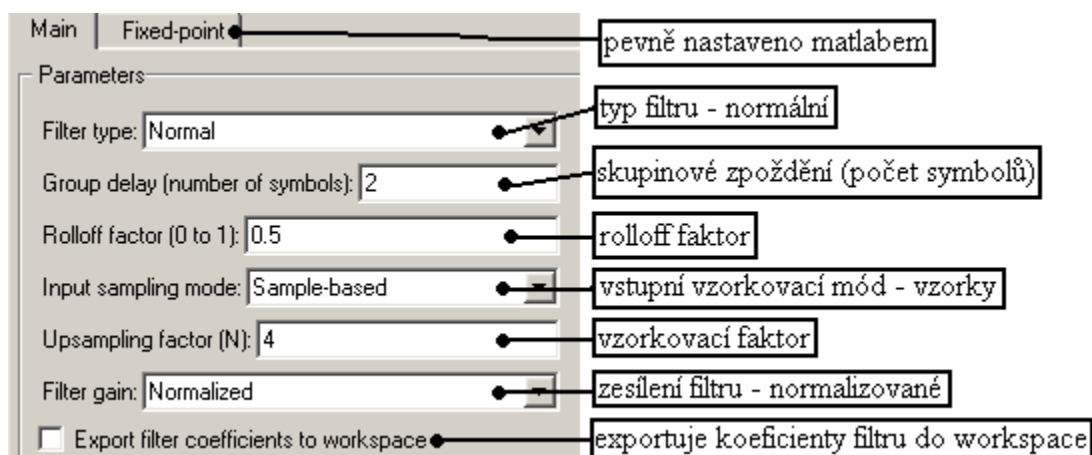
Obr. 3.15. Blokové schéma zapojení modelu NRZ-OOK.

Kde Bernoulliho binární generátor generuje náhodné binární hodnoty podle Bernoulliho rozložení. Blok M-PAM=ASK=OOK Modulator Baseband moduluje signál. Blok Bipolar to Unipolar Converter slouží ke konvertování bipolárního signálu na unipolární. Obr. 3.16 popisuje nastavované parametry bloku Bipolar to Unipolar Converter.



Obr. 3.16. Nastavované parametry bloku Bipolar to Unipolar Converter.

Blok AWGN Channel simuluje kanál s charakteristickou hodnotou odstupu signálu od šumu (SNR). Blok Raised Cosine Transmit Filter vzorkuje a filtruje vstupní signál pomocí normálního Raised Cosine FIR (Finite Impulse Response). Obr. 3.17 popisuje nastavované parametry bloku Raised Cosine Transmit Filter.

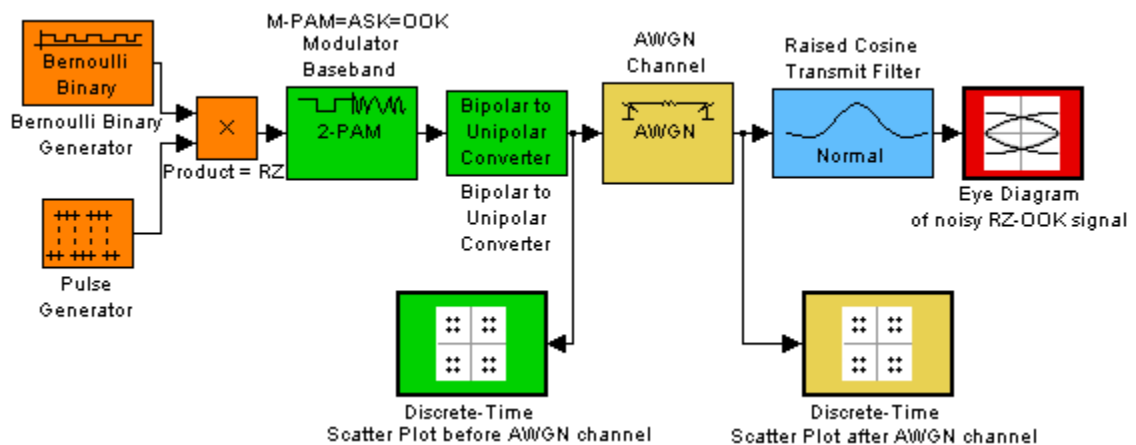


Obr. 3.17. Nastavované parametry bloku Raised Cosine Transmit Filter.

Blok Discrete-Time Scatter Plot before (after) AWGN channel slouží k zobrazení konstelačního diagramu před a po průchodu AWGN kanálem. Oba konstelační diagramy mají stejné nastavovací parametry. Blok Eye Diagram of Noisy NRZ-OOK signal slouží k zobrazení diagramu oka.

Modulace RZ-OOK

Modulace RZ-OOK je unipolární ASK modulace s návratem k nule. K vytvoření této modulace je použita 2-PAM modulace. Obr. 3.18 ukazuje blokové schéma zapojení modelu RZ-OOK.

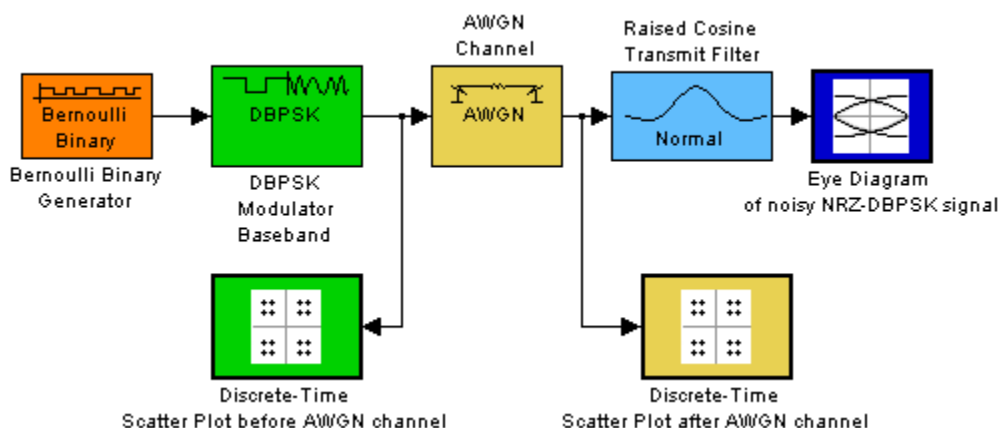


Obr. 3.18. Blokové schéma zapojení modelu RZ-OOK.

Popis jednotlivých bloků a zadávané parametry jsou stejné jako u modulace NRZ-OOK. Do zapojení jsou přidány nové bloky. Blok Pulse Generator generuje signál o polovičním vzorkovacím čase. Blok Product RZ násobí výstup bloku Bernoulli Binary Generator a Pulse Generator a tím dává vznik signálu RZ.

Modulace NRZ-DBPSK

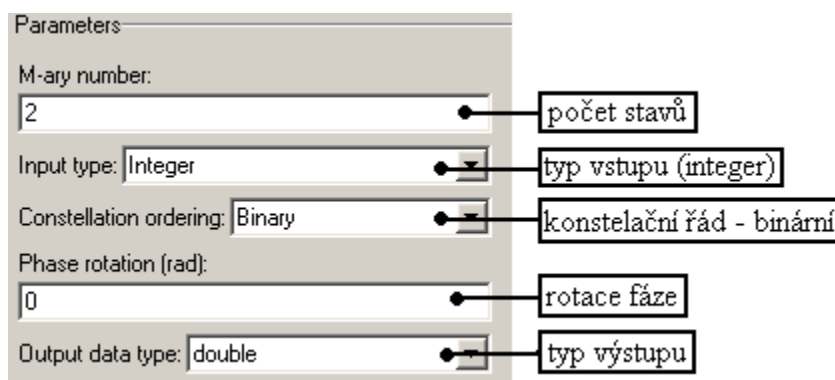
Modulace NRZ-DBPSK je bipolární diferenční dvojstavová PSK modulace bez návratu k nule. K vytvoření této modulace je použita 2-DPSK modulace. Obr. 3.19 ukazuje blokové schéma zapojení modelu NRZ-DBPSK.



Obr. 3.19. Blokové schéma zapojení modelu NRZ-DBPSK.

Blok DBPSK Modulator Baseband

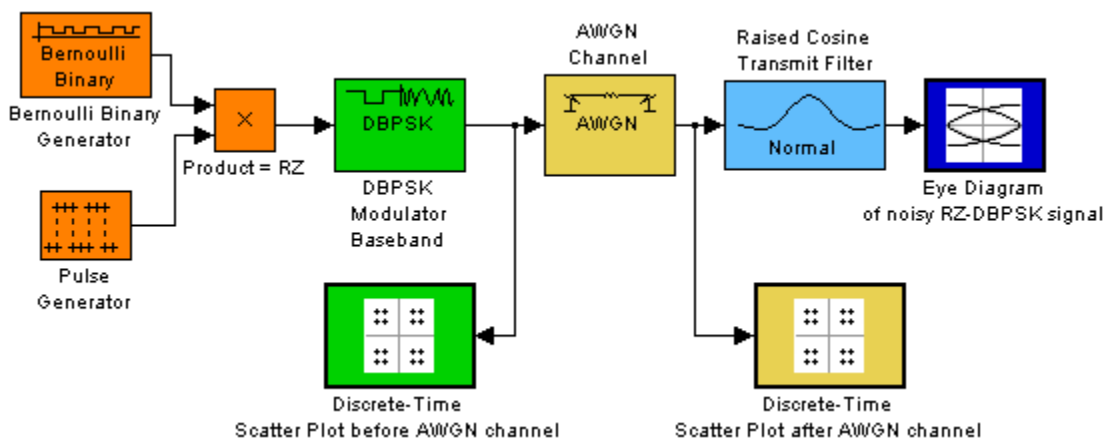
Blok DBPSK Modulator Baseband moduluje signál. Obr. 3.20 popisuje nastavované parametry bloku DBPSK Modulator Baseband.



Obr. 3.20. Nastavované parametry bloku DBPSK Modulator Baseband.

Modulace RZ-DBPSK

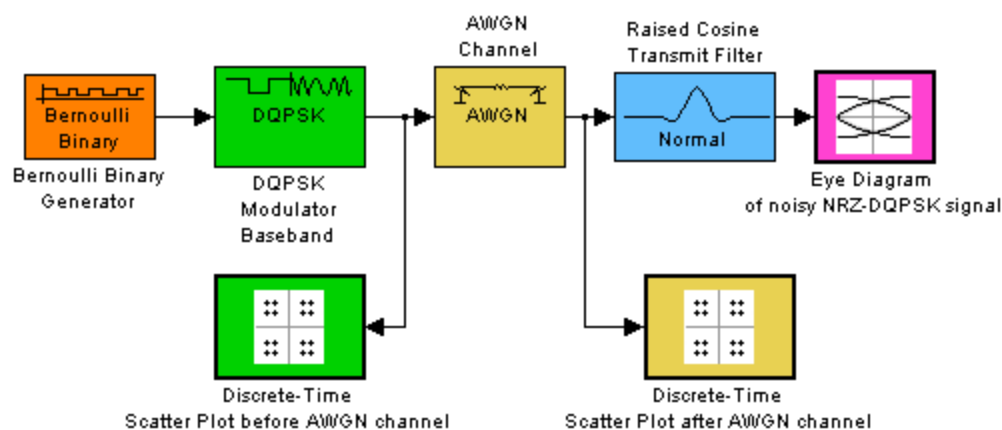
Modulace RZ-DBPSK je bipolární diferenční dvojstavová PSK modulace s návratem k nule. K vytvoření této modulace je použita 2-DPSK modulace. Obr. 3.21 ukazuje blokové schéma zapojení modelu RZ-DBPSK.



Obr. 3.21. Blokové schéma zapojení modelu RZ-DBPSK.

Modulace NRZ-DQPSK

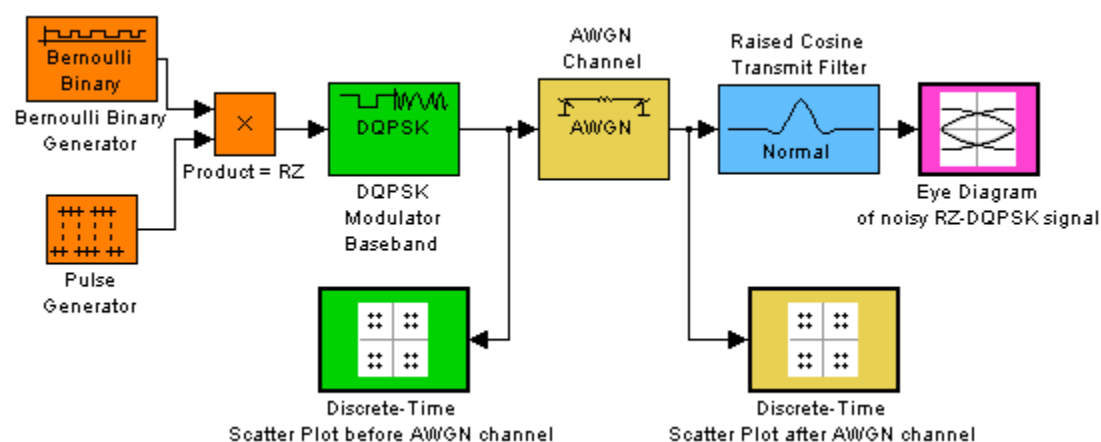
Modulace NRZ-DQPSK je bipolární diferenční čtyřstavová PSK modulace bez návratu k nule. K vytvoření této modulace je použita 4-DPSK modulace.



Obr. 3.22. Blokové schéma zapojení modelu NRZ-DQPSK.

Modulace RZ-DQPSK

Modulace RZ-DQPSK je bipolární diferenční čtyřstavová PSK modulace s návratem k nule. K vytvoření této modulace je použita 4-DPSK modulace.



Obr. 3.23. Blokové schéma zapojení modelu RZ-DQPSK.

– Výsledky simulací

V zájmu získání maximálně přesných hodnot byla simulační aplikace použita pro dva typy optických vláken, a to G.652.B a G.652.D. Jejich délky budou $L_1 = 20$ km, $L_2 = 100$ km, $L_3 = 1000$ km. Délky byly záměrně zvoleny řádově odlišné, abychom dosáhli i relativně velmi vysokých hodnot diferenčního skupinového zpoždění a velkých hodnot Power Penalty, které způsobí pokles diagramu oka, aby byl z výsledných grafů závěr jasně patrný. Přenosovou rychlost budeme pro tuto simulaci uvažovat $B = 40$ Gb/s (STM-256 - Synchronous Transport Module), ale pokus byl ověřen i pro jiné přenosové rychlosti. Simulační aplikace uvažuje při výpočtech

a zakresluje do grafu pouze zkreslení, které způsobuje polarizační vidová disperze (nebere se v úvahu zkreslení způsobené chromatickou disperzí a útlumem).

Stanovení maximálního grupového zpoždění a minimální chybovosti

Pro zvolenou přenosovou rychlost $B = 40$ Gb/s určíme, podle normy ITU, maximální hodnotu diferenciálního skupinového zpoždění (DGD)

$$\Delta\tau_{\max} \leq 0,1T_s = 0,1 \frac{1}{B} = 0,1 \frac{1}{40 \cdot 10^9} = 2,5 \cdot 10^{-12} \leq \underline{\underline{2,5\text{ps}}}. \quad (58)$$

Bitová chybovost BER pro přenosovou rychlost $B = 40$ Gb/s smí, podle uvedených norem, nabývat maximálních hodnot: $\text{BER} \leq 10^{-12}$ [9]. Podrobný popis výpočtu je uveden v podkapitole F kapitoly 1.

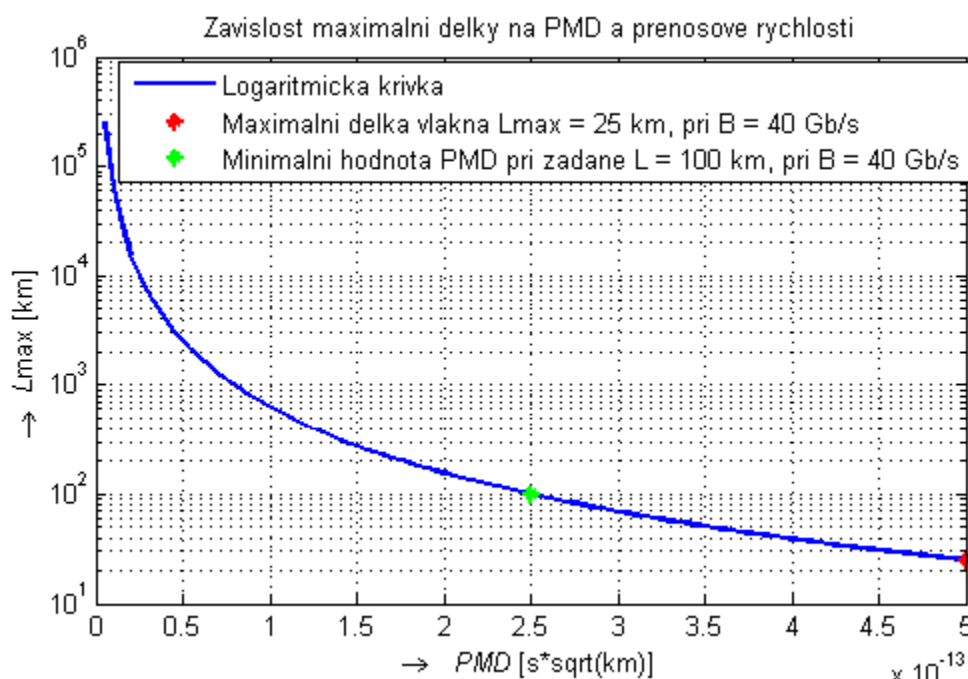
Stanovení maximální délky $L_{\max}$ a diferenční skupinové zpoždění DGD

Výpočet maximální délky vlákna $L_{\max}$ provedeme pro dva typy vláken G.655.B a G652.D, které mají odlišnou hodnotu polarizační vidové disperze a bitovou rychlost $B = 40$ Gb/s. Vláknem G.655.B má hodnotu polarizační vidové disperze $D_{\text{PMD}} = 0,5$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Hodnotu diferenčního skupinového zpoždění DGD vypočítáme z rovnice

$$L_{\max} \leq \frac{0,01}{B^2 \cdot D_{\text{PMD}}^2} = \frac{0,01}{(40 \cdot 10^9)^2 \cdot (0,5 \cdot 10^{-12})^2} \leq \underline{\underline{25\text{km}}}. \quad (59)$$

Maximální délka vlákna G.655.B při přenosové rychlosti $B = 40$ Gb/s je $L_{\max} = 25$ km. Ze zadaných délek vlákna $L_1 = 20$ km, $L_2 = 100$ km, $L_3 = 1000$ km je patrné, že pouze délka $L_1 \leq L_{\max}$, a proto bude vzniklé diferenční skupinové zpoždění (DGD) akceptovatelné. Ostatní délky lze spočítat podle následujícího příkladu pro délku $L_2 = 100$ km:

$$D_{\text{PMD}} \leq \sqrt{\frac{0,01}{B^2 \cdot L_n}} = \sqrt{\frac{0,01}{B^2 \cdot L_2}} = \sqrt{\frac{0,01}{(40 \cdot 10^9)^2 \cdot 100}} \leq \underline{\underline{0,25\text{ps.km}^{-1/2}}}. \quad (60)$$



Obr. 3.24. Závislost $L_{\max}$ na PMD a přenosové rychlosti pro $L_2 = 100$ km.

V tabulce Tab. 3.3 jsou uvedeny výsledné hodnoty všech uvažovaných délek. Z tabulky je patrné, že pouze délka L_1 má hodnotu $DGD \leq DGD_{\max}$ ($\Delta\tau_{\max}$).

Tab. 3.3. Hodnoty DGD zpoždění pro zadané délky vlákna G.655.B.

Délka vlákna L_n	DGD
$L_1 = 20$ km	2,2361 ps
$L_2 = 100$ km	5,0 ps
$L_3 = 1000$ km	15.8114ps

Vlákno G.655.B má hodnotu polarizační vidové disperze $D_{\text{PMD}} = 0,2$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Výše uvedeným postupem lze stanovit i hodnoty diferenčního skupinového zpoždění pro vlákno G652.D. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.4.

Tab. 3.4. Hodnoty DGD pro zadané délky vlákna G.652.D.

Délka vlákna L_n	DGD
$L_1 = 20$ km	0,89443 ps
$L_2 = 100$ km	2,0 ps
$L_3 = 1000$ km	6.3246 ps

Z tabulky Tab. 3.4 je patrné, že pouze délka L_1 a L_2 má hodnotu $DGD \leq DGD_{\max}$ ($\Delta\tau_{\max}$).

Vypočtené hodnoty SNR a Power Penalty

Hodnota odstupů signálu od šumu (SNR) je závislá na druhu modulace a její pokles (Power Penalty) je závislý na druhu optického vlákna, délce vlákna a druhu modulace. Pro všechny kombinace délky vlákna (100 km, 1000 km), použité modulace (NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DBPSK, RZ-DBPSK, NRZ-DQPSK, RZ-DQPSK) a druhy

optických vláken podle doporučení ITU (G.652.B, G.652.D) byly vypočítány hodnoty SNR a Power Penalty. V níže uvedeném přehledu výsledků je uvedena pouze ukázka výpočtu.

K získané hodnotě poměru signálu k šumu lze přiřadit konkrétní hodnotu diferenciálního grupového zpoždění. Power Penalty je vypočteno pouze pro délky vlákna větší než maximální délka vlákna L_{max} (L_2 , L_3), protože pro délku L_1 je Power Penalty akceptovatelné.

Následuje ukázka výpočtu pro modulaci NRZ-OOK. NRZ-OOK je dvoustavová modulace bez návratu k nule. Z předchozích výpočtů je zřejmé, že při dodržení $BER = 10^{-12}$ pro přenosovou rychlost $B = 40$ Gb/s a při $DGD = 0$ ps výjde hodnota $SNR \approx 19,92$ dB. Power Penalty je dále stanoveno pro případ (A):

$$L_2 = 100 \text{ km},$$

$$A = 22,$$

$$\gamma = 0,5,$$

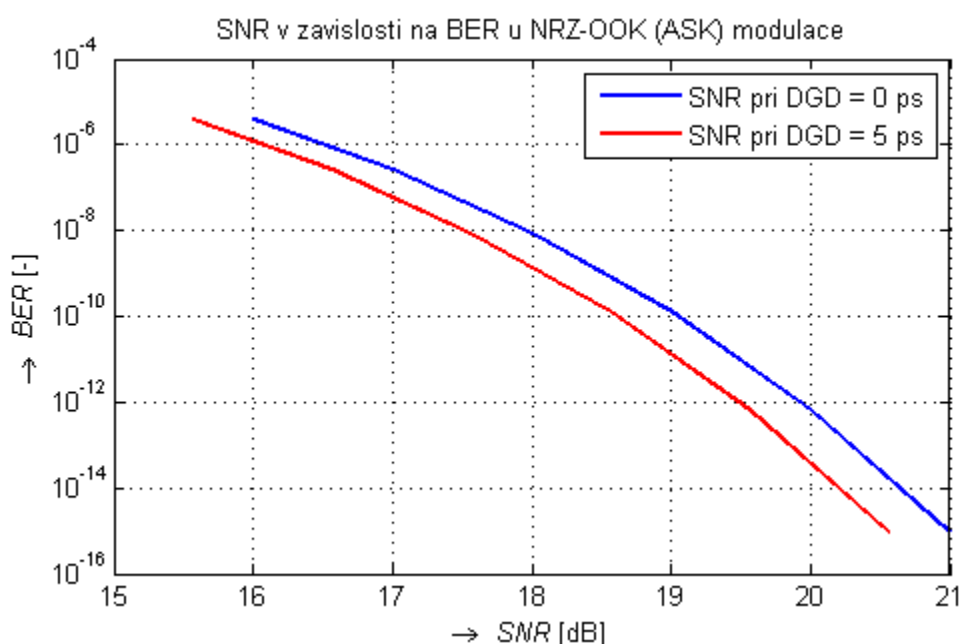
$$T_{sp} = 1/B = 1/40 \cdot 10^9 = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ s},$$

$$\vartheta = 1,$$

$$\Delta\tau = 5,0 \text{ ps} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ s},$$

$$\varepsilon = 2 \frac{A}{\vartheta} \frac{\Delta\tau^2 \gamma(\gamma-1)}{T_{sp}^2} = 2 \frac{22}{1} \frac{(5 \cdot 10^{-12})^2 0,5(0,5-1)}{(2,5 \cdot 10^{-11})^2} = \underline{\underline{0,44 \text{ dB}}}. \quad (61)$$

Obr. 3.25 ukazuje pokles hodnoty SNR u NRZ-OOK modulace pro $L_2 = 100$ km (G.655.B).



Obr. 3.25. Pokles SNR u NRZ-OOK modulace pro $L_2 = 100$ km (G.655.B).

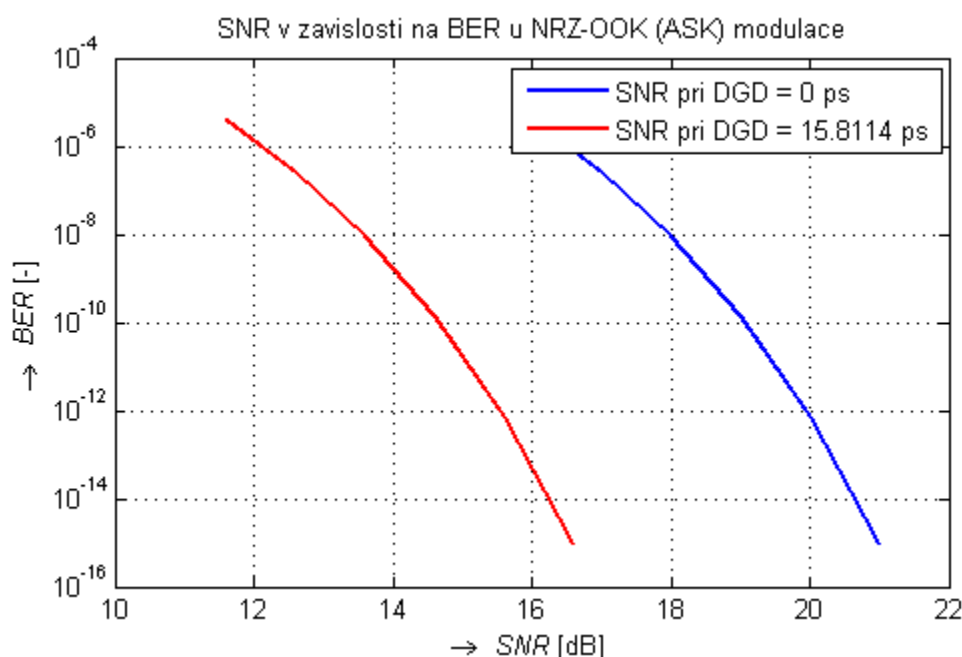
A pro případ (B):

$L_3 = 1000 \text{ km}$,

$\Delta\tau = 15.8114 \text{ ps} = 15,8114 \cdot 10^{-12} \text{ s}$,

$$\varepsilon = 2 \frac{A}{\vartheta} \frac{\Delta\tau^2 \gamma(\gamma-1)}{T_{sp}^2} = 2 \frac{22}{1} \frac{(15,8114 \cdot 10^{-12})^2 0,5(0,5-1)}{(2,5 \cdot 10^{-11})^2} = \underline{\underline{4,4 \text{ dB}}}. \quad (62)$$

Obr. 3.26 ukazuje pokles hodnoty SNR u NRZ-OOK modulace pro $L_3 = 1000 \text{ km}$ (G.655.B). V Tab. 3.5 následují hodnoty SNR při DGD u NRZ-OOK modulace (G.655.B).



Obr. 3.26. Pokles SNR u NRZ-OOK modulace pro $L_3 = 1000 \text{ km}$ (G.655.B).

Tab. 3.5. Hodnoty SNR při DGD u NRZ-OOK modulace (G.655.B).

Délka vlákna L_n	SNR při DGD = 0 ps	DGD	ε	SNR při DGD
$L_2 = 100 \text{ km}$	$\approx 19,92 \text{ dB}$	5 ps	0,44 dB	$\approx 19,48 \text{ dB}$
$L_3 = 1000 \text{ km}$	$\approx 19,92 \text{ dB}$	15,8114 ps	4,4 dB	$\approx 15,52 \text{ dB}$

Následují přehledové tabulky (Tab. 3.6 a Tab. 3.7) poměru signálu k šumu pro vypočtené hodnoty diferenciálního grupového zpoždění pro délky vláken 100 km a 1000 km. Grafy hodnot poklesu poměrů signálu k šumu jsou uvedeny v příloze B.

Tab. 3.6. SNR pro vypočtené hodnoty DGD pro délky vláken 1000 km.

Typ vlákna	modulace	Délka vlákna L_n	SNR při DGD = 0 ps	DGD	ε	SNR při DGD
G.652.B	NRZ-OOK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 19,92$ dB	15,81 ps	2,2 dB	$\approx 17,72$ dB
G.652.B	NRZ-DBPSK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 14,28$ dB	15,81 ps	5,0 dB	$\approx 9,28$ dB
G.652.B	RZ-DBPSK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 14,28$ dB	15,81 ps	2,5 dB	$\approx 11,78$ dB
G.652.B	NRZ-DQPSK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 19,20$ dB	15,81 ps	1,25 dB	$\approx 17,95$ dB
G.652.B	RZ-DQPSK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 19,20$ dB	15,81 ps	0,625 dB	$\approx 18,575$ dB
G.652.D	NRZ-OOK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 19,92$ dB	6,324 ps	0,704 dB	$\approx 19,216$ dB
G.652.D	RZ-OOK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 19,92$ dB	6,324 ps	0,352 dB	$\approx 19,568$ dB
G.652.D	NRZ-DBPSK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 14,28$ dB	6,324 ps	0,8 dB	$\approx 13,48$ dB
G.652.D	RZ-DBPSK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 14,28$ dB	6,3246 ps	0,4 dB	$\approx 13,88$ dB
G.652.D	NRZ-DQPSK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 19,20$ dB	6,3246 ps	0,2 dB	$\approx 19,0$ dB
G.652.D	RZ-DQPSK	$L_3 = 1000$ km	$\approx 19,20$ dB	6,3246 ps	0,1 dB	$\approx 19,1$ dB

Tab. 3.7. SNR pro vypočtené hodnoty DGD pro délky vláken 100 km.

Typ vlákna	modulace	Délka vlákna L_n	SNR při DGD = 0 ps	DGD	ε	SNR při DGD
G.652.B	NRZ-OOK	$L_2 = 100$ km	$\approx 19,92$ dB	5 ps	0,22 dB	$\approx 19,70$ dB
G.652.B	NRZ-DBPSK	$L_2 = 100$ km	$\approx 14,28$ dB	5 ps	0,5 dB	$\approx 13,78$ dB
G.652.B	RZ-DBPSK	$L_2 = 100$ km	$\approx 14,28$ dB	5 ps	0,25 dB	$\approx 14,03$ dB
G.652.B	NRZ-DQPSK	$L_2 = 100$ km	$\approx 19,20$ dB	5 ps	0,125 dB	$\approx 19,075$ dB
G.652.B	RZ-DQPSK	$L_2 = 100$ km	$\approx 19,20$ dB	5 ps	0,0625 dB	$\approx 19,138$ dB

– **Shrnutí výsledků**

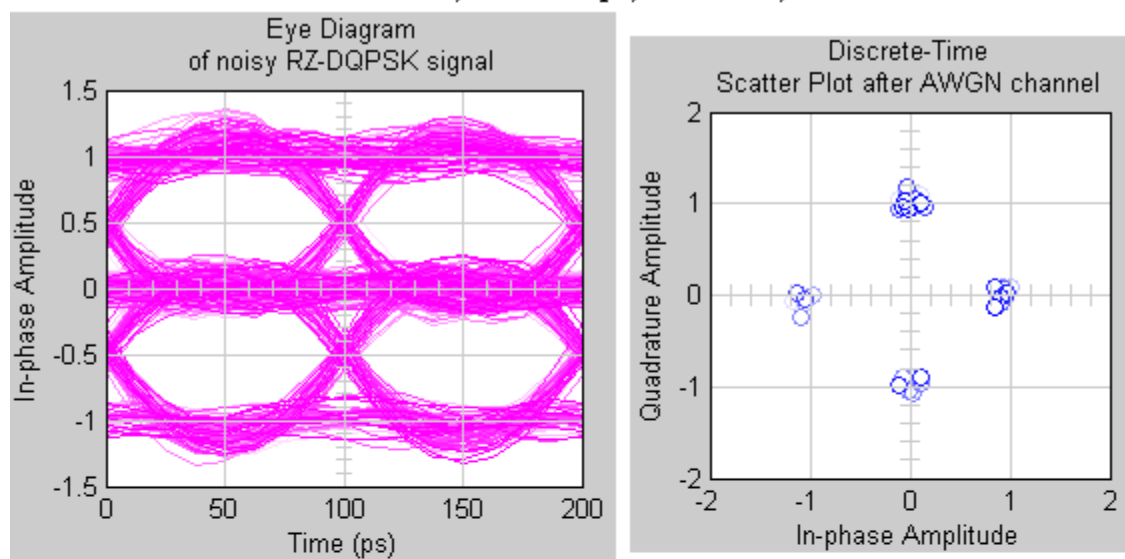
V tabulce Tab. 3.8 je přehledně popsán vliv modulace na pokles diagramu oka (Power Penalty).

Tab. 3.8. Vliv modulace na pokles diagramu oka (Power Penalty).

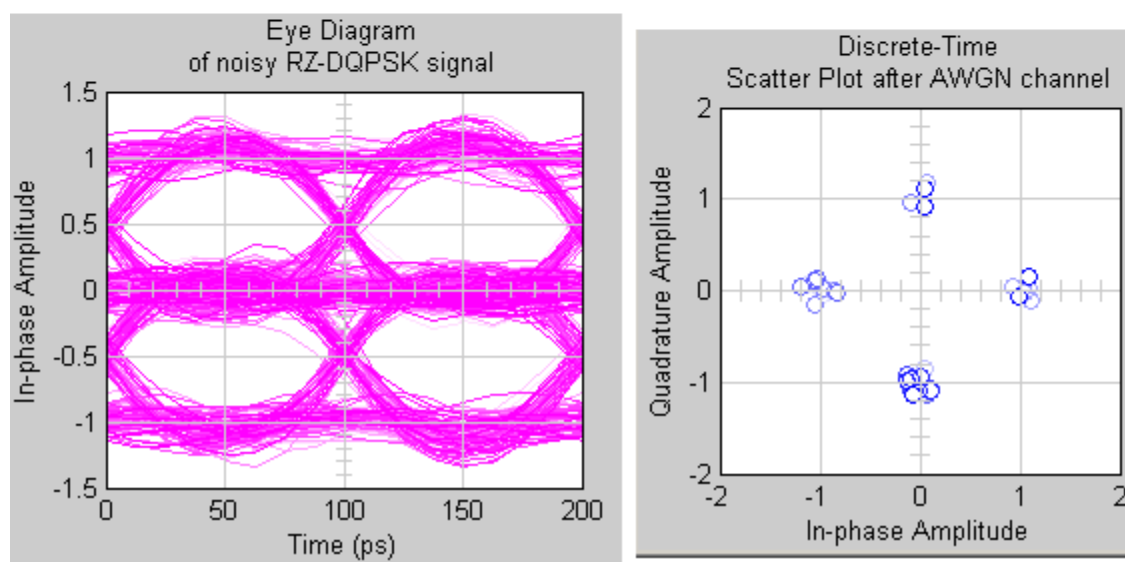
Typ vlákna	Druh modulace	Délka vlákna L	DGD	Power Penalty ξ
G.655.B	NRZ-OOK	1000 km	15,8114 ps	4,4 dB
	RZ-OOK	1000 km	15,8114 ps	2,2 dB
	NRZ-DBPSK	1000 km	15,8114 ps	5,0 dB
	RZ-DBPSK	1000 km	15,8114 ps	2,5 dB
	NRZ DQPSK	1000 km	15,8114 ps	1,25 dB
	RZ-DQPSK	1000 km	15,8114 ps	0,625 dB
G.652.D	NRZ-OOK	1000 km	6,3246 ps	0,704 dB
	RZ-OOK	1000 km	6,3246 ps	0,352 dB
	NRZ-DBPSK	1000 km	6,3246 ps	0,8 dB
	RZ-DBPSK	1000 km	6,3246 ps	0,4 dB
	NRZ DQPSK	1000 km	6,3246 ps	0,2 dB
	RZ-DQPSK	1000 km	6,3246 ps	0,1 dB

Z hodnot uvedených v tabulce Tab. 3.8 je patrné, že nejlepší toleranci k PMD mají modulace RZ-DQPSK a NRZ-DQPSK. Z výsledků simulací je však také patrné, že i modulace RZ-OOK vykazuje relativně (pro některé aplikace) vyhovující hodnotu Power Penalty. Nevýhodou kvadrurních modulací je složitost a vysoká cena realizace. Nejhorší toleranci k PMD mají modulace NRZ-DBPSK a NRZ-OOK. Nevýhodou NRZ-DBPSK je opět složitější realizace než NRZ-OOK. Výhodnější než NRZ-DBPSK a NRZ-OOK je pravděpodobně použití RZ-DBPSK a RZ-OOK. Na obrázku Obr. 3.27 je názorně zobrazen diagram oka pro délky 100 km a 1000 km se zaznamenanými výslednými hodnotami SNR. Grafy všech ostatních vláken a délek jsou uvedeny v příloze C a D.

$L = 100 \text{ km}$, $\text{DGD} = 5 \text{ ps}$, $\text{SNR} = 19,1375 \text{ dB}$

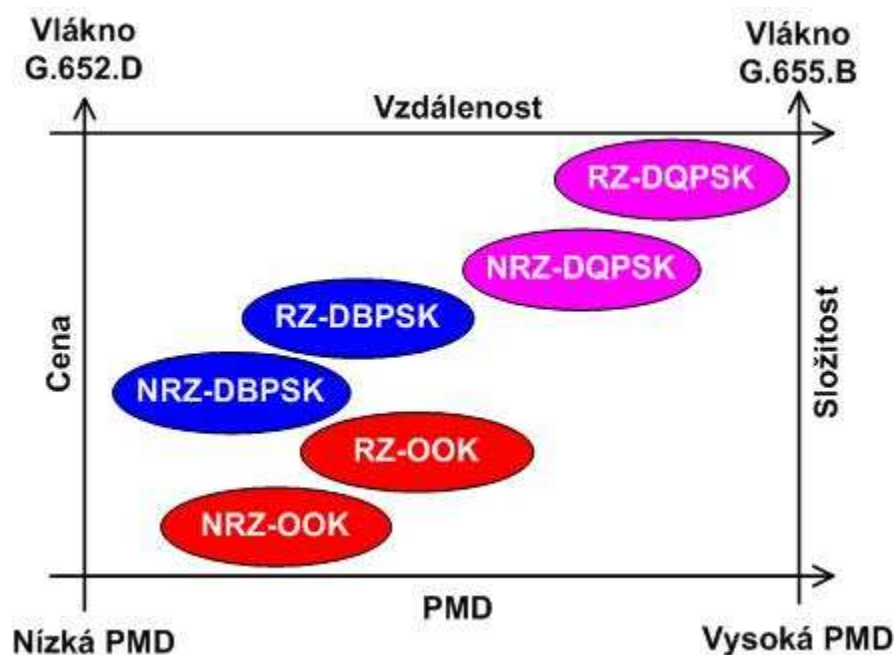


$L = 1000 \text{ km}$, $\text{DGD} = 15,8114 \text{ ps}$, $\text{SNR} = 18,575 \text{ dB}$



Obr. 3.27. Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DQPSK, G.655.B.

Obrázek Obr. 3.28. přehledně ukazuje, která z modulací je vhodná pro konkrétní aplikaci. Obrázek zohledňuje nejvýznamnější aspekt – totiž PMD, ale i cenu a složitost v závislosti na délce optické trasy.

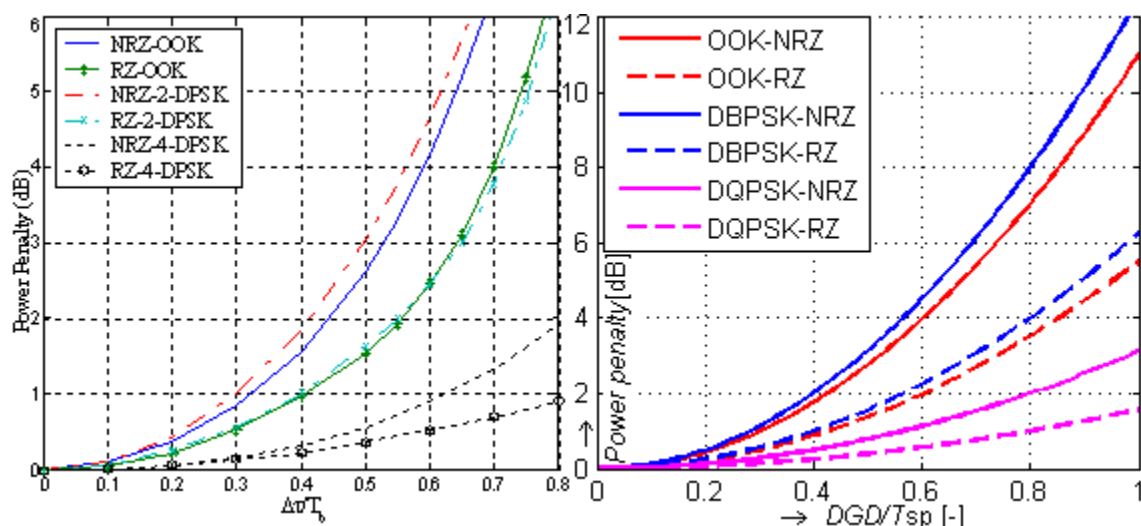


Obr. 3.28. Shrnutí všech druhů modulací

– **Ověření dosažených výsledků**

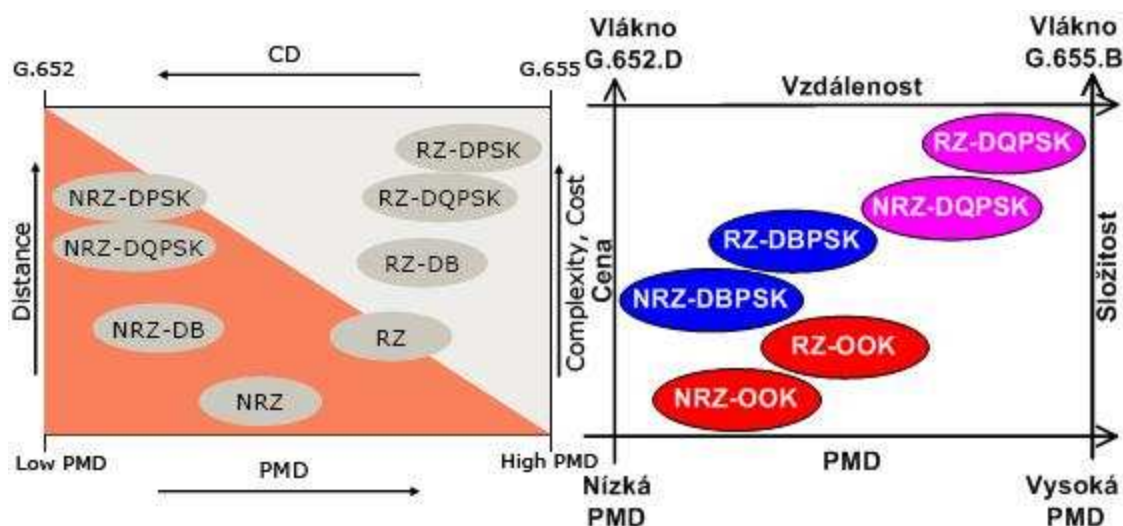
Pro srovnání výpočetních mechanismů byly použity výsledky disertační práce autora čínské národnosti Jina Wang, absolventa University of California, Berkeley, CA 94720. Jin Wang ve své práci z roku 2003 „Performance Evaluation of DPSK Optical Fiber Communication Systems” [19] zcela jinými teoretickými metodami dospěl k teoretickým závěrům, které ve své době ještě nemohl podložit praktickými kontrolními mechanismy, i tak však byla jeho práce velkým přínosem. Jin Wang se ve své studii zabývá chromatickou a polarizační vidovou disperzí a vyhodnocuje její vliv na pokles diagramu oka pro různé modulace.

Na obrázku Obr. 3.29 je zobrazeno srovnání převzatého výstupu práce Jina Wang (vlevo) se závěry simulační aplikace, která je součástí této disertační práce. Závislost Power Penalty byla záměrně vyjádřena stejným způsobem, aby byla na první pohled patrná shoda obou výsledků vědeckých prací.



Obr. 3.29. Porovnání závislosti Power Penalty s výsledky Jina Wanga.

Pro srovnání vhodnosti jednotlivých modulačních formátů byla použita vědecká práce zaměstnance anglické společnosti ADVA Optical Networking Ltd., Clifton Moor, York UK. Dr. Klaus Grobe ve své práci „40Gb/s in metro and regional optical networking“ [18] uvádí své výsledky v přehledném grafu závislosti délky, finanční náročnosti na hodnotách CD a PMD. Autor užívá modulace OOK, DBPSK, DQPSK. Navíc ve své práci používá modulaci DB (DuoBinary). DB je kombinace binární modulace PSK a OOK. Nulová hodnota signálu je označována „0“, kladná hodnota „1“ a záporná „-1“. Grafy se sice liší v podání výsledků chromatické disperze, přesto je však na obrázku Obr. 3.30 jasně patrné, že výhodnost některých modulačních formátů je v obou pracích shodná. Vlevo je graf z práce Dr. Klause Grobeho zahrnující do svých výsledků i chromatickou disperzi.



Obr. 3.30. Porovnání výsledků modulací s prací autora Dr. Klause Grobe

Z levé části Obr. 3.30 je patrné, že všechny modulace s návratem k nule mají lepší toleranci k vysokým hodnotám polarizační vidové disperze. Naproti tomu modulace s NRZ mají zase lepší toleranci k vysokým hodnotám chromatické disperze. V pravé

části Obr. 3.30 vidíme, jaký vliv bude mít na modulace pouhá polarizační vidová disperze.

Mezi hlavní rozdíly výsledku obou prací patří vyhodnocení jednotlivých modulací v závislosti na délce optického vlákna. V článku [18] je modulace NRZ-DQPSK a RZ-DQPSK vyhodnocena v závislosti na vzdálenosti hůře než modulace NRZ-DBPSK a RZ-DBPSK. Ze závěrů naprogramované simulační aplikace je zřejmé, že s použitím modulací NRZ-DQPSK a RZ-DQPSK lze dosáhnout delších vzdáleností, jak vyplývá z grafů poklesů Power Penalty v příloze B. Zbylé modulace se patrně liší již jen příčinou nezakalkulovaného vlivu chromatické disperze. Následující tabulka Tab. 3.9 vzájemně porovnává jednotlivé modulace.

Tab. 3.9. Porovnání modulací s výsledky práce Dr. Klause Grobe.

Vzdálenost	výsledky Dr. K. Grobe (s chromatickou disperzí)	Výstupy simulační aplikace (bez chromatické disperze)
0 ∞	NRZ-OOK	NRZ-DBPSK
	RZ-OOK	NRZ-OOK
	NRZ-DQPSK	RZ-DBPSK
	NRZ-DBPSK	RZ-OOK
	RZ DQPSK	NRZ-DQPSK
	RZ-DBPSK	RZ DQPSK

– Závěr

Díky simulační aplikaci byl otestován vliv běžných optických modulací (NRZ-OOK, RZ-OOK, NRZ-DBPSK, RZ-DBPSK, NRZ-DQPSK a RZ-DQPSK) na negativní jev – polarizační vidovou disperzi.

Analýza byla provedena pomocí diagramu oka, jenž se užívá pro analýzu signálu používaného v digitálních přenosech. Lze jím diagnostikovat kanálové chyby. S diagramem oka souvisí bitová chybovost kanálu (BER) a odstup signálu od šumu (SNR). Bitová chybovost kanálu BER závisí na přenosové rychlosti a je pro každý modulační signál odlišná. Pro přenosovou rychlost $B = 40 \text{ Gb/s}$ musí být minimálně $\text{BER} = 10^{-12}$. Zvyšuje-li se SNR, BER klesá. Pokles SNR důsledkem PMD popisuje hodnota Power Penalty, která je závislá na modulačním formátu, přenosové rychlosti, DGD, výkonovém poměru, bezrozměrném parametru A a druhu a délce optického vlákna.

Díky grafickým výstupům aplikace lze rozhodnout, jak velkou toleranci k polarizační vidové disperzi jednotlivé modulační formáty mají. Modulace RZ-DQPSK a NRZ-DQPSK se tak jeví jako nejvýhodnější.

4. PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ

Ve spolupráci se společností PROFiber Networking CZ s.r.o. byly v měsíci lednu 2008 provedeny zkušební náměry chromatické a polarizační vidové disperze. Jednalo se o kombinace uložených testovacích kabelů 1,5 km a 25 km, přičemž PMD byla měřena na šesti testovacích vláknech délky 25 km uložených ve dvou různých kabelových trasách a na třech dalších testovacích vláknech uložených v tomtéž kabelu o délce 1,5 km. Společnost PROFiber Networking CZ s.r.o. umožnila získat náměry pomocí přístroje EXFO FTB-5500B, který bezplatně zapůjčila. Díky výrobci měřicích přístrojů, kanadské společnosti EXFO Electro-Optical Engineering Inc., která bezplatně poskytla profesionální softwarový nástroj ToolBox 6 s nainstalovanými kity Polarization Mode Dispersion Analyzer a Polarization Mode Dispersion Analyzer Version B, bylo možné naměřené výsledky zpracovat a přehledně vyhodnotit.

– Výsledky

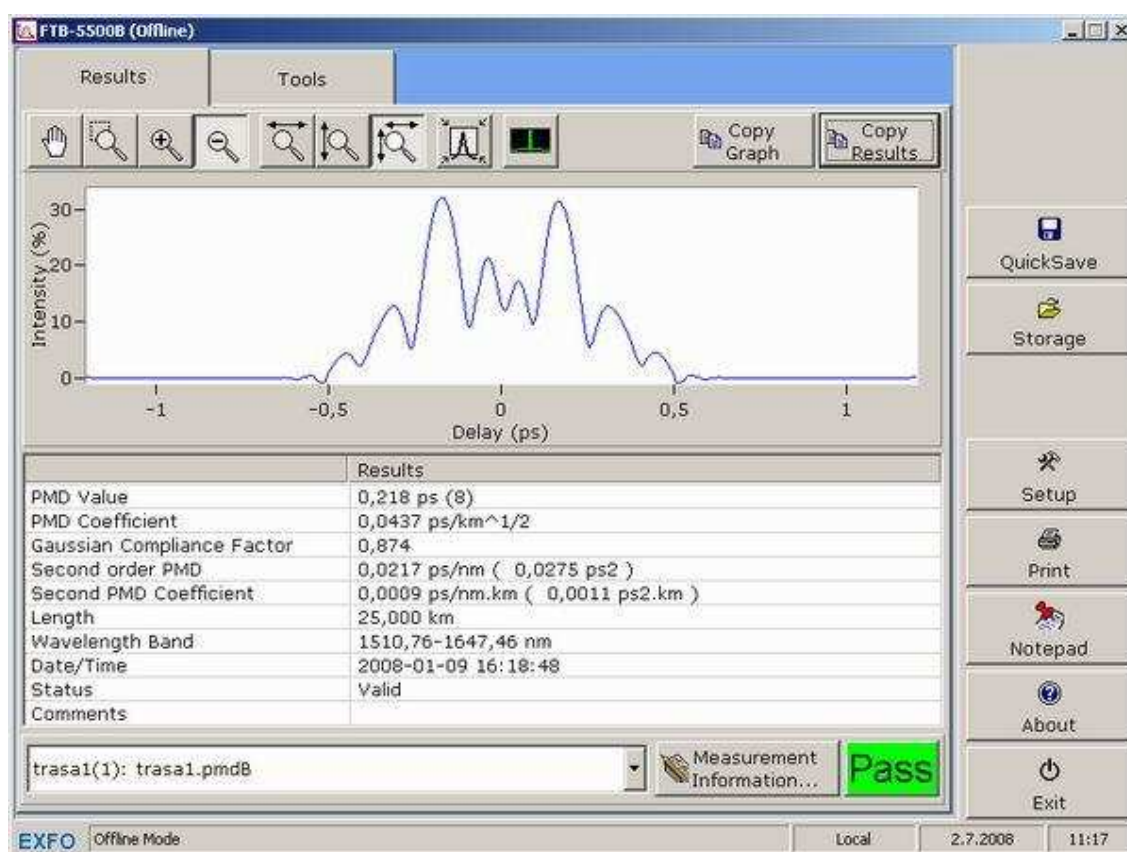
Tabulka Tab. 4.1 obsahuje přehled tras a vláken proměřených přístrojem FTB-5500B. Měření bylo prováděno v pásmech C a L, přesné rozsahy vlnových délek obsahuje uvedená tabulka. Použité vlákno pochází od výrobce Samsung, výrobcem kabelu je Telecom Fiber. Jelikož měření probíhala ve dvou časových úsecích a na jiných místech, byly použity dva měřicí přístroje stejného typu se sériovými čísly 0000371016 a 0000264227. Protokoly z měření spolu s jednotlivými náměry ve formátu pmdB jsou uvedeny na příloženém CD.

Tab. 4.1. Přehled vláken a tras měřených přístrojem FTB-5500B.

Trasa	Vlákno	Délka [km]	rozsah měření [nm]	hodnota PMD [ps]	PMD koeficient [ps.km ^{-1/2}]
A	01	25	1510 – 1647	0,218	0,0437
A	02	25	1511 – 1649	0,185	0,0371
A	03	25	1394 – 1773	0,352	0,0704
B	04	25	1509 – 1652	0,304	0,0607
B	05	25	1512 – 1649	0,415	0,0829
B	06	25	1510 - 1649	0,402	0,0803
C	07	1,5	1512 – 1574	0,154	0,126
C	08	1,5	1512 - 1574	0,185	0,037
C	09	1,5	1510 - 1574	0,029	0,023
C	10	1,5	1512 - 1574	0,064	0,052

Měřením přístrojem FTB-5500B se podařilo získat hodnoty DGD, z nichž je možno statistickými metodami získat výslednou hodnotu PMD. Vzhledem k tomu, že obslužný software EXFO ToolBox 6 neumožňuje s naměřenými hodnotami nijak variantně pracovat, nýbrž stroze zobrazí výsledky měření, byly tyto surové výstupní hodnoty použity pro další zpracování aplikacemi vyvinutými v rámci této disertační práce.

Na Obr. 3.1 je ukázán náhled kitu PMD Analyzer Version B pro první vlákno na trase A. Základní obrazovka umožňuje okamžitě odečítat výsledné hodnoty PMD, měrné hodnoty PMD a další hodnoty podle tabulky Tab. 4.2. Tabulku hodnot vyjadřující četnost jednotlivých zpoždění PMD Analyzer nevypisuje, proto je nutno tato surová data vyzískat přímo ze souboru hodnot, kterými PMD Analyzer vykresluje graf závislosti intenzity [%] na zpoždění [ps], viz grafy Obr. 3.2, Obr. 3.3 a Obr. 3.4.

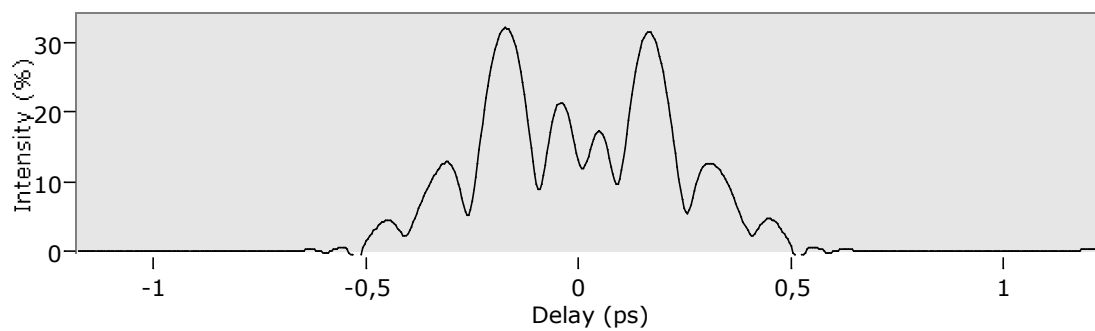


Obr. 3.1. Náhled kitu PMD Analyzer Version B pro první vlákno na trase A.

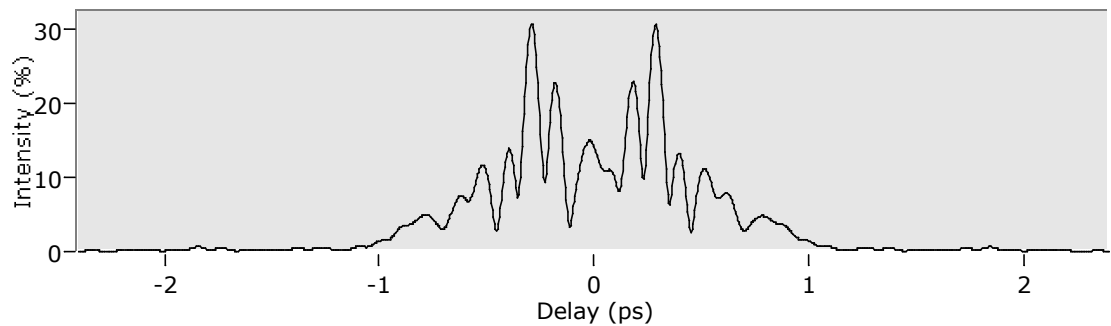
Aplikace Výpočet PMD tyto hodnoty dokáže velmi přehledně zpracovat a použitím statistické metody Monte Carlo stanoví limity pro daný typ optického vlákna (délkový i kapacitní) a v případě, že jeden z limitů byl již překročen (vlákno tudíž nevyhovuje doporučení ITU) sama navrhne řešení snížením přenosové rychlosti či zkrácením optického vlákna.

Tab. 4.2. Výstupy z měření přístrojem FTB-5500B.

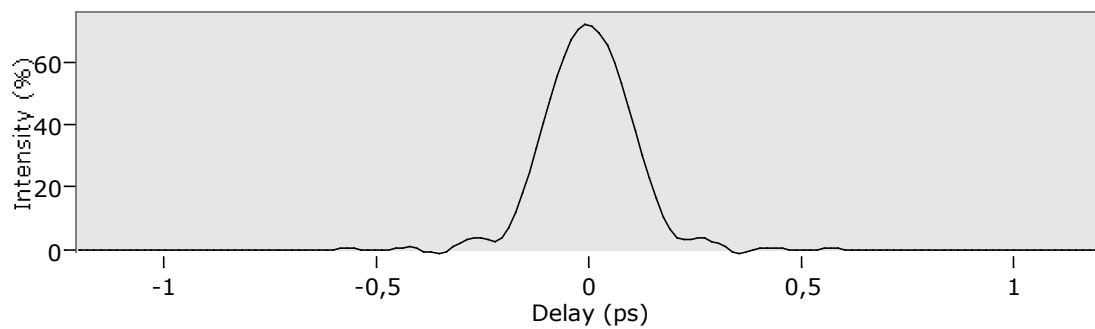
PMD Value:	0,218 ps
PMD Coefficient:	0,0437 ps.km ^{-1/2}
Gaussian Compliance Factor:	0,874
Second order PMD:	0,0217 ps/nm (0,0275 ps ²)
Second PMD Coefficient:	0,0009 ps/nm.km (0,0011 ps ² .km)
Length:	25,000 km
Wavelength Band:	1510,76-1647,46 nm
Date/Time:	2008-01-09 16:18:48
Status:	Valid
Type:	Telecom Fiber



Obr. 3.2. Graf závislosti intenzity [%] na zpoždění [ps], vlákno 1, trasa A.



Obr. 3.3. Graf závislosti intenzity [%] na zpoždění [ps], vlákno 6, trasa B.



Obr. 3.4. Graf závislosti intenzity [%] na zpoždění [ps], vlákno 8, trasa C.

– **Diskuse k výsledkům**

Grafy na obrázcích Obr. 3.2, Obr. 3.3 a Obr. 3.4 jednoznačně potvrzují princip vzniku polarizační vidové disperze vlivem součtu horizontální a vertikální složky polarizace. U krátké kabelové trasy v Obr. 3.4 je zřetelně vidět jeden hlavní lalok vzniklý rozptylem energie světla v čase na příliš krátké vzdálenosti. Přitom na obrázcích Obr. 3.2 a Obr. 3.3 jsou patrné hlavní laloky dva, jež vznikly oddálením obou maxim vlivem dostatečné délky optického vlákna, po kterou mohl rozptyl působit. Bohužel měřicí přístroj FTB-5500B neumožňuje získat hodnoty pro jednotlivé polarizační roviny zvlášť.

Pro konkrétní vlákna na trasách A, B a C bylo díky statistickému zpracování možno stanovit výslednou tabulku hodnot Tab. 4.3 teoretických maximálních kapacit. Hodnoty byly získány aplikací Výpočet PMD. Je nutno připomenout, že tyto hodnoty jsou teoretické a vypočtené záměrně pouze na základě vlivu jevu PMD. V praxi by bylo velmi obtížné dosáhnout takových přenosových rychlostí vlivem ostatních negativních jevů popsanych v podkapitole B kapitoly 1.

Tab. 4.3. Přehled teoretických přenosových rychlostí.

Trasa	Vlákno	Délka [km]	hodnota PMD [ps]	PMD koeficient [ps.km ^{-1/2}]	Přenosová rychlost [Gbps]
A	01	25	0,218	0,0437	458,72
A	02	25	0,185	0,0371	540,54
A	03	25	0,352	0,0704	284,09
B	04	25	0,304	0,0607	328,95
B	05	25	0,415	0,0829	240,96
B	06	25	0,402	0,0803	248,76
C	07	1,5	0,154	0,126	649,35
C	08	1,5	0,185	0,037	540,54
C	09	1,5	0,029	0,023	3448,28
C	10	1,5	0,064	0,052	1562,50

5. ZÁVĚR

Disertační práce se ve své úvodní části zabývá vlivem negativních jevů na signál přenášený optickým vláknem. Postupně jsou představovány jednotlivé jevy vznikající v optickém vlákně, je uvedena jejich příčina, následky a možnosti jejich odstranění či kompenzování. V souladu se zadáním disertační práce se přehled současného stavu řešené problematiky a celá další práce orientuje výhradně na jev zvaný polarizační vidová disperze (PMD), který je zde velmi podrobně vysvětlen včetně matematických principů. V další části přehledu současného stavu problematiky PMD jsou uvedeny principy, kterých bylo využito při výzkumu, zejména popis měřicích technik, popis používaných modulačních technik, matematika chybovosti a statistické matematické operace.

Nejvýznamější přínos disertační práce spočívá v komplexním souboru aplikací, které umožňují do značné míry modelovat jev zvaný polarizační vidová disperze a získat tak velmi ucelený obraz o jeho vzniku, vývoji, šíření a vlivu na přenášený signál.

Prvním představeným výstupem je výpočtová aplikace využívající složitého matematického aparátu zpracování statistických dat metodou Monte Carlo. Přínosem této aplikace je významné usnadnění výpočtů a okamžité získání výstupní hodnoty z naměřených hodnot diferenciálního grupového zpoždění.

Návrhová aplikace, která byla vytvořena jako poloprofesionální a využitelná v rámci laboratorních cvičení či ke komerční projekci optických tras, umožňuje velmi přesně a přehledně vymodelovat poměry na trase z pohledu útlumu, chromatické disperze a polarizační vidové disperze. Vytvořený program umožňuje přidávat libovolné komponenty optické trasy, výstupní hodnoty okamžitě přepočítává a nabízí grafické výstupy vývoje zmiňovaných veličin v závislosti na délce optické trasy.

Soubor je doplněn trojicí simulačních aplikací, z nichž dvě se věnují multiplexním systémům. Simulátory vytvořené v prostředí MATLAB umožňují vyhodnotit vliv polarizační vidové disperze u multiplexních systémů a omezení vlivu jevu PMD. Tím je značně usnadněn postup hledání kompromisu při použití multiplexních systémů, což je stěžejním tématem této práce. Třetí simulací je aplikace Momentka PMD, která umožňuje díky skrytému matematickému aparátu uživatelsky velmi příjemně zobrazit okamžitý stav obou polarizačních rovin v libovolném bodě optického vlákna.

V další části následuje rozsáhlá podkapitola věnující se možnosti eliminovat vliv PMD použitím různých modulačních formátů. Za účelem získání spolehlivého výsledku bylo nutno naprogramovat a v prostředí MATLAB odsimulovat blokové diagramy testovaných modulačních formátů. Výstupním parametrem byla chybovost při totožných vstupních parametrech (na stejné optické trase), avšak odlišném použitém kódování. Nejlepší toleranci k PMD tak na základě výstupů simulací vykazují modulace RZ-DQPSK a NRZ-DQPSK. Je však také patrné, že i modulace RZ-OOK vykazuje dobrou hodnotu poklesu signálu k šumu. Nejhorší toleranci k PMD naopak mají modulace NRZ-DBPSK a NRZ-OOK. Nevýhodou NRZ-DBPSK je však složitější realizace než NRZ-OOK. Výhodnější než NRZ-DBPSK a NRZ-OOK je pravděpodobně

použití RZ-DBPSK a RZ-OOK. Detailní výsledky jsou uvedeny v příslušné podkapitole D. Díky početné obrazové části simulací musely být tyto uvedeny v samostatné příloze této práce.

Měřeními získané hodnoty, díky nimž bylo možno alespoň částečně prakticky ověřit dosažené výsledky, jsou uvedeny v kapitole 4. Jejich získání nebylo snadné, jelikož rozšíření přístrojů schopných měřit PMD není prozatím dostatečné. Proto je velkým úspěchem, že velké množství teoreticky získaných výsledků bylo možno ověřit vlastními měřeními a nikoliv pouze srovnáním s výsledky jiných vědců, jak je tomu v případě simulace vlivu modulačních formátů na význam jevu PMD.

Disertační práce je ucelenou vědeckou studií jevu polarizační vidové disperze u multiplexních i nemultiplexních systémů. Vytyčené cíle disertační práce byly beze zbytku splněny. Výsledky jsou podloženy rozsáhlými simulacemi a praktickými měřeními, které teoreticky získané hodnoty vesměs potvrzují. Kromě „pomůcek“ zjednodušujících do značné míry stanovení velikost PMD je významným přínosem vyhodnocení odolnosti používaných modulačních formátů vůči polarizační vidové disperzi.

V případě dalšího bádání v této oblasti nelze než doporučit praktické ověření výsledků odolnosti používaných modulačních formátů. Potvrzení simulacemi získaných výsledků by patrně znamenalo nové možnosti výrazného omezení vlivu polarizační vidové disperze a významné zvýšení kapacit stávajících i budoucích optických tras.

LITERATURA

Seznam použité literatury

- [1] GALTAROSSA, A., MENYUK, C., R.: *Polarization Mode Dispersion*. Springer Science + Business Media, Inc., New York, 2005, ISBN: 0-387-23193-5.
- [2] DAMASK, J., N.: *Polarization optics in telecommunications*. Springer Science + Business Media, Inc., New York, 2005, ISBN 0-387-22493-9.
- [3] AGRAWAL, G., P.: *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley, USA, 2002, ISBN 7302087490.
- [4] ELLIOTT B., GILMORE M.: *Fiber Optic Cabling*. Newnes; 2 edition (5 Dec 2001), ISBN-10: 0750650133.
- [5] AGRAWAL, Govind P. *Nonlinear Fiber Optics*. 2nd edition. San Diego : Academic Press, 1995. 592 s. ISBN 0-12-045142-5.
- [6] SALEH B. A. E., TEICH M. C.: *Fundamentals of Photonics*. Praha : Matfyzpress, 1996, 22 s., S. 779-1055, ISBN 80-85863-12-X (brož).

Doporučení ITU, normy IEC, ČSN:

- [7] ITU-T Recommendation G.652: *Characteristics of a single-mode optical fibre cable*. ITU-T, April 1997.
- [8] ITU-T Recommendation G.653: *Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable*. ITU-T, April 1997.
- [9] ITU-T Recommendation G.655: *Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable*. ITU-T J October 1996.
- [10] ITU-T Recommendation G.691: *Optical interfaces for single-channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical amplifiers*. ITU-T, 03/2006.
- [11] IEC 61282-3: work in progress, *Guidelines for the Calculation of PMD in Fibre Optic Systems*.
- [12] ČSN EN 61290-11-1 (359271) *Zkušební metody optických zesilovačů*. Část 11-1: Polarizační vidová disperze - Metoda analýzy vlastních čísel Jonesovy matice (JME), EAN kód: 8590963691077, účinná od 1.1.2004.
- [13] ITU-T RECOMMENDATION G.959.1: *Optical transport network physical layer interfaces*. [online]. 03/2006. Dostupný z WWW: <http://www.itu.int/rec/dologin_pubasp?lang=e&id=T-REC-G.959.1-200603-I!!PDF-&type=items>.

Výroční zprávy:

- [14] SDRUŽENÍ NIX.CZ: *VÝROČNÍ ZPRÁVA 2005*. Z.S.P.O., Praha, 2005
http://www.nix.cz/vyrzpravy/vyrocnizprava_NIX_2005.pdf.

Skriptum a kvalifikační práce:

- [15] ŠKORPIL, V.: *Vysokorychlostní komunikační technologie*. VUT – Ústav telekomunikací, 2002, ISBN 80-214-2244-0.
- [16] HAVELKA, D. *Nelineární vlivy optických vláken*. Diplomová práce. VUT FEKT, Brno 2007.
- [17] URBAN, F., MIKEL, B. *Optoelektronika a optické komunikace*. Skriptum. VUT FEKT, Brno, 2003.
- [18] Grobe, K.: *40 Gb/s in metro and regional optical networking*. [online], dostupný z WWW: <http://www.terena.nl/events/tnc2006/core/getfile.php?file_id=707>

- [19] WANG, J. : *Performance evaluation of DPSK optical fiber communication systems*. [online], dostupný z WWW:< <http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee290f/sp04/DissertationTalk.ppt> >.
- [20] AGILENT TECHNOLOGIES : *Eye diagram measurements in advanced design system*. [online]. Dostupný z WWW:< http://eesof.tm.agilent.com/pdf/si_seminar_2006_eye_diagrams.pdf >.
- [21] CHAPMAN, S., J.: *MATLAB Programming for Engineers, 4e*. Cengage Learning, 2008, ISBN: 978-0-495-24449-3.

Technické zprávy:

- [22] ARUN-PRASAD CHIMATA, CHRISTOPHER A. *Development of an Adaptive Polarization-Mode Disperszion Compenzation System*. Technická zpráva, The University of Kansas, 2003, ITTC-FY2003-TR-18834-02.
- [23] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P.: *Nová metoda měření PMD optických kabelových tras*. MIKROKOM s.r.o., CABLEX, České Budějovice 2002.

Časopisecké články a příspěvky ve sbornících:

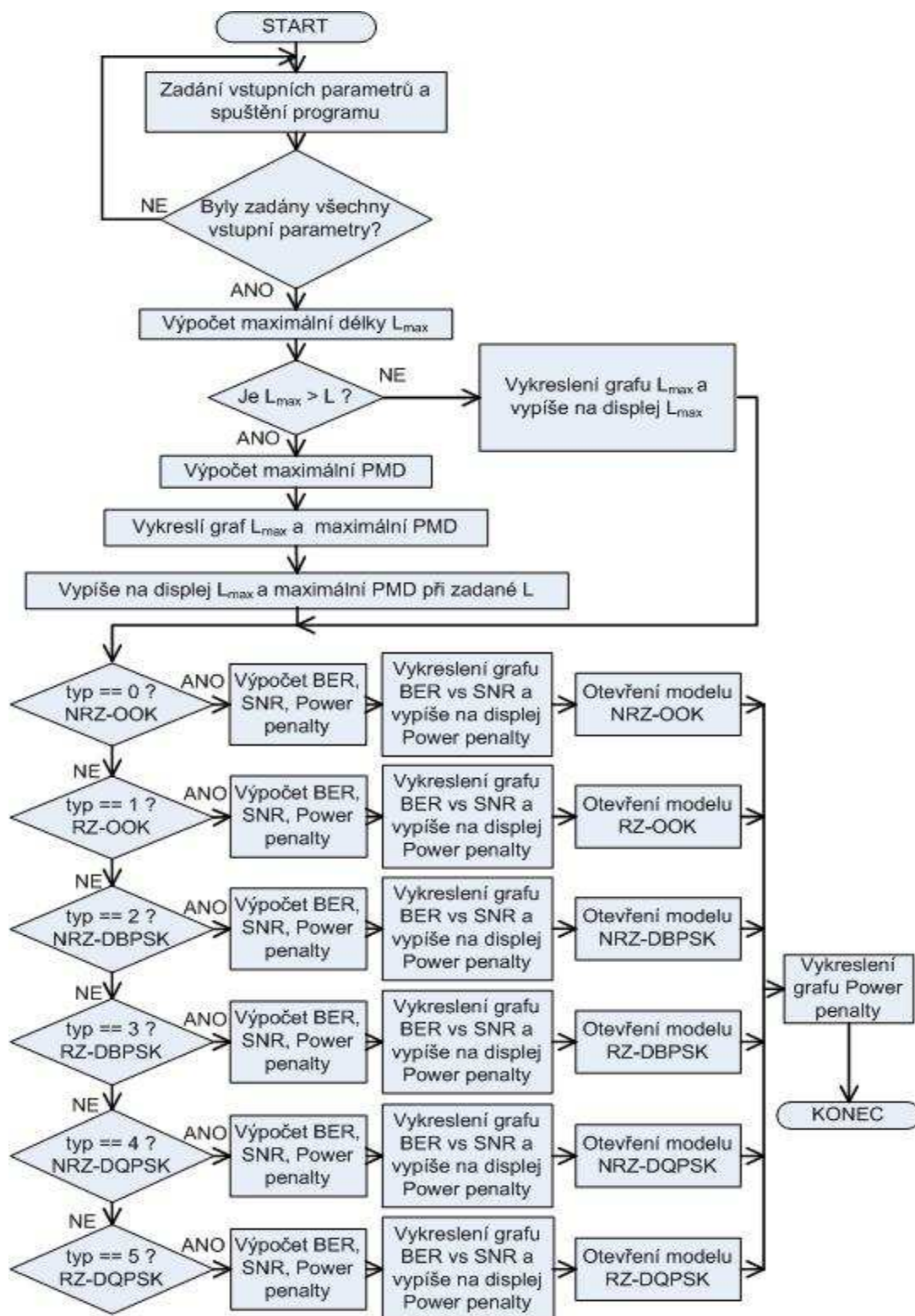
- [24] LIU, X., YANG, B., ZHANG, X.: *Polarization mode dispersion in WDM systems*. in Optical and Quantum Electronics, Volume 34, Number 7 / July, 2002, Springer Netherlands, s. 677-685, ISSN 0306-8919 (Print) 1572-817X (Online).
- [25] PUZIO, M., ZHU, Z., BLUM, R., ANDREKSON, R., LI, T., SADJAPDOUR, H.: *Channel coding for polarization-mode dispersion limited optical fiber transmission*. in Optics Express, Vol. 12, Issue 18, 2004, ISSN: 4333-4338.
- [26] GORDON J. P., KOGELNIK H.: *PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers*. in Proceedings National Academy of Sciences of the USA, April 25, 2000, vol. 97, ISSN: 9 4541-4550.

Seznam vlastních prací

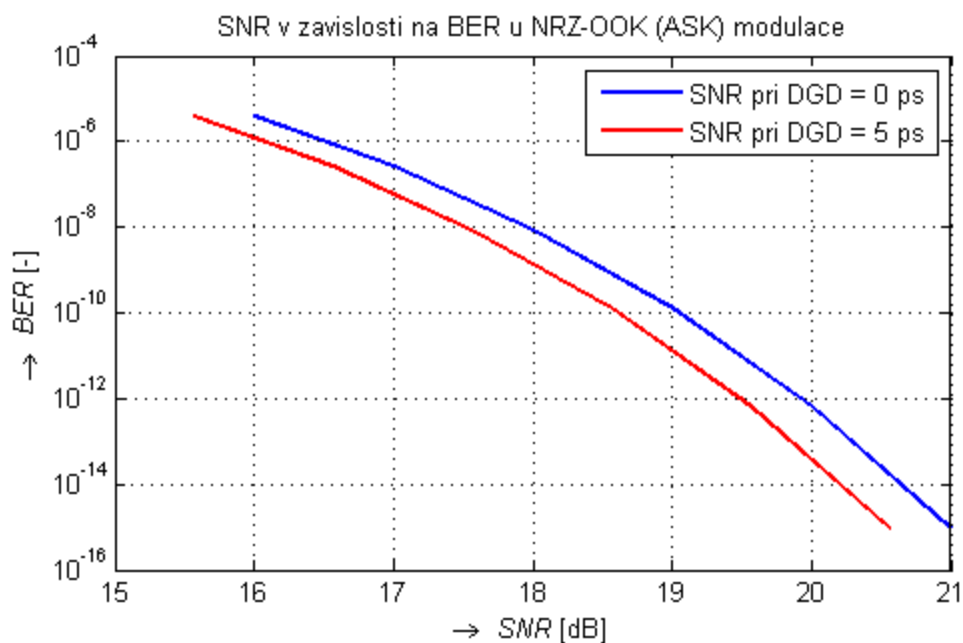
- [27] KYSELÁK, M.; DOROCIAK, P.; FILKA, M.: *The Optical Modulation Format Impact on Polarization Mode Dispersion*. In International Journal of Computer Science and Network Security. 2008. 2008(5). p. 27 - 30. ISSN 1738-7906.
- [28] KYSELÁK, M.; DOROCIAK, P.: *Vliv polarizační vidové disperze na odolnost modulačních formátů*. In Access Server. 2008. vol. 6. p. 1 - 5., číslo článku 2008040002, ISSN 1214-9675.
- [29] KYSELÁK, M.; DOROCIAK, P.: *Vliv diferenčního skupinového zpoždění na chybovost optického kanálu*. In Elektorevue - Internetový časopis (<http://www.elektorevue.cz>). 2008. 10(6). p. 1 - 6. ISSN 1213-1539.
- [30] KYSELÁK, M.; FILKA, M.; KREJČA, L.: *Simulation of pulse propagation in WDM systems*. In International Transaction on Computer Science and Engineering. 2008. 46(5). p. 150 - 155. ISSN 1738-6438.
- [31] KYSELÁK, M.; FILKA, M. *The Design of Optical Routes Applications*. Springer Verlag. Mobile and Wireless Communication Networks. 2007. 12(1). p. 595 - 601. ISSN 1571-5736.
- [32] KYSELÁK, M.; FILKA, M.; SKŘIPSKÝ, J. *The Dispersion of SM Optical Fibers*. International Transaction on Computer Science and Engineering. 2007. 35(1). p. 1 - 7. ISSN 1738-6438.

- [33] KYSELÁK, M.; FILKA, M.; BERNKOPF, M. *Optical Communication Routes Planning*. International Journal of Computer Science and Network Security. 2007. 2007(6). p. 27 - 30. ISSN 1738-7906.
- [34] KYSELÁK, M. FILKA, M. KOVÁŘ, P. *Novell Approach to the Solution of Optical Fibre Dispersion Effects*. In Telecommunications and Signal Processing TSP - 2006. Brno, Brno. 2006. p. 25 - 28. ISBN 80-214-3226-8.
- [35] KYSELÁK, M. *High-Speed Optical Networks Planning*. In Research in Telecommunication Technology 2007. Liptovský Ján, ŽU Žilina. 2007. p. 1 - 3. ISBN 978-80-8070-735-4.

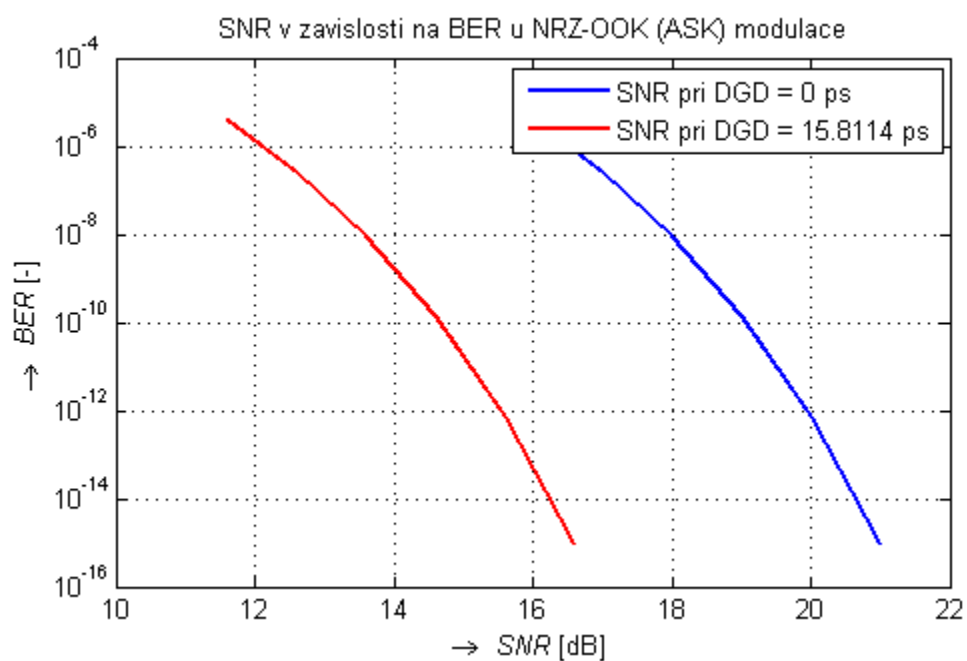
A. Blokové schéma algoritmu programu “Modulační formáty”



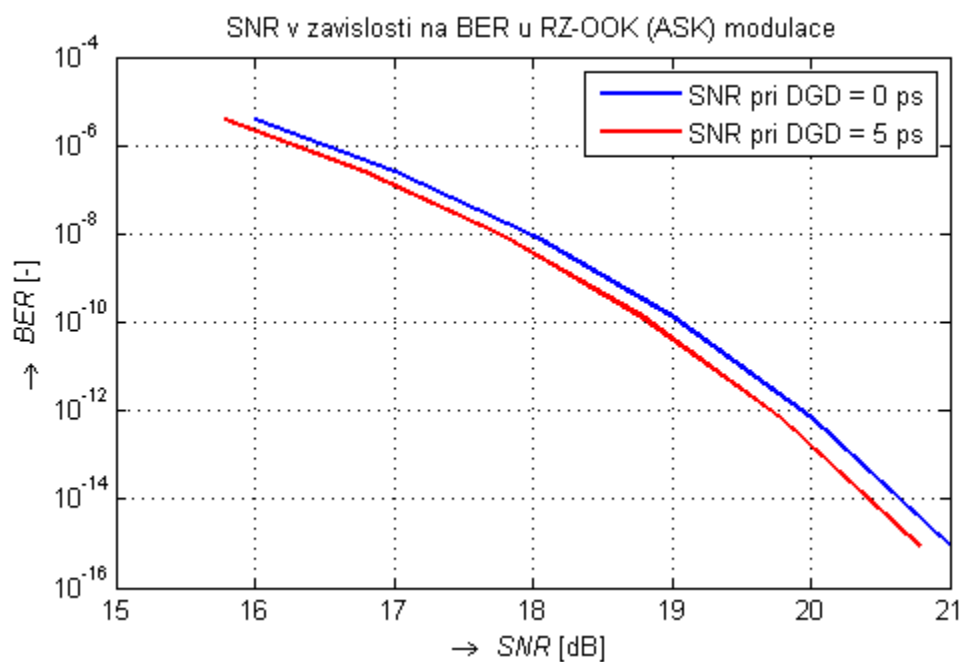
B. Grafy poklesu hodnot SNR pro jednotlivé modulační formáty



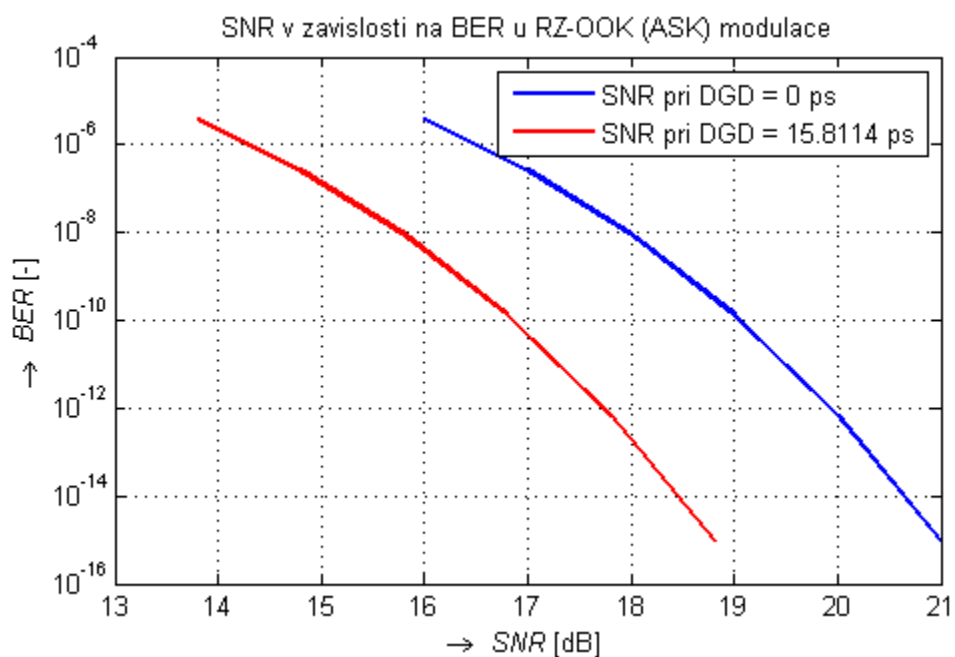
Obr. B.1. Pokles hodnoty SNR u NRZ-OOK pro $L_2 = 100$ km (G.655.B).



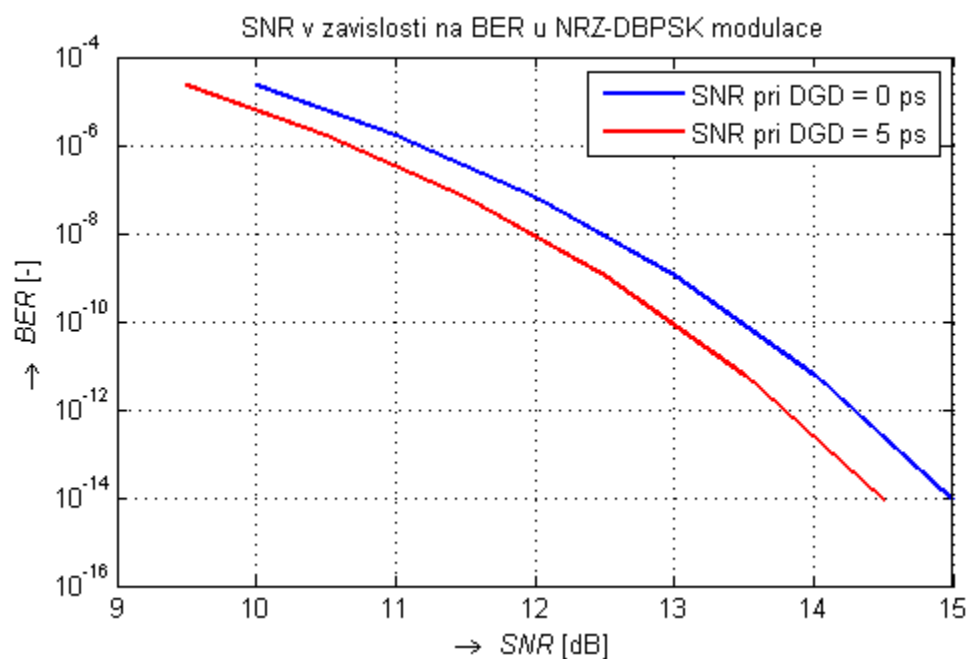
Obr. B.2. Pokles hodnoty SNR u NRZ-OOK pro $L_3 = 1000$ km (G.655.B).



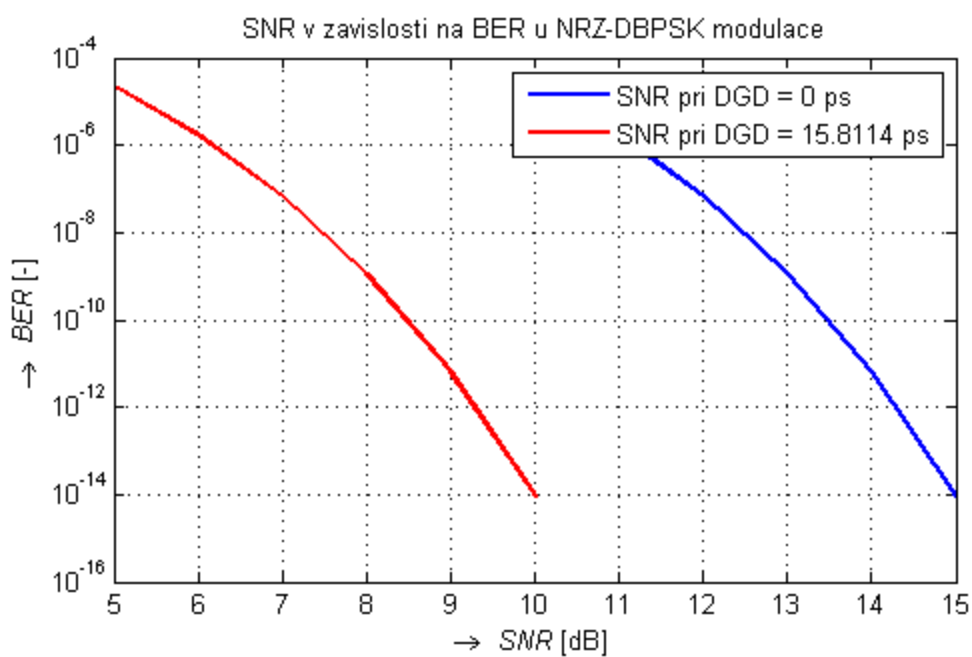
Obr. B.3. Pokles hodnoty SNR u RZ-OOK pro $L_2 = 100$ km (G.655.B).



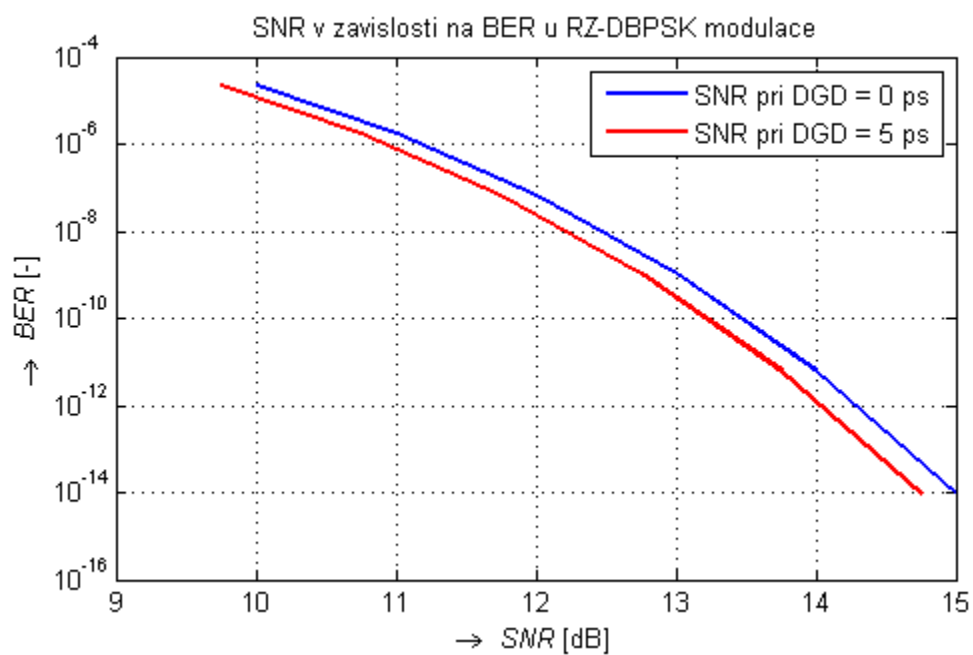
Obr. B.4. Pokles hodnoty SNR u RZ-OOK pro $L_3 = 1000$ km (G.655.B).



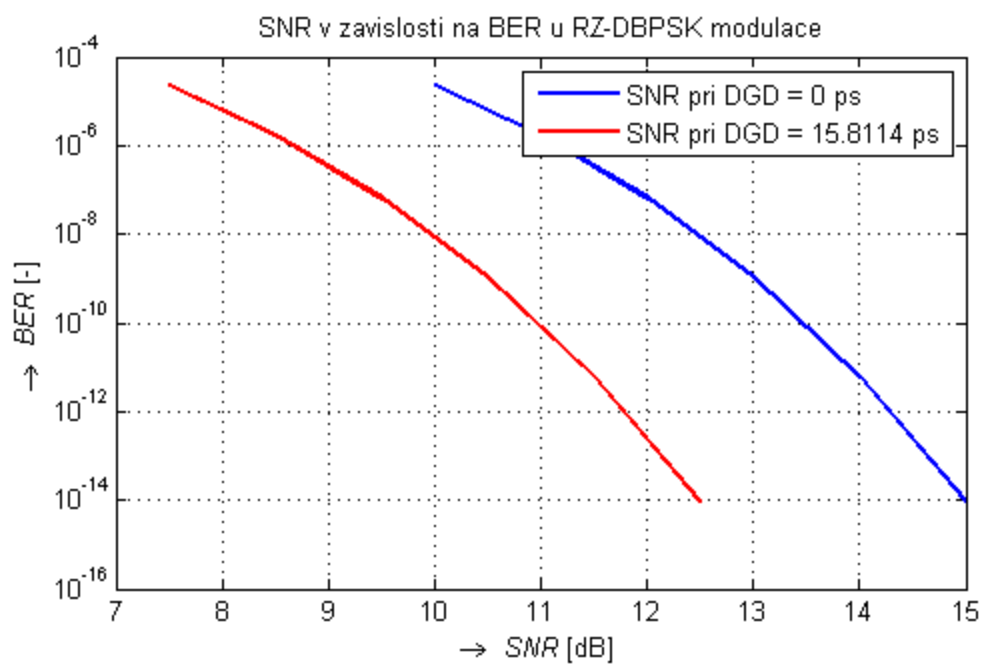
Obr. B.5. Pokles hodnoty SNR u NRZ-DBPSK pro $L_2 = 100$ km (G.655.B).



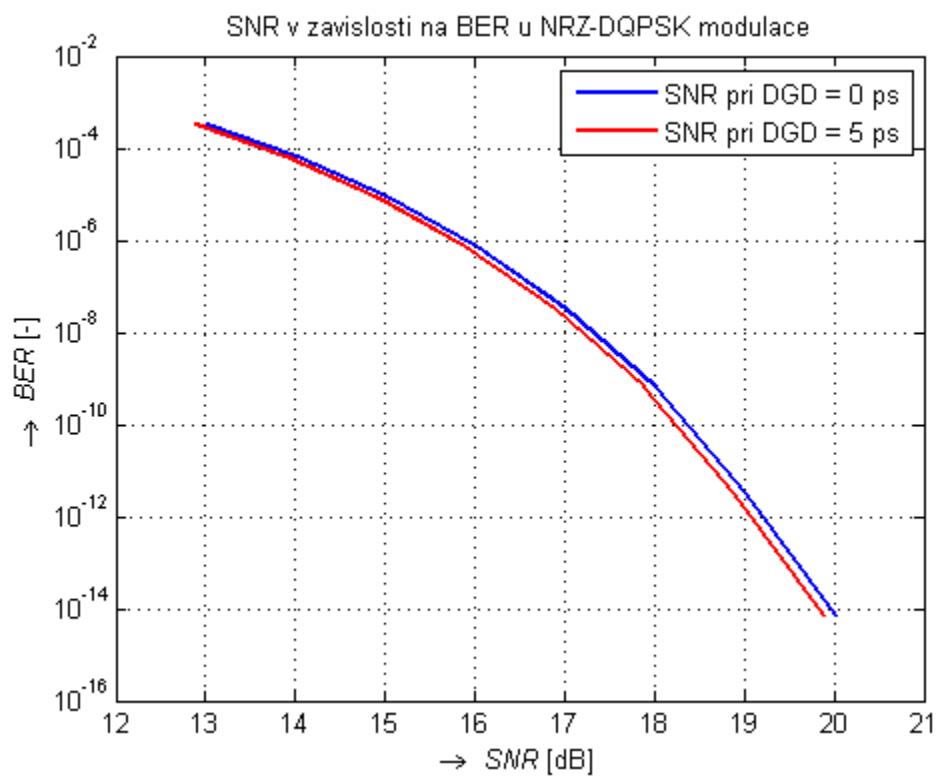
Obr. B.6. Pokles hodnoty SNR u NRZ-DBPSK pro $L_3 = 1000$ km (G.655.B).



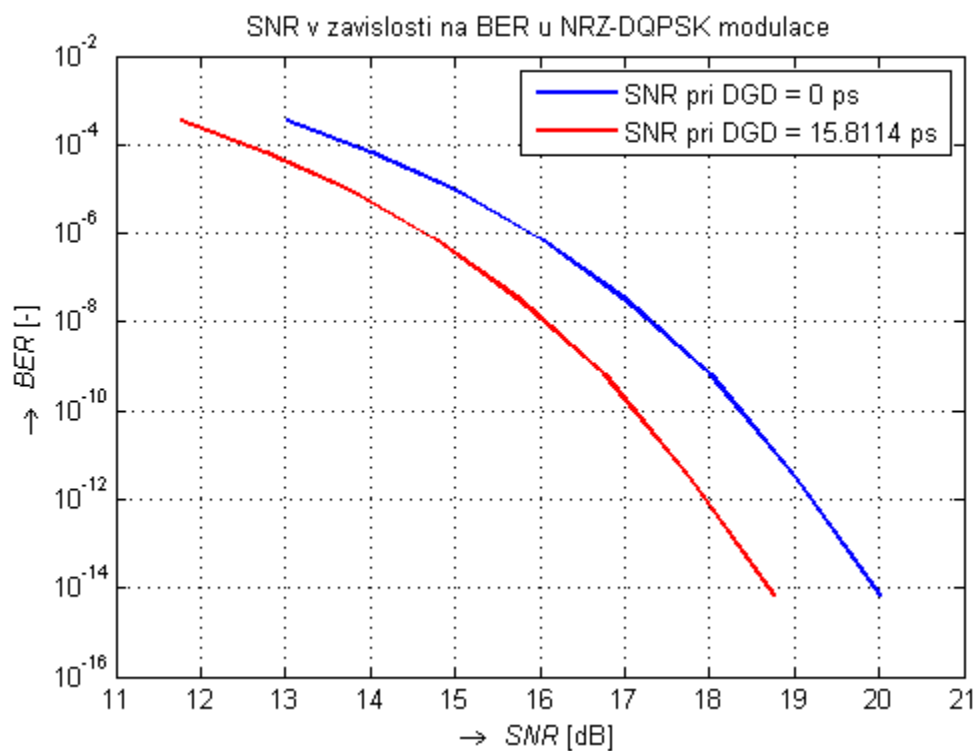
Obr. B.7. Pokles hodnoty SNR u RZ-DBPSK pro $L_2 = 100$ km (G.655.B).



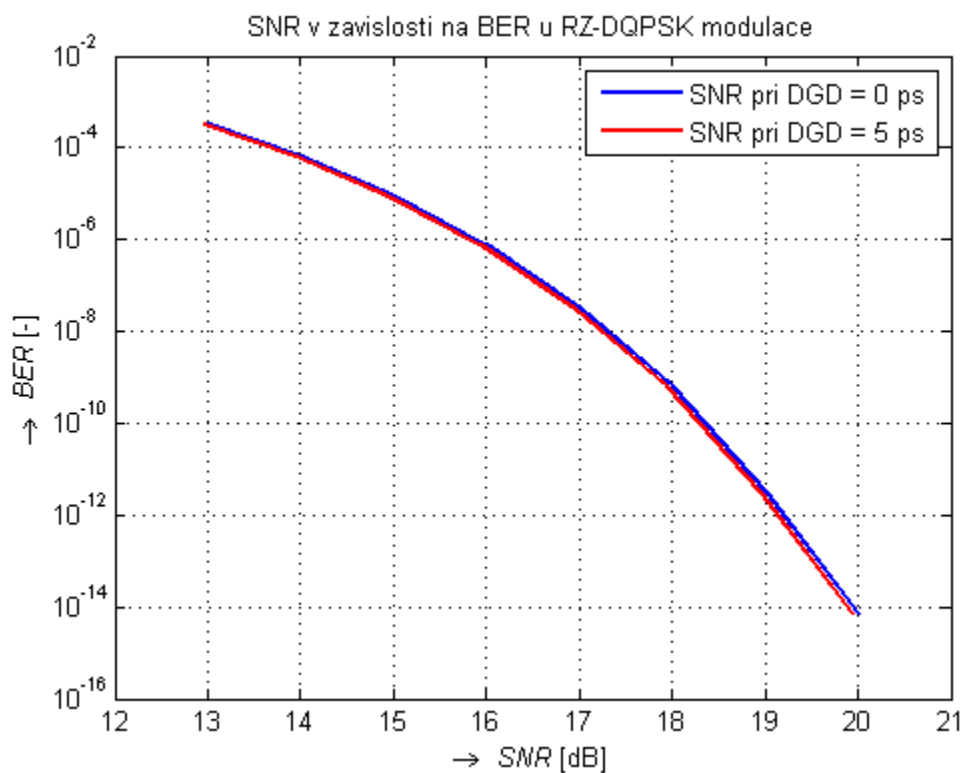
Obr. B.8. Pokles hodnoty SNR u RZ-DBPSK pro $L_3 = 1000$ km (G.655.B).



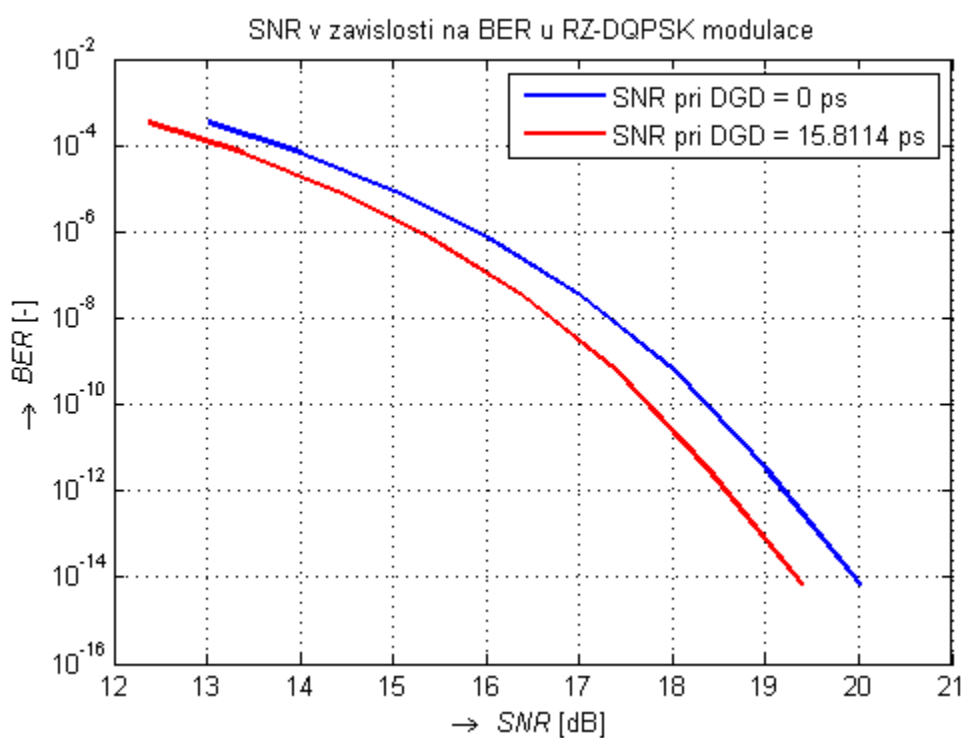
Obr. B.9. Pokles hodnoty SNR u NRZ-DQPSK pro L2 = 100 km (G.655.B).



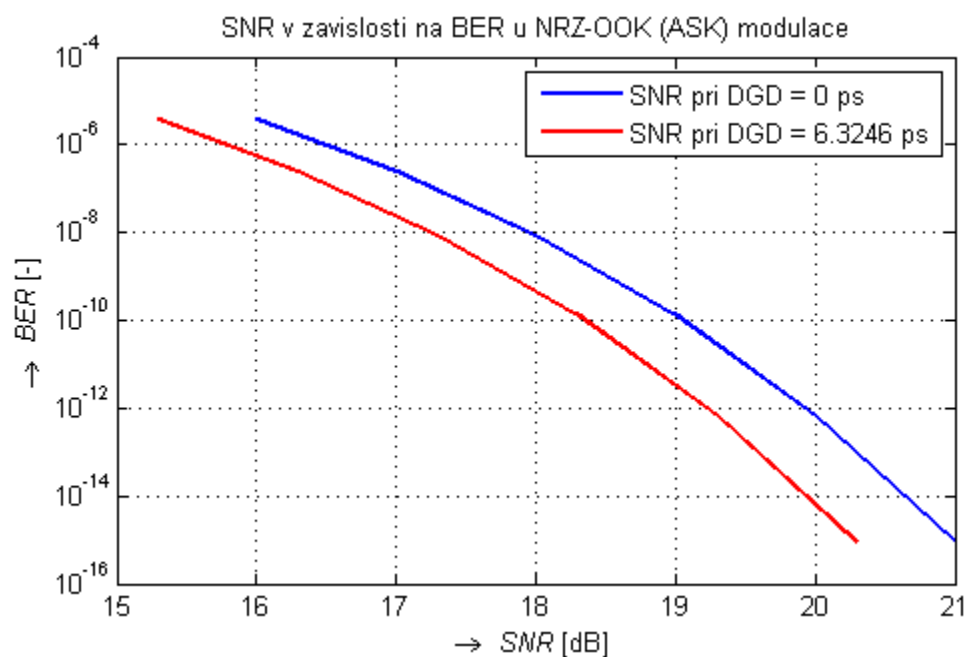
Obr. B.10. Pokles hodnoty SNR u NRZ-DQPSK pro L3 = 1000 km (G.655.B).



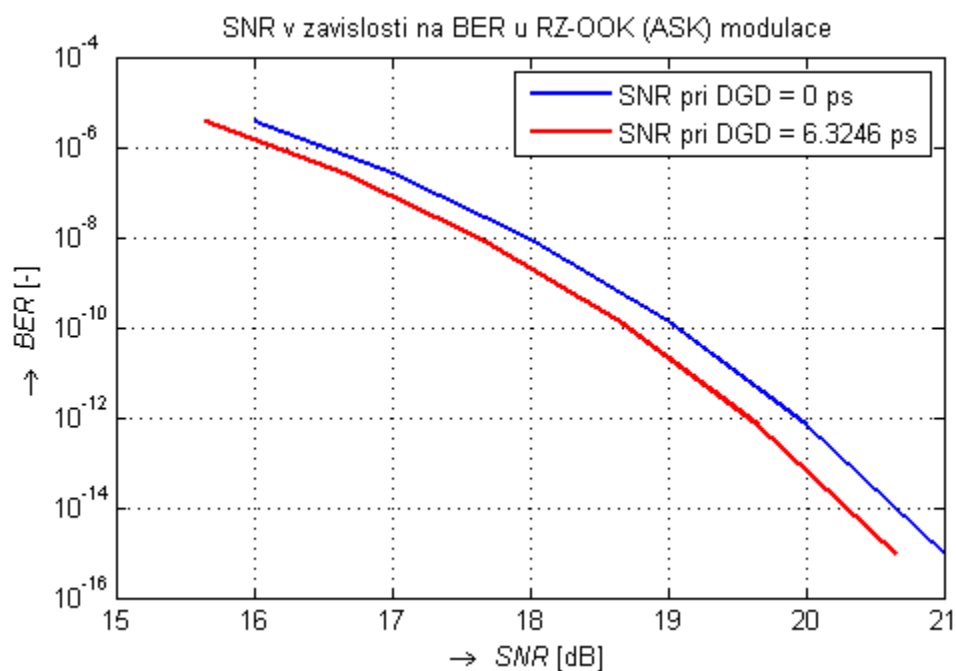
Obr. B.11. Pokles hodnoty SNR u RZ-DQPSK pro $L_2 = 100$ km (G.655.B).



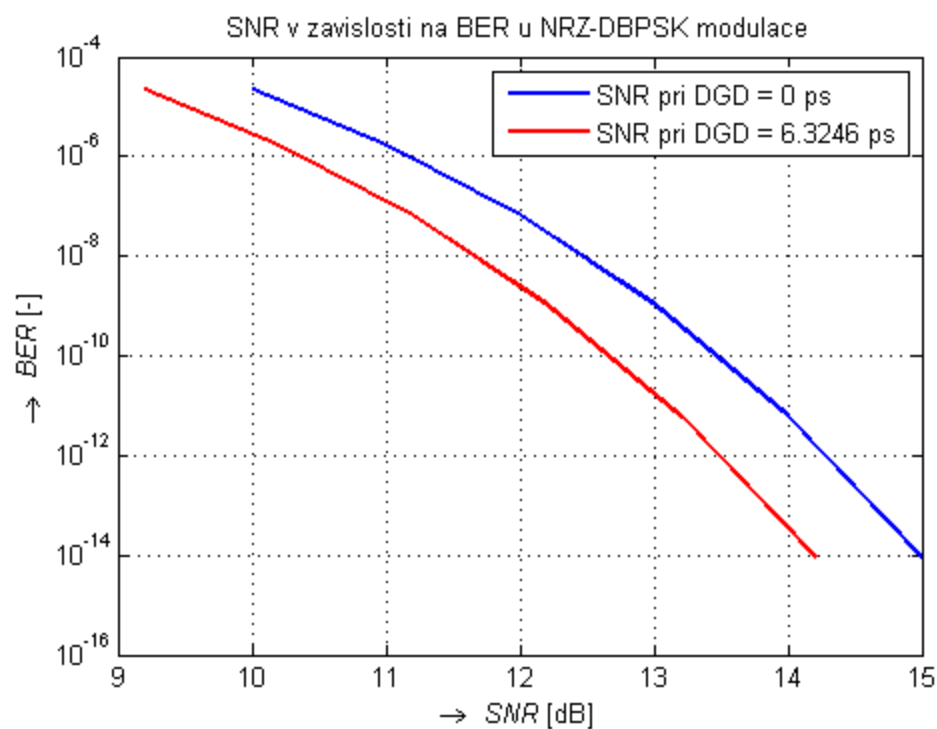
Obr. B.12. Pokles hodnoty SNR u RZ-DQPSK pro $L_3 = 1000$ km (G.655.B).



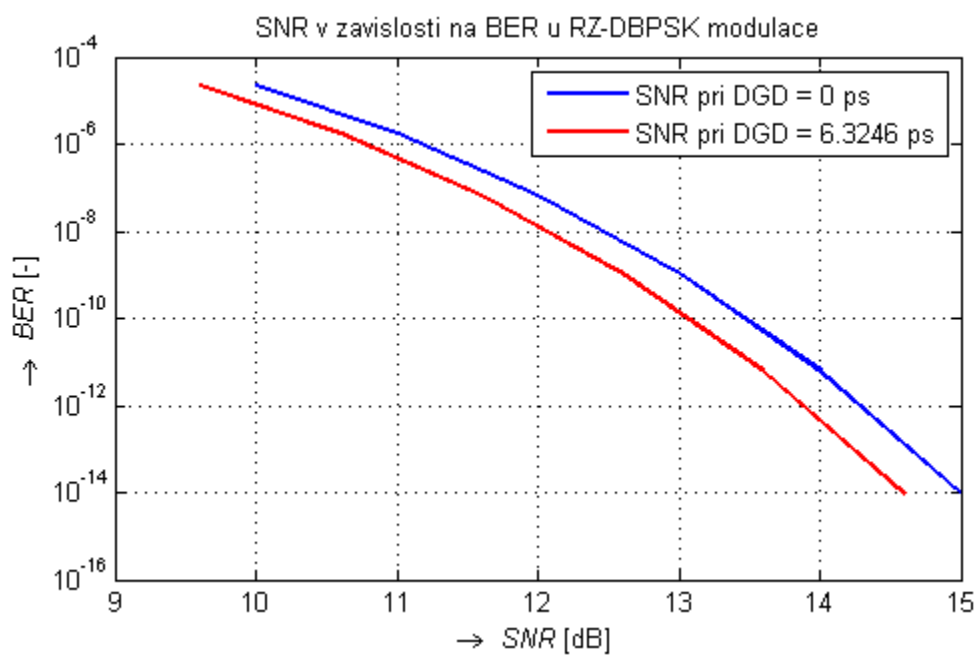
Obr. B.13. Pokles hodnoty SNR u NRZ-OOK pro $L_3 = 1000$ km (G.652.D).



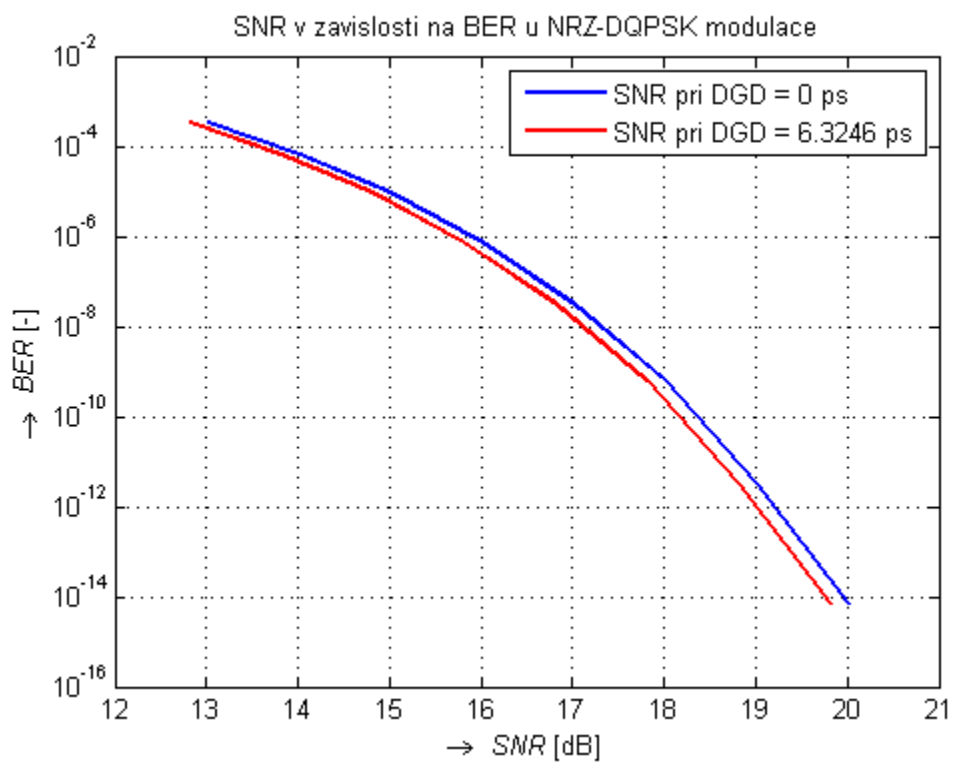
Obr. B.14. Pokles hodnoty SNR u RZ-OOK pro $L_3 = 1000$ km (G.652.D).



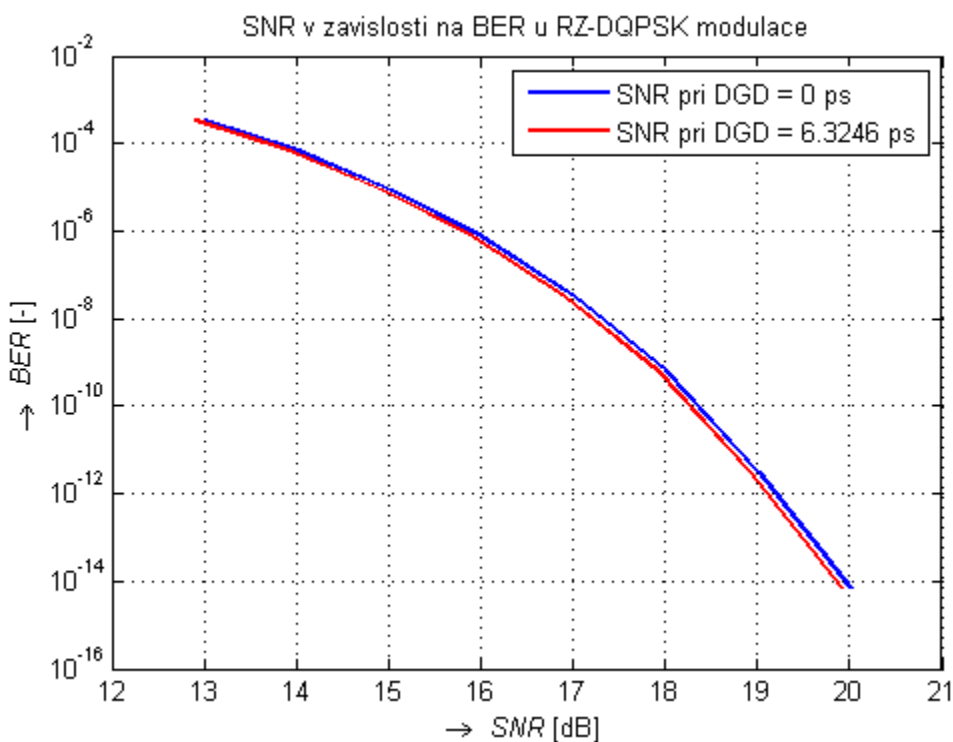
Obr. B.15. Pokles hodnoty SNR u NRZ-DBPSK pro $L_3 = 1000$ km (G.652.D).



Obr. B.16. Pokles hodnoty SNR u RZ-DBPSK pro $L_3 = 1000$ km (G.652.D).



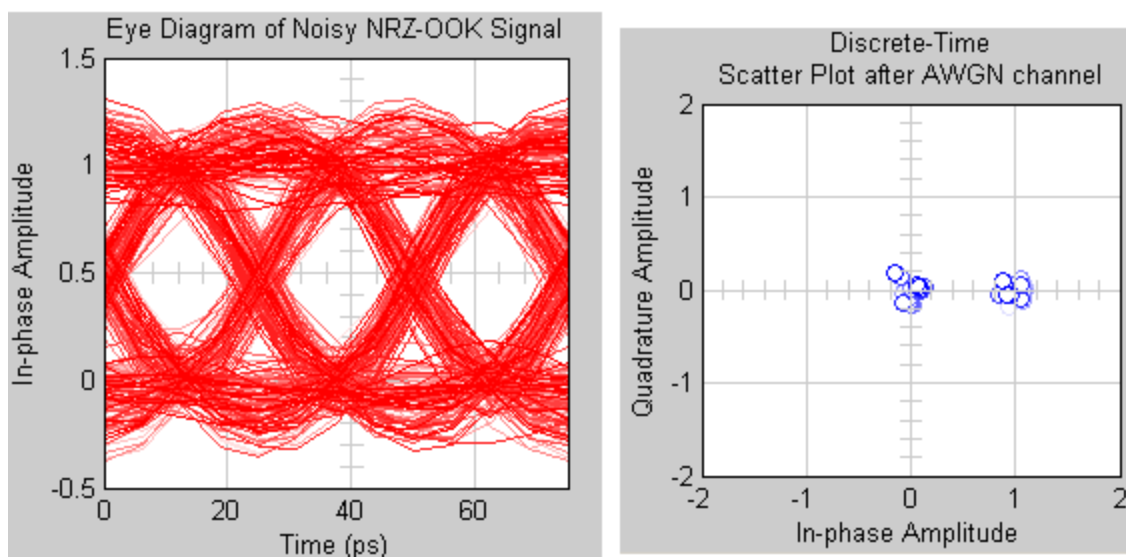
Obr. B.17. Pokles hodnoty SNR u NRZ-DQPSK pro $L_3 = 1000$ km (G.652.D).



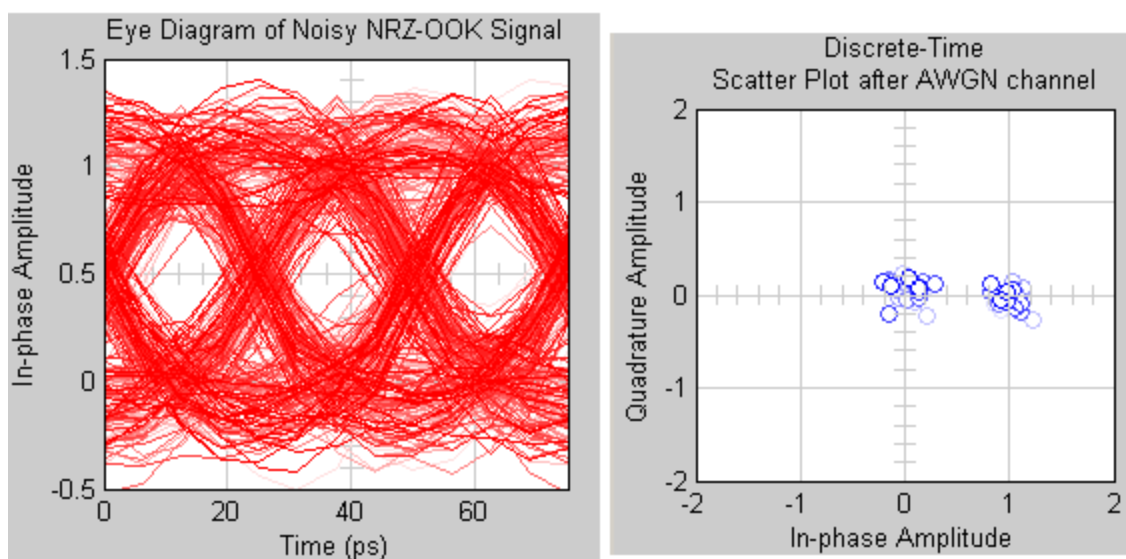
Obr. B.18. Pokles hodnoty SNR u RZ-DQPSK pro $L_3 = 1000$ km (G.652.D).

C. Diagramy oka a konstelační diagramy, vlákno G.655.B

$L = 100 \text{ km}$, $DGD = 5 \text{ ps}$, $SNR = 19,48 \text{ dB}$

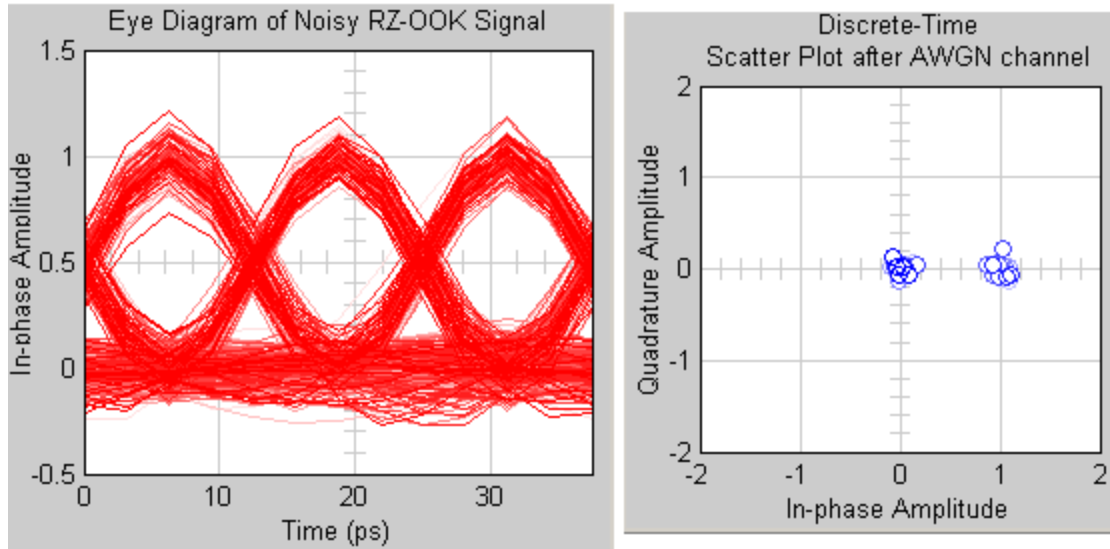


$L = 1000 \text{ km}$, $DGD = 15,8114 \text{ ps}$, $SNR = 15,52 \text{ dB}$

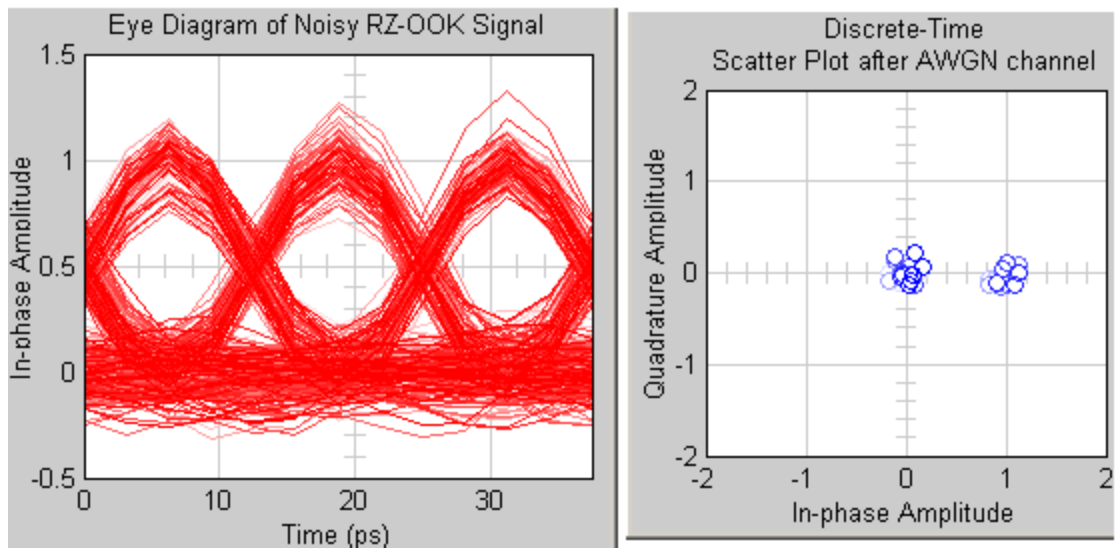


Obr. C.1. Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-OOK, G.655.B.

$L = 100 \text{ km}$, $\text{DGD} = 5 \text{ ps}$, $\text{SNR} = 19,70 \text{ dB}$

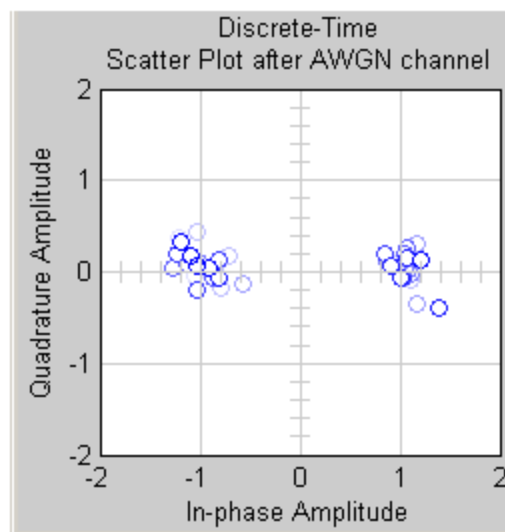
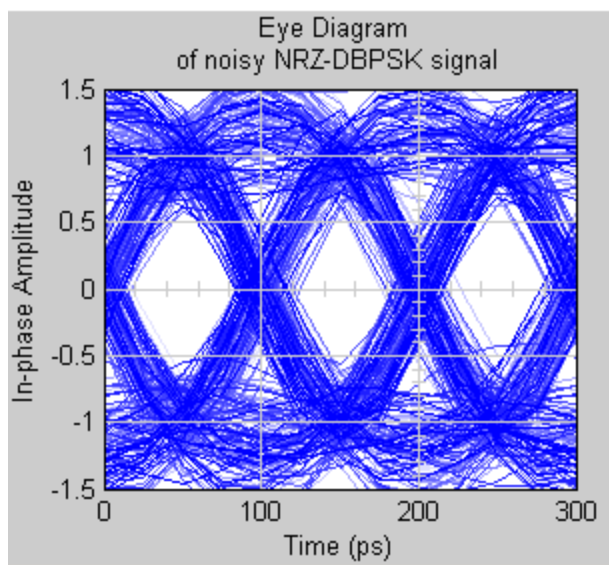


$L = 1000 \text{ km}$, $\text{DGD} = 15,8114 \text{ ps}$, $\text{SNR} = 17,72 \text{ dB}$

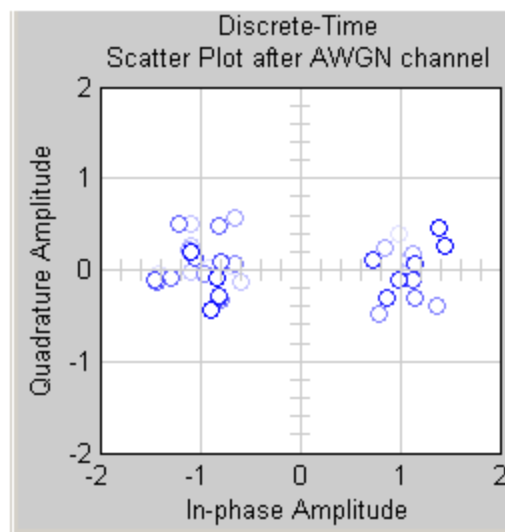
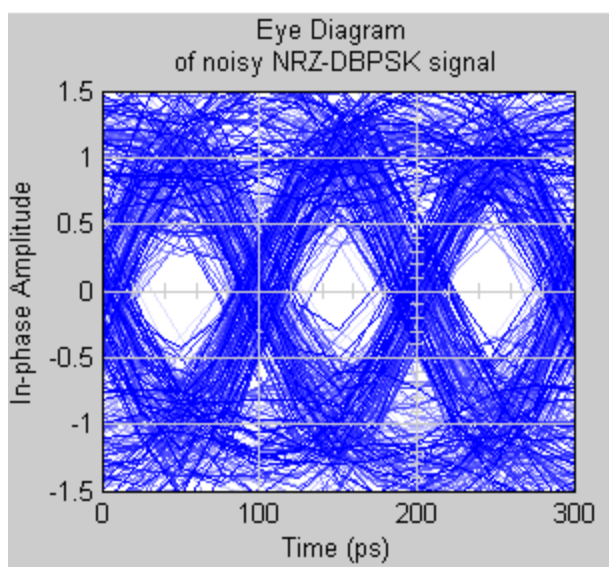


Obr. C.2. Diagram oka a konstelační diagram u RZ-OOK, G.655.B.

$L = 100 \text{ km}$, $DGD = 5 \text{ ps}$, $SNR = 13,78 \text{ dB}$

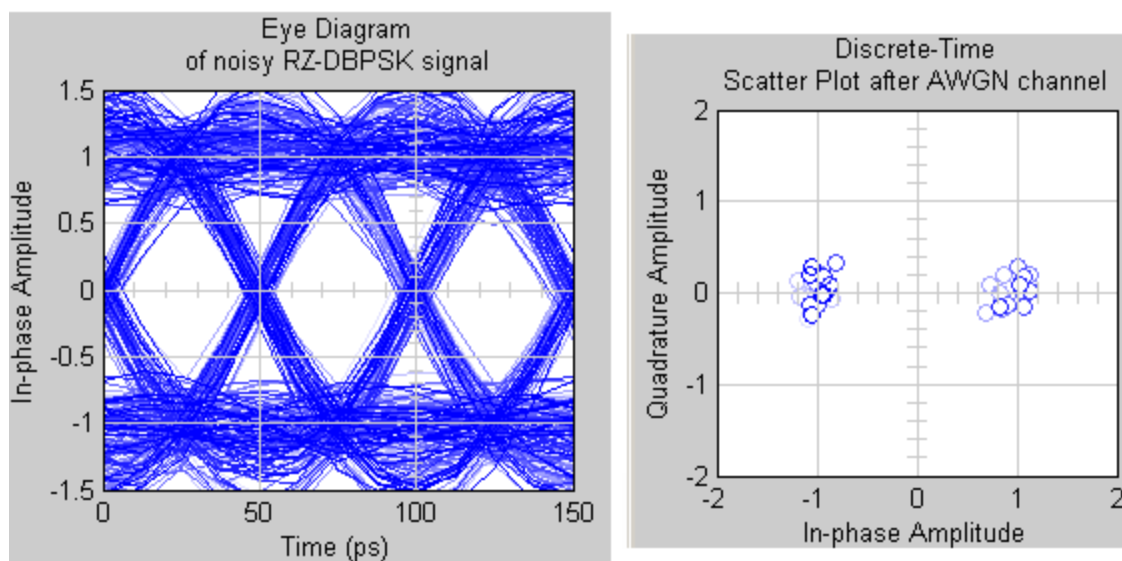


$L = 1000 \text{ km}$, $DGD = 15,8114 \text{ ps}$, $SNR = 9,28 \text{ dB}$

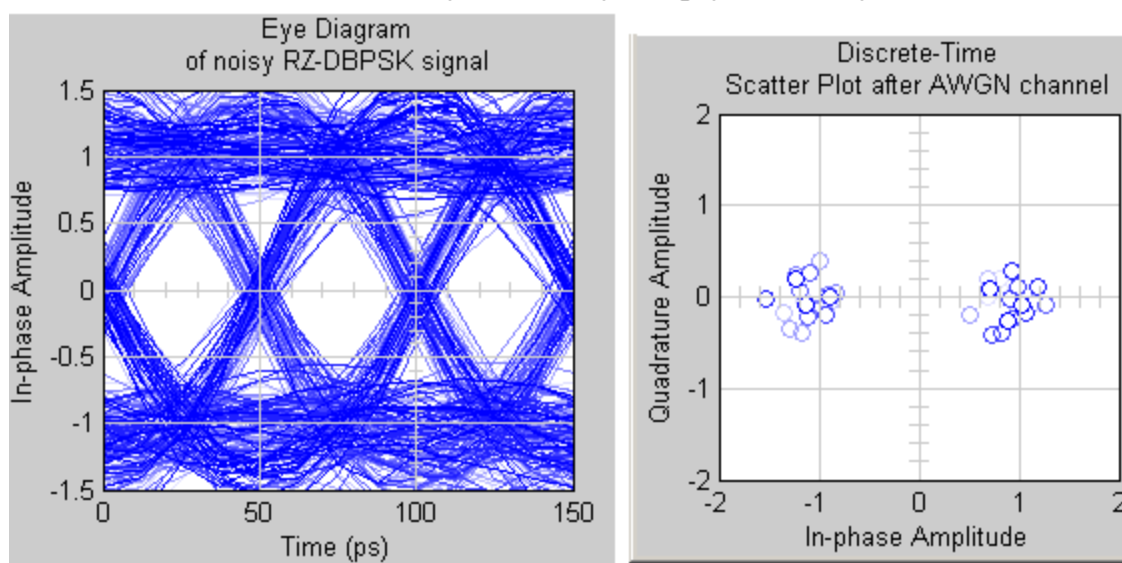


Obr. C.3. Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-DBPSK, G.655.B.

$L = 100 \text{ km}$, $\text{DGD} = 5 \text{ ps}$, $\text{SNR} = 14,03 \text{ dB}$

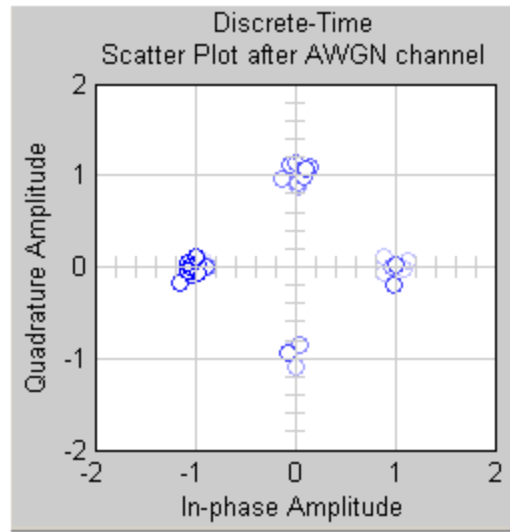
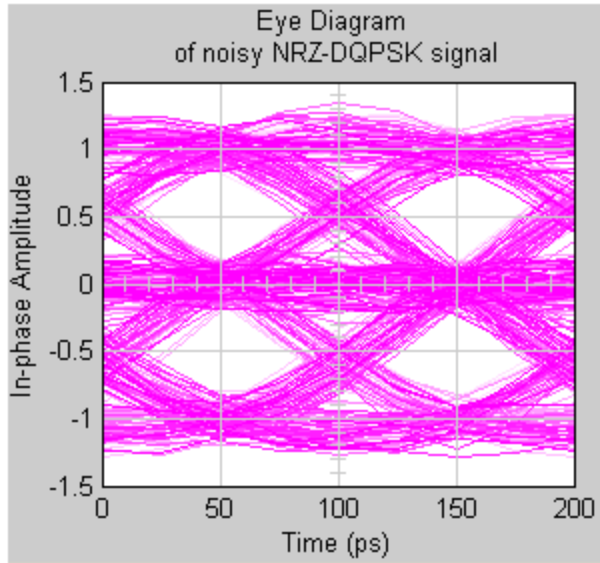


$L = 1000 \text{ km}$, $\text{DGD} = 15,8114 \text{ ps}$, $\text{SNR} = 11,78 \text{ dB}$

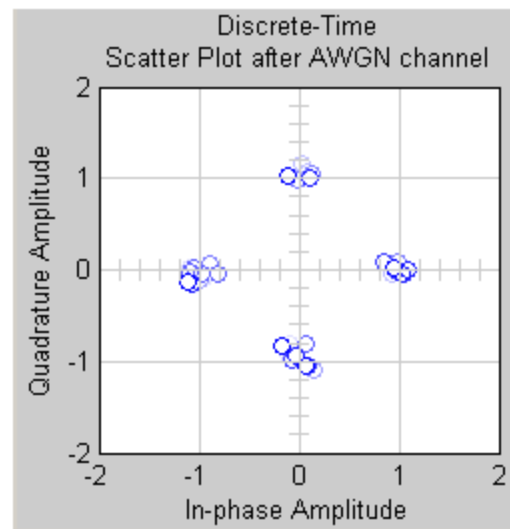
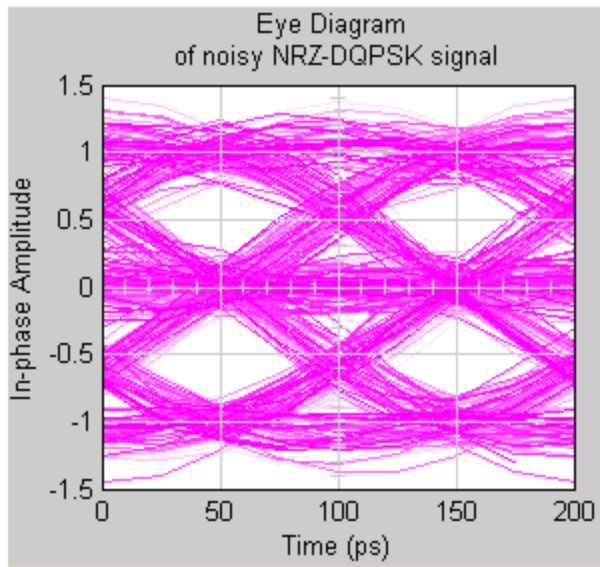


Obr. C.4. Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DBPSK, G.655.B.

$L = 100 \text{ km}$, $DGD = 5 \text{ ps}$, $SNR = 19,075 \text{ dB}$

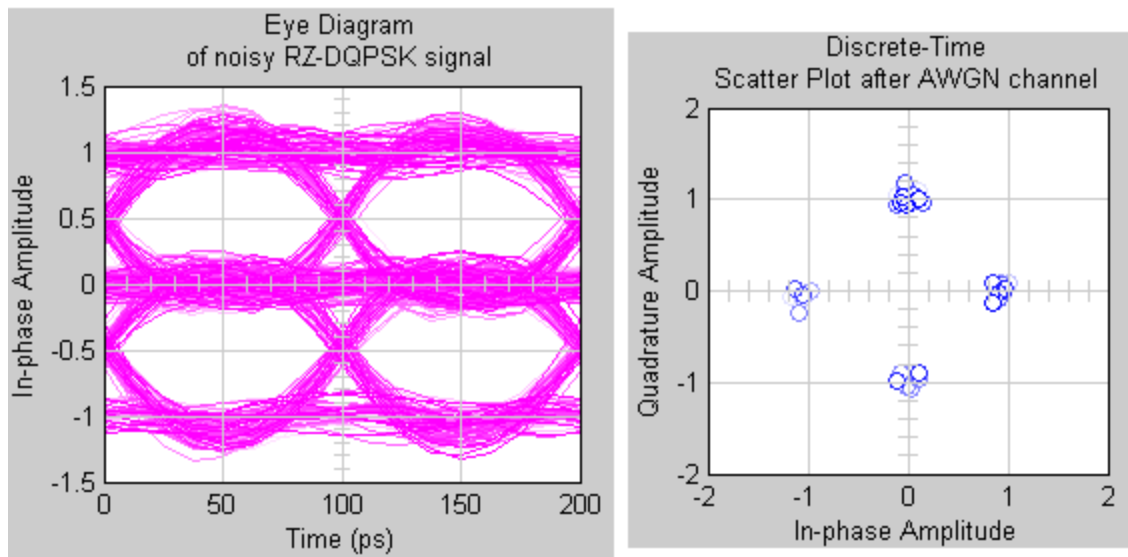


$L = 1000 \text{ km}$, $DGD = 15,8114 \text{ ps}$, $SNR = 17,95 \text{ dB}$

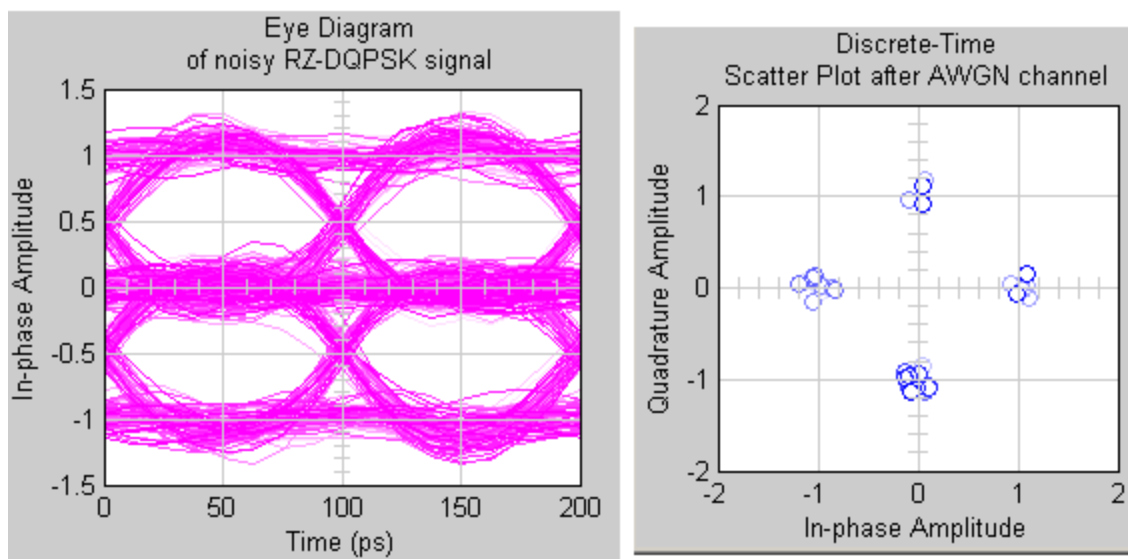


Obr. C.5. Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-DQPSK, G.655.B.

$L = 100 \text{ km}$, $DGD = 5 \text{ ps}$, $SNR = 19,1375 \text{ dB}$



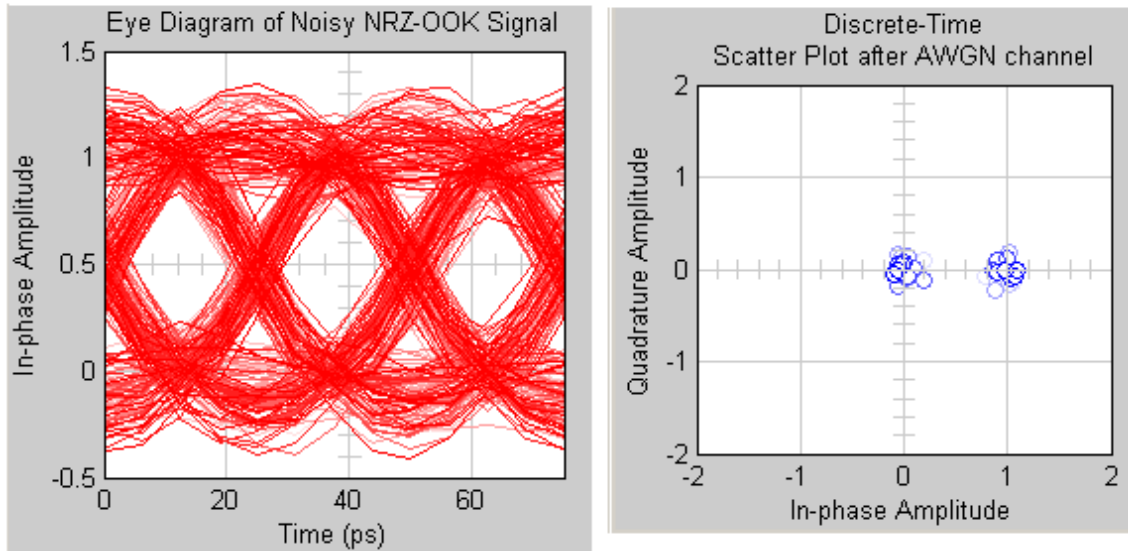
$L = 1000 \text{ km}$, $DGD = 15,8114 \text{ ps}$, $SNR = 18,575 \text{ dB}$



Obr. C.6. Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DQPSK, G.655.B.

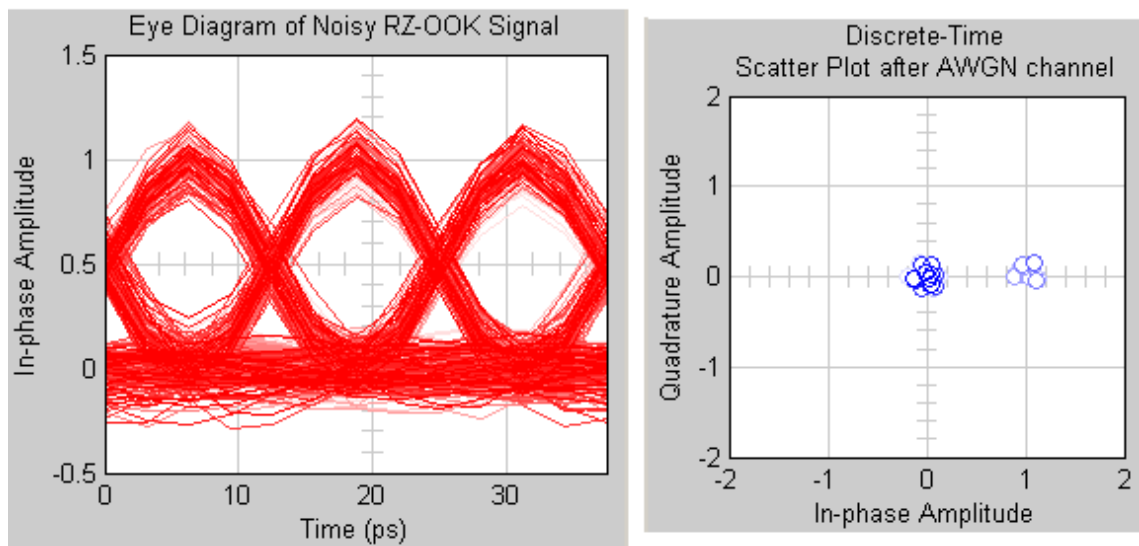
D. Diagramy oka a konstelační diagramy, vlákno G.655.D

$L = 1000$ km, $DGD = 6,3246$ ps, $SNR = 19,216$ dB



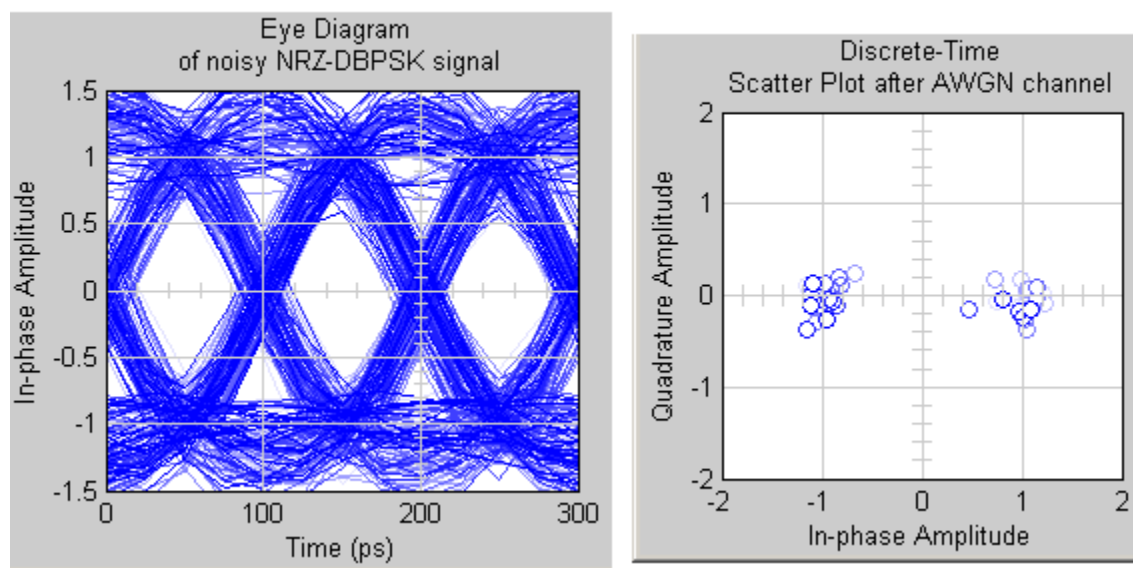
Obr. D.1. Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-OOK, G.652.D.

$L = 1000$ km, $DGD = 6,3246$ ps, $SNR = 19,568$ dB



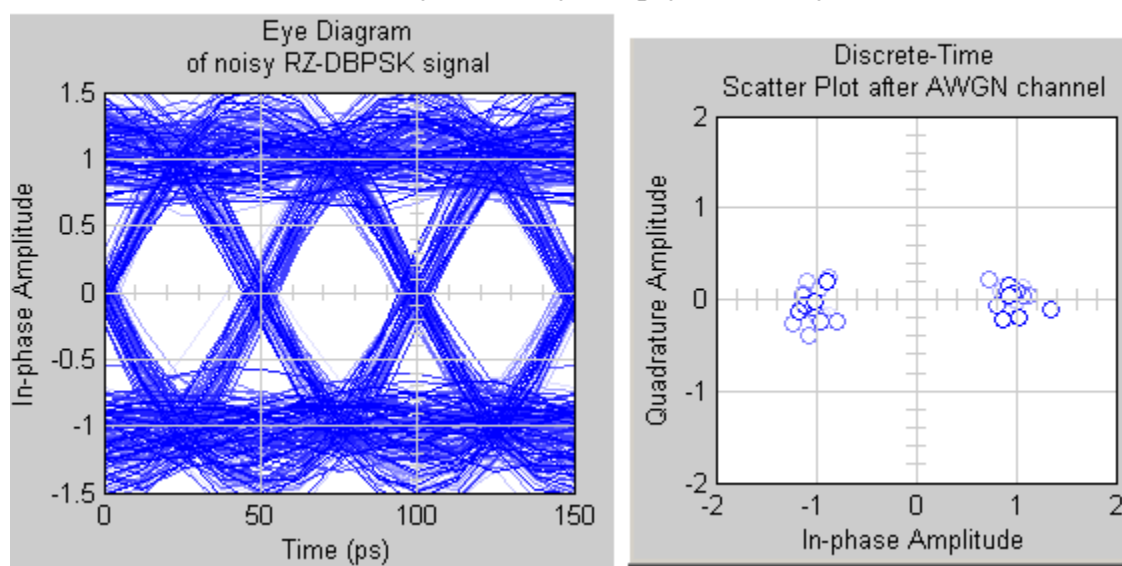
Obr. D.2. Diagram oka a konstelační diagram u RZ-OOK, G.652.D.

$L = 1000$ km, $DGD = 6,3246$ ps, $SNR = 13,48$ dB



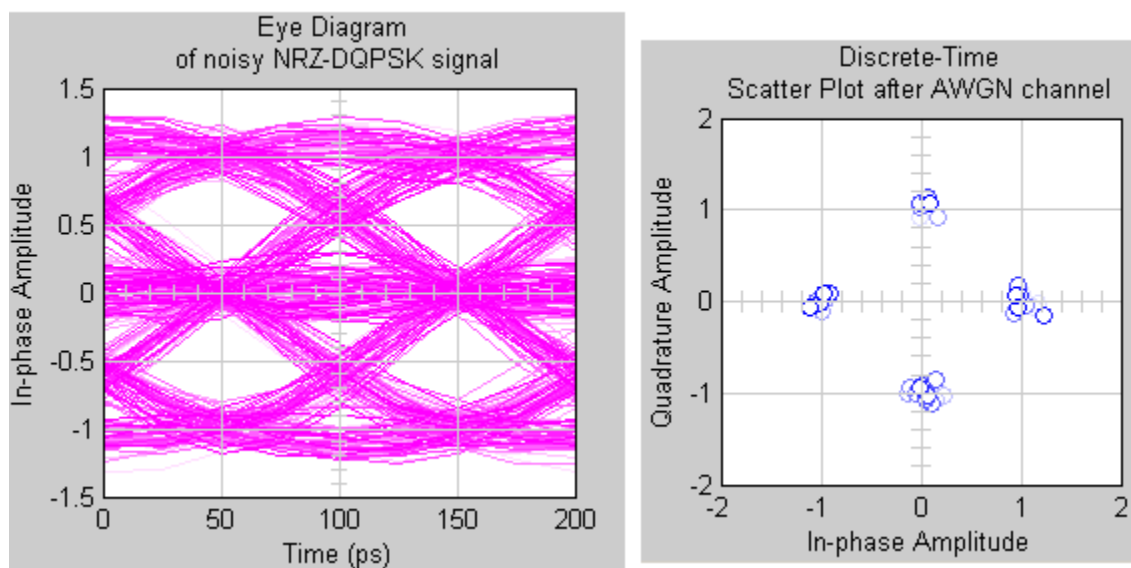
Obr. D.3. Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-DBPSK, G.652.D.

$L = 1000$ km, $DGD = 6,3246$ ps, $SNR = 13,88$ dB



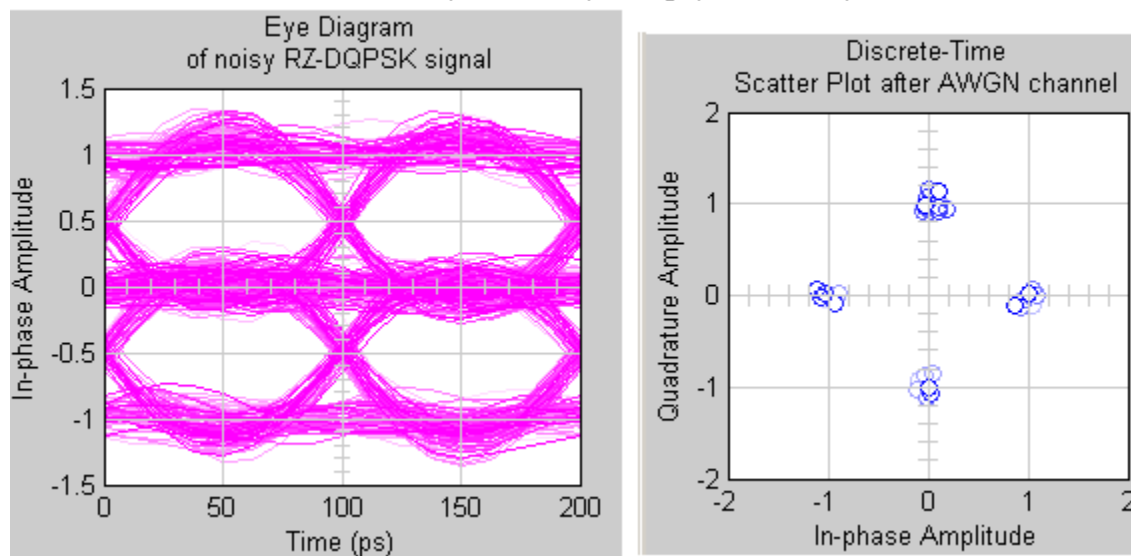
Obr. D.4. Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DBPSK, G.652.D.

$L = 1000 \text{ km}$, $DGD = 6,3246 \text{ ps}$, $SNR = 19,0 \text{ dB}$



Obr. D.5. Diagram oka a konstelační diagram u NRZ-DQPSK, G.652.D.

$L = 1000 \text{ km}$, $DGD = 6,3246 \text{ ps}$, $SNR = 19,1 \text{ dB}$



Obr. D.6. Diagram oka a konstelační diagram u RZ-DQPSK, G.652.D.

CURRICULUM VITAE

Ing. Martin Kyselák

Bašného 62, 623 00 Brno, mobil 777 26 35 76, martinkyselak@centrum.cz

osobní údaje:

datum narození: 11. 7. 1981
stav: ženatý, 1 dítě

profil:

Ing. Martin KYSELÁK (1981) je v akademickém roce 2007/2008 studentem 3. ročníku prezenční formy doktorského studijního programu Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika, obor Teleinformatika na FEKT VUT v Brně. Je absolventem Vysokého učení technického v Brně, Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, oboru Elektronika a sdělovací technika.

Zabývá se problémy disperzních vlivů optických vláken na multiplexní přenosy. Problematicke projekce komunikačních technologií se věnuje ve spolupráci se společností UNIS, spol. s r.o.

vzdělání:

2005 - dosud **FEKT VUT v Brně**
Doktorské studium, Obor: Teleinformatika.
2000 - 2005: **FEKT VUT v Brně**
Magisterské studium, Obor: Elektronika a sdělovací technika.
1992 - 2000: **Biskupské gymnázium, Barvičova 85, Brno.**

jazykové znalosti:

angličtina: pokročilý, němčina: pokročilý

účast na projektech:

- o FRVŠ reg. č. 2069/2006/G1 „Modelování přenosových vlastností optických komunikačních traktů“ (spoluřešitel).
- o FRVŠ reg. č. 1683/2007/F1a „Inovace laboratorní výuky v předmětu Přenosová média“ (spoluřešitel).
- o FRVŠ reg. č. 714/2007/G1 „Měření chromatické a polarizační vidové disperze a její začlenění do výuky“ (řešitel).
- o FRVŠ reg. č. 1776/2008/G1 „Zavedení problematiky sledovacích systémů a jejich využití v telekomunikacích do výuky“ (řešitel).
- o FRVŠ reg. č. 1635/2008/F1a „Aplikace vlnových multiplexů ve výuce předmětu Optické sítě“ (spoluřešitel).

praxe v oboru:

- o 2003 - 2004 **České dráhy a.s.**, Kounicova 26, IT technik,
- o 2005 - 2008 **UNIS, a.s.**, Jundrovská 33, Projektant komunikačních technologií.

zájmy:

skauting, cyklistika, trekking.