

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

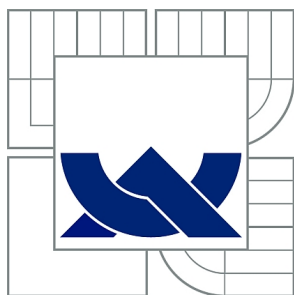
VLIV MODULACÍ V OPTICKÝCH SÍTÍCH ZALOŽENÝCH NA OTDM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

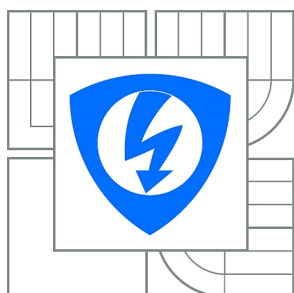
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ KOČÍ

BRNO 2013



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

VLIV MODULACÍ V OPTICKÝCH SÍTÍCH ZALOŽENÝCH NA OTDM

THE INFLUENCE OF MODULATIONS IN OPTICAL NETWORKS BASED ON OTDM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

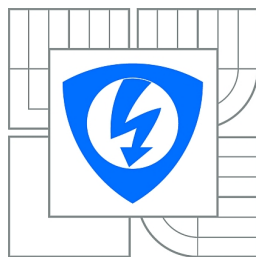
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ KOČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR MÜNSTER

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Lukáš Kočí

ID: 134522

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Vliv modulací v optických sítích založených na OTDM

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je detailně prozkoumat možnosti optických sítí založených na technologii OTDM. Práce bude detailně popisovat jednotlivé prvky sítě a vlastní návrh modelu sítě s šířkou pásma alespoň 320 Gbit/s na minimální přenosovou vzdálenost 30 km. Funkčnost modelu bude ověřena simulačním programem. Na výsledném modelu pak student otestuje modulační formáty (RZ, NRZ, CSRZ, PSK, QAM, FSK, a další) a zhodnotí získané výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Hu, H.; Munster, P.; Palushani, E.; Galili, M.; Dalgaard, K.; Mulvad, H.C.H.; Jeppesen, P.; Oxenlowe, L.K.; , "640 Gbaud NRZ-OOK data signal generation and 1.19 Tbit/s PDM-NRZ-OOK field trial transmission," Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference , vol., no., pp.1-3, 4-8 March 2012
- [2] Takara, H.; Uchiyama, K.; Shake, I.; Morioka, T.; , "Ultra-high speed OTDM transmission systems and sub-systems," Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO '01. Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on , vol., no., pp.526-527, 2001

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 5.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Petr Münster

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vlivem modulací na přenos v optických sítích, se šířkou pásma 320 Gbit/s, založených na principu OTDM. Vysvětleny jsou jevy působící na přenos signálu optickým vláknem, charakterizována jednovidová a mnohovidová vlákna a vysvětleny principy používaných technologií multiplexování. Sestaven je návrh přenosového systému, který je následně simulován v programu OptSim. Na výchozím modelu simulace jsou postupně testovány modulační formáty, vycházející z teoretických poznatků, a vyhodnocován jejich vliv na kvalitu přenosu.

KLÍČOVÁ SLOVA

optické vlákno, OTDM, jednovidové optické vlákno, mnohovidové optické vlákno, modulace, RZ, NRZ, CSRZ, CRZ, QAM, FSK, PSK

ABSTRACT

The bachelor thesis inquires into influence of modulations to transfer in optical nets, with the 320 Gbit/s zone width, based on the OTDM principle. There are also explained effects impacting on the signal transfer by optical fiber, single-mode and multi-mode optical fibers are described here and also principles of used technologies of multiplexing are explained. There is compiled the proposal of transmission system, which is subsequently simulated in the OptSim programme. On the initial simulation model there are the modulation formats tested progressively, patterned on theoretic knowledges and its influence on the transmission quality is evaluated.

KEYWORDS

optical fiber, OTDM, single-mode optical fiber, multi-mode optical fiber, modulation, RZ, NRZ, CSRZ, CRZ, QAM, FSK, PSK

KOČÍ, Lukáš *Vliv modulací v optických sítích založených na OTDM*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 91 s. Vedoucí práce Ing. Petr Münster

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vliv modulací v optických sítích založených na OTDM“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petrovi Münsterovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	12
1 Tipy optických vláken	13
1.1 Jednovidové optické vlákno	13
1.2 Mnohovidové optické vlákno	13
2 Jevy v optice	14
2.1 Lineární jevy	14
2.1.1 Útlum	14
2.1.2 Absorpce	15
2.1.3 Disperze	15
2.1.4 Rozptyl	17
2.1.5 Ostatní	18
2.2 Nelineární jevy	19
2.2.1 Rozptyl světla	19
2.2.2 Jevy druhého a třetího řádu	20
3 Multiplexování	23
3.1 CDMA	24
3.2 OFDM	24
3.3 WDM	25
3.3.1 CWDM	25
3.3.2 DWDM	26
3.4 OTDM	27
3.4.1 Časové uspořádání kanálů	28
4 Modulace v optických sítích	30
4.1 Amplitudové klíčování (ASK)	30
4.2 Fázové klíčování (PSK)	31
4.2.1 DBPSK	31
4.2.2 DQPSK	31
4.3 Frekvenční klíčování (FSK)	32
4.4 Kvadraturní amplitudová modulace (QAM)	32
4.5 RZ	34
4.6 NRZ	34
4.7 CSRZ	34
4.8 CRZ	34

5	Návrh a simulace OTDM	35
5.1	Prvky používané v OTDM	36
5.1.1	Zdroje záření	36
5.1.2	Modulátory	37
5.1.3	Zesilovače	39
5.1.4	BPF filtr	41
5.1.5	Optická vlákna	42
5.1.6	Demultiplexace v časové doméně	42
5.2	Diagram oka	44
5.2.1	Q-faktor	44
5.2.2	Bitová chybovost kanálu	44
5.2.3	Odstup signálu od šumu	45
5.3	Návrh 320 Gbit/s OTDM na vzdálenost 30 km	45
5.4	Simulace OTDM	49
5.4.1	Vysílací a přenosová část	49
5.4.2	Přijímací část	52
5.4.3	Výsledky simulace	53
6	Vliv modulačních formátů na přenos v OTDM	55
6.1	50% RZ	55
6.2	NRZ	55
6.3	CSRZ	56
6.4	CRZ	58
6.5	PSK	59
6.6	QAM	61
6.7	FSK	63
6.8	Vyhodnocení výsledků	65
7	Závěr	67
	Literatura	68
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	74
	Seznam příloh	77
A	Příloha 1	78
A.1	Limitní hodnoty spektrální šíře impulsu vzhledem k době jeho trvání	78
A.2	Nastavení simulace s modulací 50% RZ	79
A.2.1	Vysílací a přenosová část	79
A.2.2	Přijímací část	81

A.2.3	Nastavení jednotlivých modulací	83
A.2.4	Popis nastavovaných parametrů	88
A.3	Vliv IDF na kvalitu přenosu	89
B	Příloha 2	91
B.1	Obsah přiloženého CD	91

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Průřez jednovidovým a mnohovidovým vláknem [8]	13
2.1	Jevy v optice [4], [8], [9], [39]	14
2.2	Útlumová charakteristika [9]	15
2.3	Fázová podmínka [39]	20
2.4	Vlastní fázová modulace [39]	21
2.5	Čtyřvlonné směšování [39]	22
2.6	Čtyřvlonné směšování ve frekvenční oblasti [39]	22
3.1	Jednosměrný přenos 8 kanálů pomocí multiplexace	23
3.2	Jednosměrný přenos 4 kanálů pomocí vlnového multiplexu	25
3.3	Jednosměrný přenos 4 kanálů pomocí OTDM [13]	28
4.1	Průběh modulačního a modulovaného signálu ASK [3]	30
4.2	Průběh modulačního a modulovaného signálu BPSK [3]	31
4.3	Průběh modulačního a modulovaného signálu FSK [3]	32
4.4	Konstelační diagram - obecně [7]	33
4.5	Konstelační diagram 16 QAM [7]	33
5.1	Základní model OTDM přenosového systému [13]	35
5.2	Vytvoření datového kanálu 10 Gbit/s a následná multiplexace na 40 Gbit/s v programu OptSim	36
5.3	Struktura MLFL laseru [20]	37
5.4	LiNbO ₃ optický modulátor [24]	38
5.5	Blokové schéma Ramanovského optického zesilovače [23]	40
5.6	Využití Braggovy vláknové mřížky [12]	41
5.7	Symetrický Mach-Zehnderův interferometr	43
5.8	Demultiplexace pomocí NOLM smyčky	44
5.9	Návrh 320 Gbit/s OTDM na vzdálenost 30 km	47
5.10	Výkonové úrovně na výstupech jednotlivých zařízení vysílací a přenosové části OTDM	49
5.11	Sestavení vysílací a přenosové části OTDM	49
5.12	10 Gbit/s signál na výstupu modulátoru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase	50
5.13	80 Gbit/s signál na výstupu multiplexeru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase	50
5.14	160 Gbit/s signál na výstupu multiplexeru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase	51
5.15	320 Gbit/s signál na výstupu multiplexeru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase	51

5.16 a) výstupní signál po 30 km, b) výstupní signál z IDF, c) disperzní mapa	52
5.17 Vytvoření řídicího signálu a demultiplexace 320 Gbit/s datového toku, 50% RZ modulace	52
5.18 Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, 50% RZ modulace	53
5.19 Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, 50% RZ modu- lace bez využití IDF	54
6.1 Vlnové spektrum modulace NRZ 320 Gbit/s signálu na výstupu mul- tiplexeru	56
6.2 Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, NRZ modulace .	56
6.3 Modulátor CSRZ vytvářející 10 Gbit/s datový kanál	57
6.4 Vlnové spektrum modulace CSRZ 320 Gbit/s signálu na výstupu mul- tiplexeru	57
6.5 Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, CSRZ modulace .	57
6.6 Modulátor CRZ vytvářející 10 Gbit/s datový kanál	58
6.7 Vlnové spektrum modulace CRZ 320 Gbit/s signálu na výstupu mul- tiplexeru	59
6.8 Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, CRZ modulace .	59
6.9 a) DPSK modulátor, b) DPSK demodulátor	60
6.10 Vlnové spektrum modulace DPSK 320 Gbit/s signálu na výstupu multiplexeru	60
6.11 Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, DPSK modulace	61
6.12 a) 4QAM modulátor, b) 4QAM demodulátor	61
6.13 Vlnové spektrum modulace 4QAM 320 Gbit/s signálu na výstupu multiplexeru	62
6.14 Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, 4QAM modulace	62
6.15 Modulátor FSK	63
6.16 10 Gbit/s signál na výstupu FSK modulátoru: a) zobrazení ve spek- tru, b) zobrazení v čase	64
6.17 160 Gbit/s signál na výstupu multiplexeru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase	64
6.18 Porovnání bitové chybovosti u testovaných modulačních formátů . . .	65
6.19 Porovnání velikosti Q-faktoru u testovaných modulačních formátů . .	66

ÚVOD

Optické sítě se zařadily mezi nedílnou součást moderní vysokorychlostní komunikace. Právě zvyšování nároků na přenosové kapacity a kvalitu přenosu bylo důvodem ubírat se tímto směrem, neboť metalické přenosové cesty jsou díky své šířce pásma a přenosové vzdálenosti nedostačující.

V první kapitole jsou popsány základní principy jednovidového a mnohovidového optického kabelu, jejich struktura a využití. Následující kapitola tvoří teoretický rozbor jevů, které mají pozitivní nebo negativní vliv na přenos v optických sítích. Jednotlivé jevy jsou rozděleny podle své funkce a významu na lineární a nelineární. Kapitola 3 seznamuje čtenáře s technologiemi slučování kanálů, díky kterým lze efektivně navyšovat šířku přenášeného pásma a využívat tak více potenciálu optického kabelu. Následuje pojednání o modulacích, které jsou využívány v optických sítích. Jde o digitální modulační formáty tvořící spolu s technologií slučování kanálů OTDM teoretický základ pro hlavní náplň práce.

Před samotnou simulací a testováním modulačních formátů je sestaven návrh přenosového systému na vzdálenost 30 km se šířkou pásma 320 Gbit/s. V návrhu je využito teoretických poznatků o prvcích využívaných v OTDM se zadanou šířkou pásma, zároveň návrh slouží jako předpoklad pro vytvoření simulace v programu OptSim. Dále je vypočítána útlumová bilance pro efektivní rozmístění zesilovacích prvků.

Praktickou část dále tvoří simulace vytvořeného návrhu, s výsledným rozmístěním všech funkčních bloků. Výsledkem je model, na kterém testujeme zadané modulační formáty. Jelikož je každá modulace specifická, dochází při změně modulací ke změně nastavení některých prvků přenosového systému, nastavení je součástí přílohy. V kapitole 6 jsou uvedeny výsledky jednotlivých simulací modulačních formátů.

1 TIPY OPTICKÝCH VLÁKEN

1.1 Jednovidové optické vlákno

Jednovidové optické vlákno je vyráběno s nízkým průměrem jádra okolo $9\text{ }\mu\text{m}$. Díky tomu jsme schopni přenášet kabelem pouze jeden paprsek neboli vid. To je však velice výhodné, neboť se u této technologie uplatňuje nižší disperze a jsme schopni přenášet větší šířku pásma.

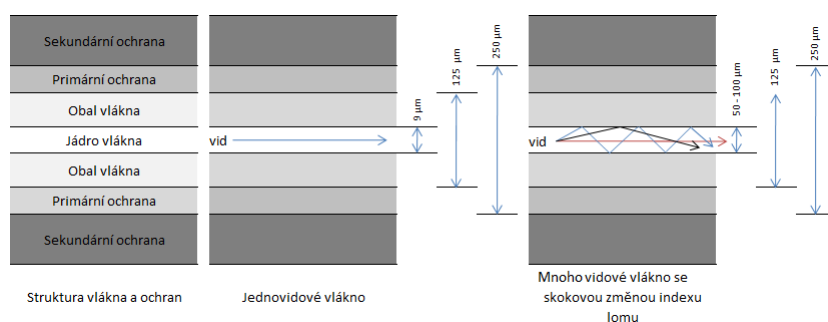
Nízký průměr jádra zvyšuje technologickou náročnost kladenou na použité generátory a detektory díky složitějšímu navázání světelného paprsku do kabelu. Je zde nutnost použití budících laserů vykazujících nízkou spektrální čáru [8], [9].

1.2 Mnohovidové optické vlákno

S možností zvyšování počtu vidů roste i průměr jádra kabelu. Dostáváme se tak na hodnoty $50 - 100\text{ }\mu\text{m}$. Kabelem se mohou šířit řádově tisíce vidů a vzniká tak vidová disperze.

U jednovidových optických vláken jsme schopni dosahovat širší pásma v řádech THz, ale díky disperzi u mnohovidových optických vláken se zde musíme spokojit s šíří v řádech desítek MHz/km. Díky tomu se mnohovidová optická vlákna uplatňují na kratších vzdálenostech.

Speciálním případem jsou gradientní mnohovidové světlovody. Tato vlákna využívají různých indexů lomu v průřezu jádra kabelu. Nejvyšší index lomu je v ose kabelu a postupným průchodem paprsku (vidu) směrem od osy se zmenšuje. Tímto lze dosáhnout snížení vidové disperze. Tato technologie vedla ke snížení počtu vidů, uplatnění vzrostlo na středně velké vzdálenosti a šíře pásma narostla na hodnoty kolem 1GHz/km [8], [9].

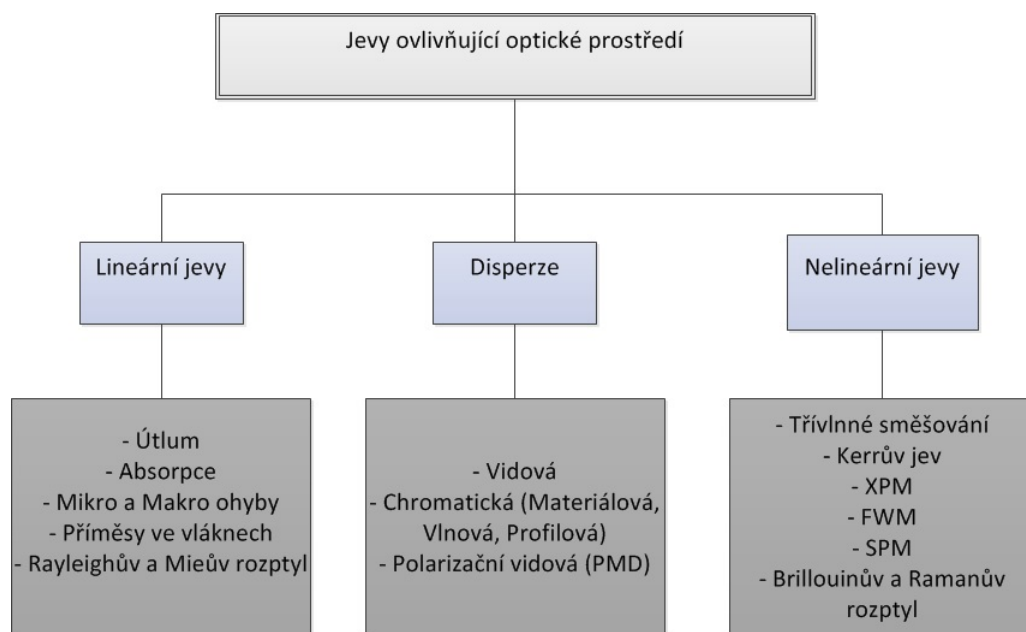


Obr. 1.1: Průřez jednovidovým a mnohovidovým vláknem [8]

2 JEVY V OPTICE

Existuje řada jevů, lineárních či nelineárních, ovlivňujících přenos optickým kabelem. Tyto jevy vznikají při celém procesu přenosu. Některé jevy a fakta jsou nezbytné pro funkci přenosu, naopak existují jevy, které jsou nežádoucí a snažíme se je eliminovat nebo jim předcházet.

Celá řada výhod optických kabelů je již naznačena, ale je nutné zaměřit se také na nevýhody. Je jich celá řada a patří mezi ně ztráty, disperze, rozptyl a další, které budou níže krátce vysvětleny.



Obr. 2.1: Jevy v optice [4], [8], [9], [39]

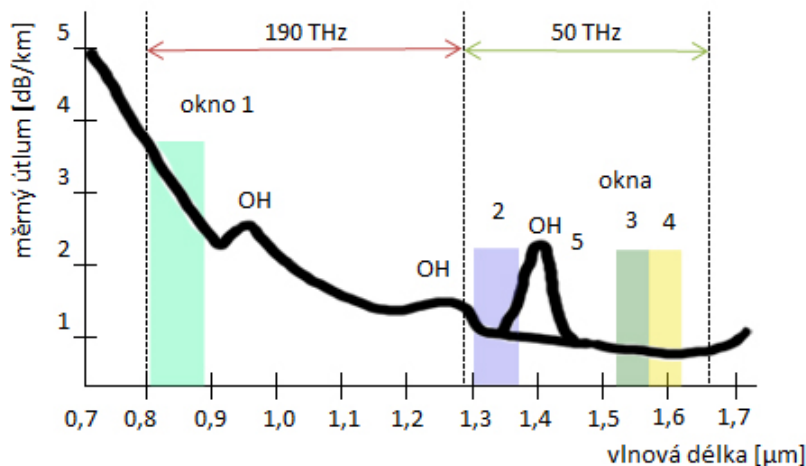
2.1 Lineární jevy

Mezi lineární jevy patří ohyby vláken, absorpce, výskyt příměsí ve vláknech, Mieův a Rayleighův rozptyl, útlum a disperze. Většina těchto jevů na sebe působí a vzájemně se ovlivňuje.

2.1.1 Útlum

Útlum optického vlákna je poměr výstupního výkonu ke vstupnímu výkonu. Je udáván v jednotkách dB/km a je způsoben hlavně absorpcí, vyzařováním paprsku z vlákna a rozptylem na nehomogenitách. Dále na něj mají vliv i vlastnosti vlákna,

které lze ovlivnit instalací, jsou to například ohyby nebo narušení geometrie vlákna, a následnou změnou poměru mezi jádrem a pláštěm. Mezi další ovlivňující faktory patří trhlinky v materiálu vlákna nebo příměsi [9].



Obr. 2.2: Útlumová charakteristika [9]

Charakteristika vykazuje 3 body zvýšení měrného útlumu na vlnových délkách 0,95; 1,24 a 1,39 μm . Tyto místa se označují OH, podle zbytků molekul vody ve vláknech, které tyto nárůsty zapříčiňují. Oblasti použití jsou definovány v tzv. oknech (pásmech), které naopak vykazují minimální hodnoty útlumu. Okno 1 je definováno v oblasti 0,8 - 0,9 μm , okno 2 v okolí 1,3 μm , okno 3 v okolí vlnové délky 1,55 μm , dále okno 4 v okolí vlnové délky 1,625 μm a okno 5.

2.1.2 Absorpce

Jedná se o druh ztrát vyskytujících se ve formě materiálové absorpce, kterou ovlivňuje především výroba kabelů a použitý materiál. Právě použitý materiál obsahuje byť jen malé procento příměsí (např. ionty chromu, mědi nebo železa). Tyto příměsi mají za následek tepelné ztráty.

Materiálové ztráty můžeme rozdělit dále na dvě podkategorie. A to na nevlastní absorpci, ta vzniká také při výrobě kabelu, a to příměsí iontů vody nebo iontů kovu. Druhou podkategorií je vlastní absorpce, ta popisuje působení záření na vlastní materiál vlákna [8].

2.1.3 Disperze

Jedná se o jev, který má hlavní podíl na zkreslení signálu. Existuje několik druhů disperze a lze ji vyjádřit jako rozdíl šířky impulsu v polovině jeho výšky, který ode-

bereme na začátku a konci vlnovodu. Pomocí disperze určujeme šířku přenášeného pásma a přenosovou rychlost.

Chromatická disperze

Chromatická disperze (CD) je důležitá pro jednovidová vlákna, u mnohovidových vláken dosahuje nízkých hodnot, které lze zanedbat. Díky technologii DWDM a šíření spektrálních složek vláknem nabývá tato disperze na důležitosti. Zejména díky různým rychlostem šíření spektrálních složek a následnému zpoždění. Zpoždění nesmí být tak velké, aby zasahovalo do vedlejších bitů. Docházelo by ke zkreslení signálů. Disperze se skládá ze tří složek, které tvoří materiálová, vlnová a profilová disperze [8].

a) Materiálová disperze

Jedná se o jednu ze tří složek chromatické disperze, jejíž velikost je závislá na materiálu vlákna. Jelikož dokonalé homogenní vlákno nelze vyrobit, její hodnotu nelze zanedbat. Vlivem nedokonalého složení vlákna tak dochází ke změnám indexu lomu na dané vlnové délce. To způsobí změnu skupinové a fázové rychlosti šíření vidů ve vlákne [8].

b) Vlnová disperze

Další složkou chromatické disperze je vlnová disperze. Souvisí s geometrickými vlastnostmi vlákna, které mají vliv na změnu kmitočtu jednotlivých vidů a rychlost jejich šíření. Významná je u jednovidových vláken, je srovnatelná s materiálovou disperzí [8].

c) Profilová disperze

Poslední složka chromatické disperze se výrazněji projevuje u vyšších přenosových rychlostí. Vzniká při nestejném indexu lomu jádra a pláště. Signálové složky se tak šíří různými rychlostmi [8].

Vidová disperze

Jedná se o disperzi, která se projevuje u mnohovidových vláken se skokovou změnou indexu lomu. Díky velkému množství vidů ve vlákne dochází k rozdílné rychlosti šíření. Vidy tak přichází k detektoru v rozdílných časových rozestupech. Aby byl signál správně detekován, dochází ke zpoždění v čase. To má za následek rozšiřování výsledných impulsů vzhledem k odeslaným.

U jednovidových vláken se tato disperze nevyskytuje. U mnohovidových vláken ji lze eliminovat snížením počtu jednotlivých vidů nebo výrobou speciálních vláken (gradientní vlákna). Tyto vlákna vyrovnávají rychlosti šíření jednotlivých vidů [8].

Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze (PMD) je závislá na rychlosti šíření vidů ve vlákne. Nutnost se jí zabývat vznikla se zvyšujícími se nároky na přenosové rychlosti.

Impuls po navázání do optického vlákna se šíří ve dvou na sebe kolmých polarizačních rovinách. Projde-li tento impuls geometricky nedokonalým místem ve vlnovodu (výskyt kruhové nesymetrie), může dojít k rozdělení a následnému rozdílnému šíření obou polarizačních rovin. To bude mít za následek rozšíření impulsu. Geometrické nedokonalosti mohou být způsobeny při výrobě, ohybem vlákna, špatným uložením kabelu, kdy na něj působí vnější tlak a deformuje ho (porušení kruhové symetrie vlákna).

Polarizační roviny jsou na sobě nezávislé, během přenosu si však vzájemně vyměňují energii. PMD se dá vyjádřit pro krátké vzdálenosti do 10 km jako podíl zpoždění signálu a délky trasy. Na vzdálenostech vyšších jak 10 km lze PMD určit jako zpoždění signálu ku odmocnině vzdálenosti přenosové trasy. Výsledkem je PMD koeficient ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$).

Kompenzace PMD je technologicky náročná, neboť je prováděna dynamicky. Nejedná se přímo o kompenzaci, ale spíše o snižování vlivu PMD díky náhodnému výskytu. V praxi se vypočítá hodnota disperze a pro tento jednotlivý případ se sestaví kompenzační vlákno [4], [8], [9], [36].

2.1.4 Rozptyl

Do této kategorie patří dva jevy. Prvním z nich je Mieův rozptyl, který je způsoben nedokonalostmi ve výrobě vlákna. Jedná se o nedokonalosti válcové struktury jádra kabelu. Tento geometrický problém lze vyřešit kvalitnější technologií výroby kabelů.

Rayleighův rozptyl je druhým lineárním jevem, který se ale nedá odstranit a je důsledkem velmi malých nečistot v kabelu, které jsou menší než použitá vlnová délka. Lze jej pouze eliminovat posunutím vlnové délky do oblasti ultrafialového záření. V praxi je využíván v měřicí metodě OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) [8].

Mieova teorie je obecnější než teorie Rayleighova. Rayleighův rozptyl je omezen dvěma podmínkami. Jednak musí být rozptylující částice elektricky nevodivé a musí platit vzorec 2.1, kde r je poloměr rozptylující částice a λ vlnová délka.

$$2\pi \frac{r}{\lambda} \gg 1 \quad (2.1)$$

Za předpokladu splnění této podmínky, lze stanovit výpočet maximální velikosti částic pro rozmezí vlnových délek $\lambda_{min} = 4,0 \cdot 10^7 m$ do $\lambda_{max} = 7,9 \cdot 10^7 m$

$$\frac{2\pi r}{\lambda} \ll 1 \Rightarrow r \ll \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow r_{max} \approx 100nm \quad (2.2)$$

s výsledkem $r_{max} = 1,0 \times 10^7 m$, částice pro uplatnění Rayleighovy teorie tak mohou být o více než řád menší než je r_{max} .

Pro intenzitu Rayleighova rozptylu platí

$$I = I_0 \left(\frac{d}{2}\right)^6 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1}\right) \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \quad (2.3)$$

kde I_0 je původní intenzita světla, d průměr rozptylující částice, n je její index lomu, θ rozptylový úhel a R vzdálenost od částic. Intenzita tohoto rozptylu je nepřímo úměrně závislá čtvrté mocnině vlnové délky.

Vypočítat lze, jak Rayleighův rozptyl přispívá k útlumu vlákna

$$L_{TR} = \exp \{-\gamma_R L\} \quad (2.4)$$

Rayleighův rozptyl lze popsat rozptylovým koeficientem γ_R uvedeným v předchozím vzorci

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_c k T_F \quad (2.5)$$

kde λ je vlnová délka, n index lomu jádra vlákna, p střední hodnota fotoelastického jevu, β_c koeficient stlačitelnosti při fiktivní teplotě T_F a Boltzmanova konstanta k [21], [22].

2.1.5 Ostatní

Řada nežádoucích jevů vzniká při instalaci vlnovodů. Jednou z těchto chyb jsou makroohyby. Vznikají například při nadměrném ohýbání rezerv vláken v rozvaděčích. Mezinárodní telekomunikační unie ITU vydala směrnici ITU-T G.657, která definuje optická vlákna se sníženou citlivostí na ohyby. Norma obsahuje 4 specifikace A1, A2, B2 a B3, které definují poloměry ohybu na použitých vlnových délkách [15].

Mikroohyby vznikají již při výrobě nebo při působení okolních vlivů na tvar vláken, jde o poruchy přímočarosti. Tyto poruchy jsou nerovnoměrně rozmístěny po optické trase.

Spojování optických kabelů je další vlastnost, u které je nutné dbát na přesnost vzhledem k celkovému útlumu a vlastnostem vlnovodů. Spoje se rozdělují podle provedení na nerozebíratelné (svařování, trubičkování, mechanické spojení) a rozebíratelné (optické spojky - konektory). Dobře provedený optický svár by měl mít hodnotu útlumu 0,02 dB, ztráty u konektorů jsou v průměru 0,2 dB [9].

2.2 Nelineární jevy

Téma nelineárních vlastností optických kabelů je poměrně nové. Jeho vzniku předcházelo neustálé zvyšování přenosových kapacit a použití multiplexací na optických trasách. Dalším důvodem byl narůstající výkon tenkých vláken, která procházejí zesilovači. Můžeme je rozdělit podle řádů nebo bývají nazývány podle jejich objevitelů [8], [39].

2.2.1 Rozptyl světla

Ramanův rozptyl

Ramanův rozptyl popisuje jev, kdy se rozptýlená vlna šíří jak dopředným, tak zpětným směrem. Tento jev není pouze nežádoucí, ale lze ho použít jako zesilující prvek, díky přesunu energie z nižších vlnových délek do oblasti vyšších pomocí pumpovacího laseru, který dodává zesilující složku. Ramanovský laser byl otestován v roce 2004 na trase Brno - Praha. Na této trase díky použití Ramanovského laseru nebylo nutné použít zesilovače [8], [39].

Brillouinův rozptyl

Brillouinův rozptyl nastává při srážce tepelně kmitajících atomů uvnitř vlnovodu se světelnou vlnou. Dochází tak k rozptylu této světelné vlny. V místě střetu dojde k oddělení fotonu, který pak pokračuje opačným směrem, než je směr šířící se vlny. Rozptýlená vlna je frekvenčně posunutá níže, než je postupná vlna. Zpětná vlna ovlivňuje stabilitu a úroveň šumu zdroje vysílání.

Tento jev lze využít jako stimulovaný Brillouinův rozptyl, pokud do vlákna s Brillouinovým rozptylem přivedeme energetický impuls, který tento jev zesílí. Na tento jev je také nutno pohlížet jako na omezující faktor při použití optických výkonových zesilovačů nebo laserů.

Závisí na přenášené šířce pásma a na použitém optickém vlákně. Významně se projevuje u signálů s úzkou šířkou čáry a potlačuje se rozšířením spektra signálu [8], [39].

Stimulovaný rozptyl

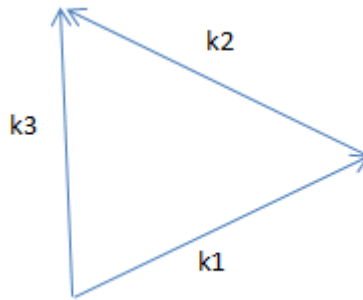
Stimulovaný rozptyl nastává, srazí-li se vlna procházející vlnovodem s tepelně nebo akusticky kmitajícím atomem. Tato srážka způsobí rozptyl vlny a dojde k nárůstu vlnových délek [8], [39].

2.2.2 Jevy druhého a třetího řádu

Třívlonné směřování

Jedná se o jev druhého řádu, při kterém směřujeme 2 optické vlny o různých frekvencích. Po průchodu těchto dvou vln nelineárním prostředím dojde k součtu nebo rozdílu obou složek a k vytvoření třetí, výsledné vlny [39].

Aby tento proces fungoval, musí být dodržena fázová podmínka. Vlny musí být rovinné a jedna musí být lineární kombinací druhé.



Obr. 2.3: Fázová podmínka [39]

$$k_3 = k_2 + k_1 \quad (2.6)$$

Mluvíme-li o nelineárních jevech třetího řádu, pak jde o prostředí s Kerrovskou nelinearitou a dochází zde ke stejnojmennému jevu.

Kerrův jev

Jev popsáný skotským fyzikem Johnem Kerrem. Říká nám, že index lomu je závislý na intenzitě paprsku vstupujícího do zkoumaného prostředí. Způsobená změna indexu lomu je pak odlišná v různých částech prostředí, ve kterém se paprsek šíří, významně ovlivňuje polarizaci a tvar šířeného impulsu [39].

Kerrův jev je zodpovědný za vznik vlastní fázové modulace SPM a křížové modulace XPM [39].

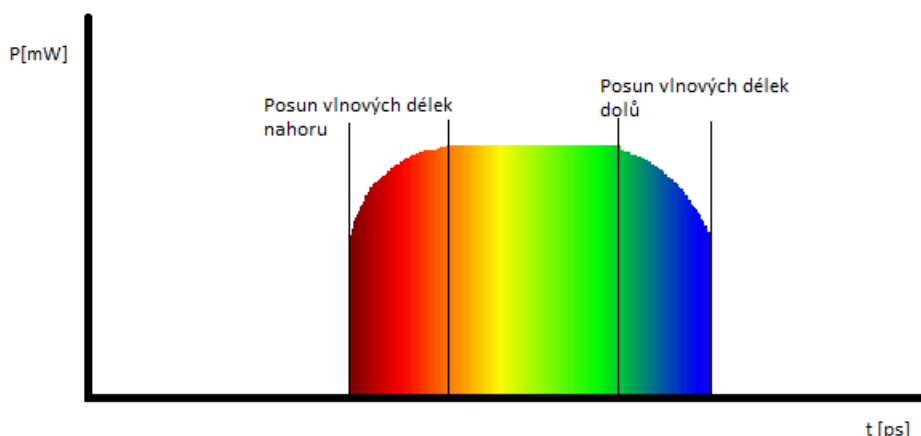
Vlastní fázová modulace (SPM)

Někdy se také označuje jako automodulace fáze. Dochází k modulaci fáze paprsku procházejícího nelineárním prostředím 3. řádu. Signál díky tomuto jevu ovlivňuje sám sebe, mění se velikost vlastní fáze $\Delta\varphi$, která je závislá na rychlých změnách

hran impulsů vzrůstajícího a klesajícího výkonu. Dochází tak k celkovému rozšíření spektra paprsku [39].

Tyto rychlé změny najdeme na vzestupné a sestupné hraně impulsu. Vzestupná hrana nám způsobí posuv vlnových délek nahoru, sestupná naopak posuv vlnových délek dolů.

Reálně se uplatňuje společně s vlastní fázovou modulací také chromatická disperze. Pokud je hodnota chromatické disperze $D > 0$, může dojít k předstížení náběžné hrany sestupnou hranou. Dojde tak k modulační nestabilitě. V případě $D < 0$ k těmto komplikacím nedojde.



Obr. 2.4: Vlastní fázová modulace [39]

Křížová modulace (XPM)

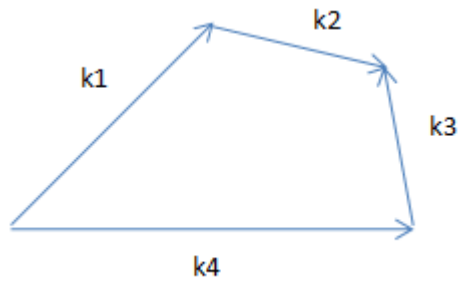
Vychází také z Kerrova jevu. Když 2 nebo více paprsků prochází vláknem (například u DWDM), dochází k překrytí jednotlivých paprsků. V těchto oblastech může dojít k nárůstu intenzity záření natolik, že se budou vzájemně ovlivňovat a dojde ke změně jejich spektra. Může docházet spolu s modulací k nadměrnému rozšiřování nebo změně jejich tvaru [39].

Čtyřvlnné směšování (FWM)

Jev vyskytující se v DWDM technologii, jejíž princip je uveden níže [39].

Snahou navázat do optického vlnovodu 3 paprsky o různých vlnových délkách nám vzniká čtvrtá vlna (označovaná „idler“), ta je naprosto odlišná od tří předchozích. Aby FWM platilo, je nutné splnit podmínku:

$$\Delta k = k_1 + k_3 - k_4 - k_2 \quad (2.7)$$

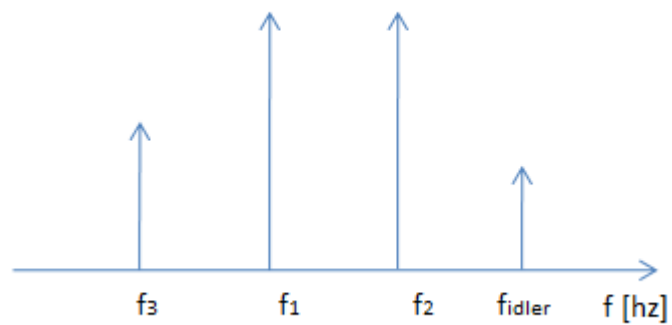


Obr. 2.5: Čtyřvlnné směšování [39]

Toto platí za předpokladu, že k_1 , k_2 , k_3 a k_4 jsou lineárně závislé vektory. Frekvence idler vlny se pak rovná

$$f_{IDLER} = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.8)$$

kde $f_1, f_2 \neq f_3$.



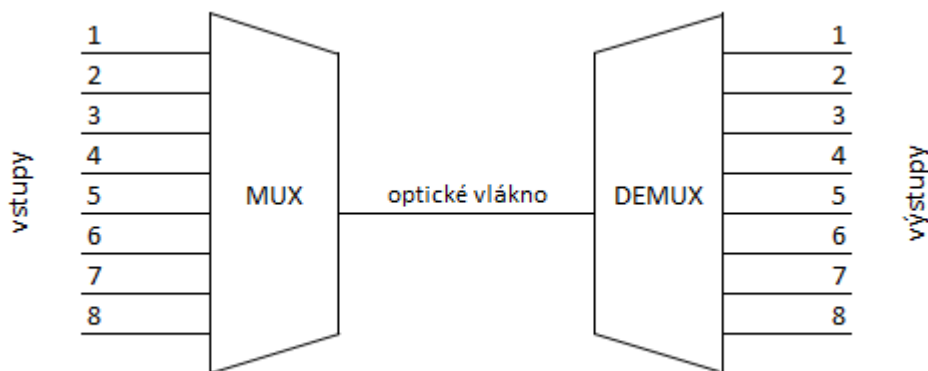
Obr. 2.6: Čtyřvlnné směšování ve frekvenční oblasti [39]

3 MULTIPLEXOVÁNÍ

V moderním pojetí telekomunikační techniky řešíme otázku využívání již zabudovaných přenosových cest. V místech, kde potřebujeme využít již aktivní přenosovou cestu, by nám bez této technologie nezbylo nic jiného, než vybudovat novou totožnou síť a realizovat přenos. To by znamenalo celosvětově využití jednotlivých tras v řádech jednotek procent. Absurdní je také představa, jaké množství sítí by nás obklopovalo. Příkladem můžou být dvě telefonní ústředny přenášející mezi sebou stovky či tisíce hovorů. Mezi těmito ústřednami nenajdeme tisíce kabelů, ale jen několik, ty díky své vyšší kapacitě dokáží pojmout sloučenou komunikaci a distribuovat ji napříč sítí.

Základní myšlenkou tedy je realizovat více přenosů jedním přenosovým médiem a zvýšit tak výrazně účinnost již realizované trasy. Pojem multiplexování tedy zahrnuje snahu sjednotit komunikaci od více uživatelů do jednoho přenosového média a vhodným logickým uspořádáním rozdělit data zpět straně příjemců. Způsobů, jak toho docílit, je několik.

Budeme-li zvažovat jednosměrný přenos s nejzákladnější technologií multiplexování, musíme využít na straně vysílače multiplexor (MUX), který sloučí podle předem dané technologie všechny vstupní signály. Tyto sloučené signály poté prochází přenosovým médiem do cíle, kde jsou pomocí demultiplexoru (DEMUX) data opět rozdělena na jednotlivé signály.



Obr. 3.1: Jednosměrný přenos 8 kanálů pomocí multiplexace

Tento základní princip ovšem není dostačující. Je nutné řešit problémy týkající se spojování jednotlivých přenosových cest, směrování, přepínání atd. Velmi důležité jsou také přechody mezi jednotlivými multiplexačními technologiemi, jako je například konverze mezi OTDM a WDM.

Dva nejzákladnější druhy multiplexování jsou TDM - Time Division Multiplexing (časový multiplex), FDM - Frequency Division Multiplexing (frekvenční multiplex), který je z hlediska použité technologie v optických sítích nahrazen označením WDM - Wavelength Division Multiplexing (vlnový multiplex), ten se pak dále dělí na Dense-WDM (DWDM) a Coarse-WDM (CWDM), které jsou označovány jako hustý a hrubý vlnový multiplex. Mezi další druhy multiplexací patří OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing, tedy ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením a v neposlední řadě CDMA - Code division multiple access, v překladu kódový multiplex [29].

3.1 CDMA

Metoda kódového multiplexování se využívá jak v metalice, tak v optice. Tato metoda našla uplatnění například v telefonii (W-CDMA Wideband Code Division Multiple Access, je součástí 3G telefonního standardu). Využívá se speciálních kódů, pomocí nichž jsou jednotlivé přenášené kanály zakódovány do jednoho společného přenosu. Data jsou dekodována až u koncového uživatele. Ten obdrží celý datový blok připadající všem a pomocí zadaného dekodovacího klíče si dekoduje pouze jemu příslušná data.

Výhodou je využití celého potenciálu přenosové cesty, naopak nevýhodou tohoto multiplexu je nutnost vyšší inteligence koncových prvků (přijímačů, vysílačů). Každé koncové zařízení schopné pracovat v této síti musí umět kódovat a dekodovat data zadanou metodou [28].

3.2 OFDM

Myšlenka zahrnout optická vlákna do metody ortogonálního multiplexu s kmitočtovým dělením vznikla v roce 2001. Později pak došlo k realizaci a funkčnímu zavedení tohoto multiplexování.

Jedná se o širokopásmovou modulaci, kde délka jednoho přenášeného symbolu může být až 100 ns, s kmitočtovým dělením kanálu. Jde o transformaci rychlého sériového toku na pomalejší paralelní tok. Ten je pomocí sub-nosných signálů přenášen dále. Díky využití ortogonálního systému a překrytí sousedních sub-kanálů se vlny vzájemně neovlivňují. Využívá se modulace a multiplexace pomocí inverzní rychlé Fourierovy transformace, demodulování a demultiplexace se pak provede rychlou Fourierovou transformací (FFT).

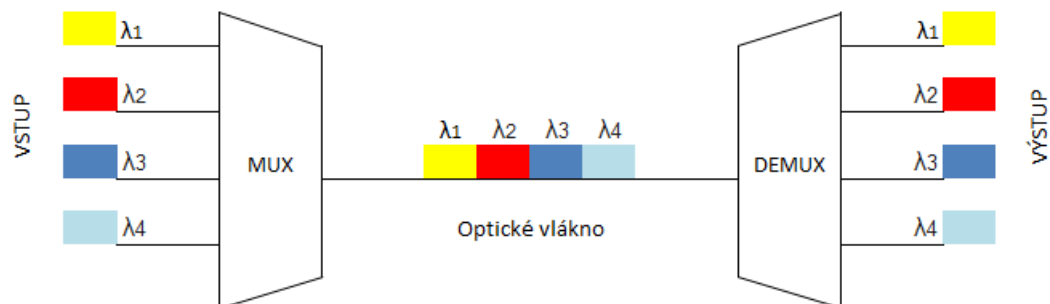
Využití OFDM je zejména v širokopásmových kabelových a bezdrátových systémech. Vzhledem ke složité realizaci se dosahuje rychlostí okolo 10Gbit/s s použitím víceúrovňových modulací QAM [1].

3.3 WDM

WDM je označení pro vlnový multiplex. Tato technologie je úzce spjata s FDM - frekvenčním multiplexem. V optice ale nepracujeme s pojmem frekvence, ale s jednotlivými vlnovými délkami. Vlnová délka je nepřímo úměrná frekvenci a platí pro ně vztah definující vlnovou délku λ rovnu podílu rychlosti šíření vlnění v a frekvence vlnění f [29].

Jedná se o jednu z nejefektivnějších technologií. Slučování více kanálů do jednoho se provádí pomocí vlnového uspořádání. Pro slučování využijeme vhodný multiplexor o N vstupech. Na tyto vstupy přivedeme různé signály s rozdílnou vlnovou délkou. Při přenosu v jednotlivých časových okamžicích musíme být schopni navázat do multiplexeru N vlnových délek a sériově je přenést vlnovodem. Na druhé straně přenosové cesty tento tok zachytíme a jednotlivé vlnové délky rozdělíme do původních N kanálů.

Snahou standardizovat technologii WDM, respektive vzdálenosti mezi přenášnými kanály, vznikly odnože CWDM a DWDM (hrubý a hustý vlnový multiplex). Jejich princip přenosu je totožný s již popsanou WDM technologií [27].



Obr. 3.2: Jednosměrný přenos 4 kanálů pomocí vlnového multiplexu

3.3.1 CWDM

Hrubý vlnový multiplex slučuje méně kanálů, nežli DWDM. Existují systémy, pro které je tento druh multiplexu výhodný a dostačující. Díky větším vzdálenostem vlnových délek, které specifikuje standard ITU G.694.2, lze využít méně přesné

lasery a detektory. To vede k menším finančním požadavkům kladeným na provedení zařízení.

Standard definuje používané vlnové délky od 1271 nm do 1611 nm. Jednotlivé vlnové délky mají mezi sebou pevně určený rozestup 20 nm. To umožňuje použít takové lasery, které vyzařují konstantní vlnové délky s odchylkou $\pm 6 - 7$ nm a splňují tak tuto podmínku. Při výběru laseru se proto musíme soustředit na tyto parametry udávané výrobcem. Dalším důležitým parametrem ovlivňujícím kolísání vlnové délky je teplota. Jedná se o pracovní (teplotní) rozsah laseru, ve kterém je garantována daná odchylka vyzařování. V případě překročení teplot může dojít k nárůstu rozdílu vlnových délek $\Delta\lambda$, tím dojde k porušení normy a nárůstu chybovosti přenosového systému, dojde k vzájemnému rušení sousedních kanálů [17].

3.3.2 DWDM

Moderní technologie založená na přenosu pomocí optického vlákna. Takto lze jednou větou popsat tento druh multiplexu. Hustý vlnový multiplex DWDM se liší proti CWDM hlavně v počtu slučovaných kanálů, nebo schopností přenášet data mnohem vyšší rychlostí. Takovýto systém vycházející ze základních myšlenek WDM je ale velice konstrukčně náročný vzhledem k nutnosti vysoké spolehlivosti nebo přesnosti.

Tuto metodu specifikuje standard ITU G.694.1. Při sestavování systému si můžeme vybrat mezi fixně zadanými centrálními frekvencemi (jim přiřazenými vlnovými délkami), nebo také zvolit flexibilní metodu. Je zde možnost kombinace různých velkých frekvenčních roztečí. To umožňuje slučovat smíšené přenosové rychlosti nebo smíšené použité modulace. Nutné je ale zabránit překrývání jednotlivých frekvenčních roztečí. Došlo by tak k překrytí jednotlivých slučovaných kanálů a vzniku chyb v přenosu [16].

Referenční frekvence systému je stanovena na 193,10 THz, tedy 1552,52 nm vlnové délky. Pomocí zadaného vzorce pak snadno vypočítáme jednotlivé frekvence kanálů f_k , kde 193,1 je konstanta - referenční hodnota frekvence podle normy ITU G.694.1, n je celé reálné číslo včetně 0 a k je hodnota námi zvolené rozteče převedené na jednotku THz [16].

$$f_k = 193,1 + (n \cdot k) \quad (3.1)$$

Komerční systémy DWDM se používají již v rychlostech několika set Gbit/s. Experimentálně však mluvíme o rychlostech několikanásobně vyšších. Existuje celá řada variant pro navržení tohoto systému. Celkový kladený požadavek na rychlost systému souvisí s počtem slučovaných kanálů a s rychlostí jednotlivých kanálů.

Při aplikaci této metody ve vysokorychlostních přenosových systémech je nutné dbát na přesnost, stabilitu a kvalitu použitých součástí. Nutné je také kompenzovat fyzikální jevy spjaté s přenosy optickým vláknem, zejména pak chromatickou disperzi. Použitím protokolu G.709, který zapouzdřuje přenášená data, zajistíme dopřednou opravu chyb. Tím se snižuje chybovost systému a prodlužuje se vzdálenost přenosu bez použití regeneračních signálových prvků [?].

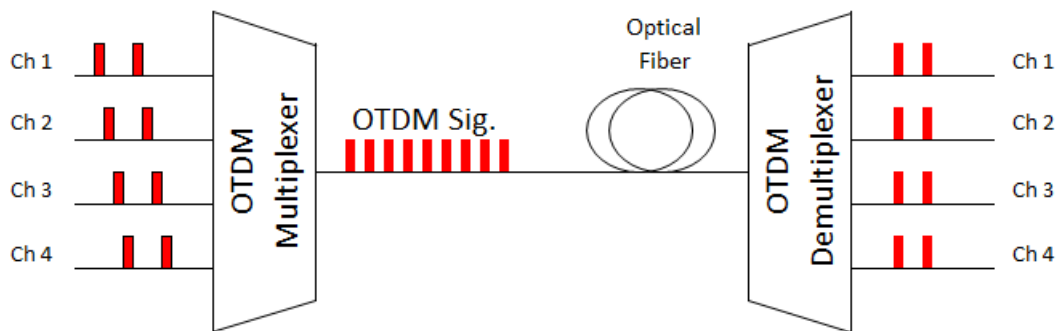
Tab. 3.1: Příklady slučování jednotlivých kanálů a výsledná přenosová rychlost [13]

Počet slučovaných kanálů	Rychlost kanálu	Celková rychlost
80	10 Gbit/s	800 Gbit/s
40	40 Gbit/s	1,6 Tbit/s
80	40 Gbit/s	3,2 Tbit/s
8	160 Gbit/s	1,28 Tbit/s
32	40 Gbit/s	1,28 Tbit/s

3.4 OTDM

Jedná se o časové slučování kanálů a přenos po optickém vlákně. Z hlediska vývoje OTDM technologie je důležité období po roce 1995, kdy došlo k výrazným nárůstům přenosových rychlostí u experimentů s vlnovým multiplexem. Tento nárůst směřoval prudce k 1 Tbit/s. Návrhy OTDM technologie s rychlostí vyšší než 100 Gbit/s jsou datovány od roku 2005. V současnosti existují studie na vysokorychlostní systémy s použitím OTDM, které dosahují až 10,2 Tbit/s [13], [26].

Podstatou přenosu je časové uspořádání jednotlivých impulsů (kanálů), které jsou navázány do optického vlnovodu a přenášeny do cíle. Tam jsou pomocí demultiplexoru zpět rozděleny na jednotlivé kanály. Stejně jako u WDM, i zde existuje mnoho variant, jak přenosový systém navrhnout. Příkladem může být systém 160 Gbit/s složený ze 4 kanálů, z nichž každý má rychlost 40 Gbit/s, takovýto systém je obecně znázorněn na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Jednosměrný přenos 4 kanálů pomocí OTDM [13]

Při realizaci návrhu optické sítě pracujeme se třemi základními bloky, na které lze postup rozdělit. Ve vysílací části musíme efektivně zpracovat vstupní signály, vhodně je upravit na požadované parametry a navázat do přenosové cesty. Přenosová cesta, realizována optickým kabelem, signál deformuje díky vlivům parazitních jevů. Abychom byli schopni se signálem v přijímací části pracovat a demultiplexovat jej zpět na výstupní kanály, musíme co možná nejvíce této deformaci a znehodnocení předejít.

Ve vysílací části je tedy nezbytné použití optického laseru pracujícího v okolí 1550 nm se šířkou impulsů uvedených v tabulce 3.2 pro požadované rychlosti přenosového systému. Velice vhodné je také signál před další úpravou namodulovat, popřípadě použít modulovaný laser. Následují další kroky jako zesílení pomocí EDFA zesilovačů, ořezání užitečných částí signálů filtry, použití nelineárních vláken, díky kterým lze rozšiřovat spektrum signálů. Nezbytnou součástí jsou prvky pro slučování signálů, tzv. optické couplery.

Přenosovou trasu může tvořit samotné optické vlákno, kombinace optického vlákna a IDF vlákna - inverzního disperzního vlákna nebo optická vlákna s vloženými zesilovači na delších trasách.

V přijímací části, s využitím kontrolních impulsů, musíme být schopni efektivně rozklíčovat (demultiplexovat) signál na výstup jednotlivých kanálů s přijatelnou chybovostí BER (Bit Error Rate) [13], [26].

3.4.1 Časové uspořádání kanálů

Při sestavování vysokorychlostního OTDM je nutné zvolit laser (generátor) v oblasti 1550 nm s parametry uvedenými v tabulce 3.2. Musí tedy být schopen generovat jednotlivé impulsy šířky *pico* $\Rightarrow$ *femtosekund* s příslušným 33% rozestupem.

Při generování a práci s impulsy o takovýchto rychlostech je nutné dbát na

správné uspořádání jednotlivých bitů. Díky jejich malému rozestupu musíme eliminovat jejich deformaci a vzájemné prolínání.

Tab. 3.2: Požadavky na OTDM [13]

Celková bitová rychlost	Doba trvání 1 bitu	Mezera mezi jednotl. bity
160 Gbit/s	6,25 ps	2,1 ps
320 Gbit/s	3,13 ps	1,0 ps
640 Gbit/s	1,56 ps	520 fs
1,28 Tbit/s	780 fs	260 fs

4 MODULACE V OPTICKÝCH SÍTÍCH

Zájem o modulační formáty vzhledem k velkým vzdálenostem přenosových tras a požadavkům na kvalitu přenosu je obrovský. Je velice výhodné, ale i nezbytné, signál před úpravou přenosem vhodně namodulovat. Existují dva základní druhy modulací.

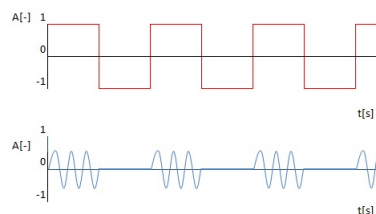
Jedná se o analogovou modulaci, kde se modulační signál mění spojitě v čase. Mezi analogové modulace patří amplitudová modulace, frekvenční modulace a fázová modulace.

Druhou skupinou jsou digitální modulace. Modulační signál je vyjádřen diskretním signálem, nejčastěji ve formě bitové posloupnosti. V souvislosti s digitální modulací se hovoří o klíčování. Existuje celá řada digitálních modulačních formátů. Základní modulační formát používaný v optických sítích je amplitudová modulace ASK (Amplitude Shift Keying) neboli OOK (on-off keying). Dále pak fázová modulace PSK (Phase Shift Keying), modulace NRZ (non-return-to-zero) bez návratové hodnoty k nule. S rostoucími požadavky na vyšší přenosové kapacity vznikla modulace CSRZ (carrier-suppressed RZ), dále pak modulace CRZ (chirped RZ), která je speciálním případem modulace RZ (return-to-zero) s návratovou hodnotou k nule. Dalšími používanými modulacemi jsou například kvadrurní amplitudové modulace QAM (Quadrature Amplitude Modulation) nebo frekvenční klíčování FSK (Frequency Shift Keying).

Dále budou popsány jednotlivé případy digitálních modulací používaných pro přenos v optických sítích [2], [13], [26].

4.1 Amplitudové klíčování (ASK)

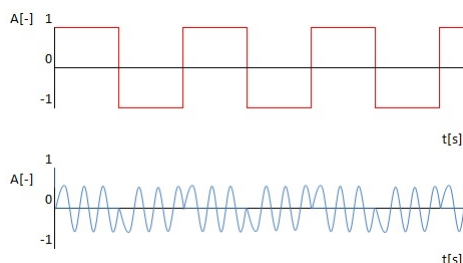
Amplitudové klíčování, označované zkratkou ASK (Amplitude Shift Keying), vychází z analogové amplitudové modulace. Jedná se o dvoustavovou modulaci, která bývá označována také jako OOK (On-Off Keying). Logická úroveň „1“ při stavu zapnuto, kdy je vysílán kmitočet nosné, a naopak při úrovni logické „0“ stav vypnuto - nepřítomnost signálu [2], [3].



Obr. 4.1: Průběh modulačního a modulovaného signálu ASK [3]

4.2 Fázové klíčování (PSK)

Tento typ modulace pracuje na principu změny fáze v modulovaném signálu o předem danou hodnotu. V digitální modulaci je označována jako BPSK (Binary PSK) popřípadě 2 PSK, kde číslo 2 označuje modulaci dvoustavovou [3].



Obr. 4.2: Průběh modulačního a modulovaného signálu BPSK [3]

Mezi další modulace pracující na principu fázového klíčování patří DBPSK diferenční dvoustavová fázová modulace a DQPSK kvadrurní diferenční fázová modulace.

4.2.1 DBPSK

Diferenční dvoustavová fázová modulace vznikla z PSK modulace. Při demodulaci signálu docházelo ke složitému procesu obnovy fáze nosné. DBPSK využívá změny fáze na základě předchozího stavu, počáteční fázi nosné není nutno znát.

Změna fáze probíhá o 180° (o π), amplituda zůstává beze změny [3].

Tab. 4.1: Změna fáze u DBPSK [13]

Fázový posun	Data
0	1
π	0

4.2.2 DQPSK

Diferenční čtyřstavová (kvadrurní) fázová modulace pracuje podobně jako DBPSK, ale je obohacena o další 2 stavy. Někdy bývá označována jako 4 PSK modulace.

Nosný signál má opět konstantní amplitudu, změna fáze probíhá díky 4 stavům o 90° . Hodnota jednotlivých stavů je určena dvojicí bitů [3].

Tab. 4.2: DQPSK modulační formát [13]

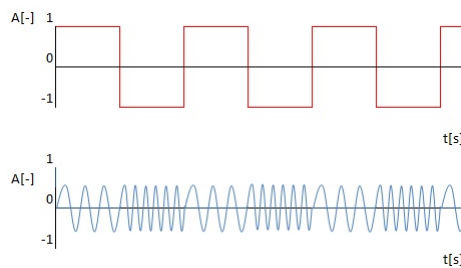
Fázový posun	Data
0	11
$\pi/2$	10
π	00
$3\pi/2$	01

Mezi další modulační principy pracující na principu změny fáze patří 8PSK vyjádřena 8 stavy (trojicí bitů) a 16PSK se 16 stavy (čtyřmi bity). Tyto vícecestavové M-PSK modulační principy (M je počet stavů) nachází uplatnění v jiných odvětvích jako je například televizní technika. V optických sítích jsou používány spíše vícecestavové M-QAM modulační principy.

4.3 Frekvenční klíčování (FSK)

Frekvenční klíčování je založeno na změně frekvence (kmitočtu) modulovaného signálu. Nejjednodušším případem této digitální modulační principy je BFSK, tedy dvoustavové fázové klíčování. BFSK bývá realizována dvěma nosnými signály s frekvencemi o rozdílu $\pm\Delta f$. Při trvání logické „1“ je vysílána nosná s frekvencí f_1 , v logické „0“ pak f_2 .

Změna kmitočtů může probíhat spojitě, popřípadě nespojitě. Spojitý přechod vykazuje užší spektrum modulovaného signálu oproti nespojitému, kde vzniká přechod [2], [3].

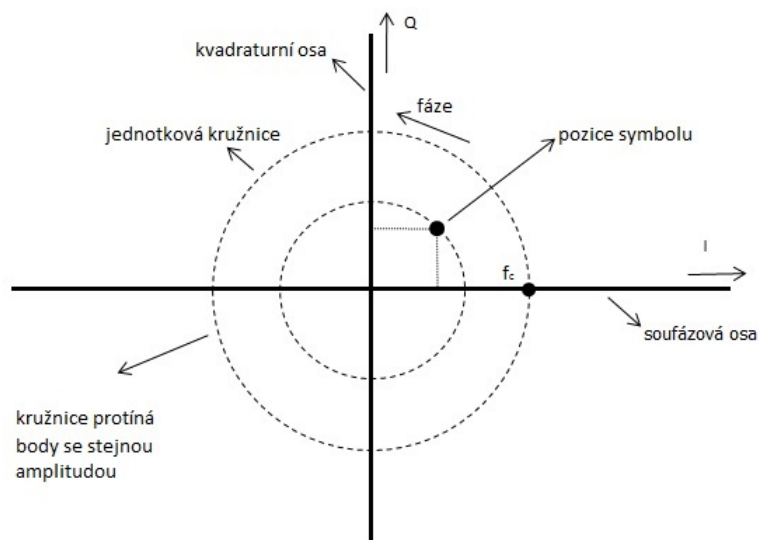


Obr. 4.3: Průběh modulačního a modulovaného signálu FSK [3]

4.4 Kvadrurní amplitudová modulační principy (QAM)

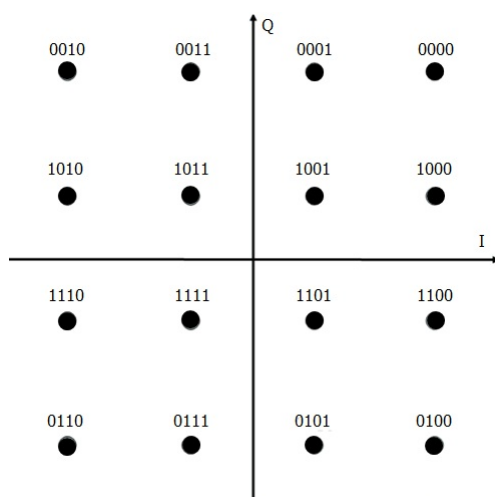
QAM kvadrurní amplitudovou modulační principy lze popsat jako kombinaci fázového a amplitudového klíčování ASK-PSK. Jednotlivé stavy, kterých QAM nabývá, se rozdělují

podle jejich amplitudy a fáze. Tyto koncové body (stavy) se znázorňují do konstelačních diagramů.



Obr. 4.4: Konstelační diagram - obecně [7]

V těchto diagramech se vyznačují bitové kombinace pro daný druh klíčování. Z hlediska eliminace chybovosti se osvědčilo popisovat sousední symboly v diagramu pouze jedním rozdílným bitem. Při vzniku chyby dojde pravděpodobně k záměně s některým ze sousedních symbolů (chyba 1 bitu). Pokud takováto chyba vznikne, lze ji efektivně identifikovat a opravit například použitím parity nebo samoopravného protichybového kódu [7], [2], [3].



Obr. 4.5: Konstelační diagram 16 QAM [7]

Číslo uvedené před zkratkou QAM definuje počet stavů použitých v modulačním formátu. Používají se nejčastěji 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, 256 QAM.

4.5 RZ

RZ modulační formát pracuje se signálem s návratovou hodnotou k nule. Šířka impulsu je kratší, než šířka bitového intervalu s poklesem na úroveň logické „0“. RZ je založena na NRZ modulaci. NRZ optický signál je přiveden do druhého modulátoru se sinusovou řídicí funkcí. U ideální modulace by měly být všechny impulsy identické. Tvar impulsů je stejný, bez závislosti na sousední bitové hodnotě. V souvislosti s RZ se používají 3 formáty s různou střídou uvedenou v procentech. Jsou to 33% RZ, 50% RZ, 67% RZ (CSRZ) [26].

4.6 NRZ

NRZ modulační formát, jehož hodnota signálu je bez návratu k nule, se stal základem v optických komunikačních systémech. U NRZ zabírá logická „1“ celý bitový interval, při kterém nedojde k návratu k nule. V závislosti změny signálu dojde ke změně mezi logickými úrovněmi „1“ a „0“. Fáze v úrovni logické „0“ je nulová a u úrovně logické „1“ je π . NRZ má užší spektrum v centrálním laloku [26].

4.7 CSRZ

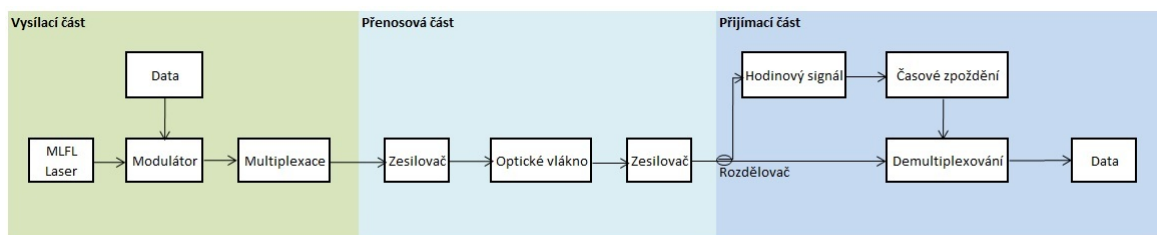
CSRZ modulační formát je složen z modulace RZ přivedené na druhý modulátor. Frekvence druhého modulátoru je řízena analogovým sinusovým generátorem, je rovna polovině přenosové rychlosti. Mezi sousedními bity vznikne fázový posun π , dominance centrálního laloku ve spektrálním zobrazení je potlačena [26].

4.8 CRZ

CRZ modulační formát vychází z modulace RZ, s využitím nového parametru kmitočtového rozmítání, z toho vychází název Chirped RZ. Konstrukčně je řešena použitím fázové modulace, připojené na výstup RZ modulace. Dochází k destruktivnímu ovlivnění nosné frekvence. CRZ má pozitivní vliv na kvalitu modulovaného signálu pro použití například v OTDM, v případě vlnového multiplexu je použití této modulace nevhodné [26].

5 NÁVRH A SIMULACE OTDM

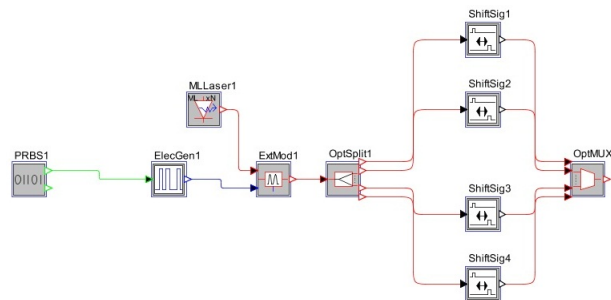
Při sestavování návrhů přenosových systémů založených na OTDM lze rozdělit postup do tří bloků. Tyto bloky se skládají ze základních prvků nezbytných pro funkčnost systému. Tyto základní prvky, tvořící kostru systému, jsou dále doplněny dalšími technologiemi nezbytnými pro přenos v reálném přenosovém systému.



Obr. 5.1: Základní model OTDM přenosového systému [13]

Prvním krokem je realizace OTDM vysílače. Vysílač musí být schopen slučovat jednotlivé optické kanály, plnit funkci modulování signálu a zajistit výslednou úpravu před navázáním do přenosové trasy pomocí filtrů nebo nelineárních vláken. Následné zesílení signálu a přenesení na danou vzdálenost zajišťuje blok přenosového systému. Na straně přijímače je důležitá práce s hodinovým (synchronizačním) signálem, který je vytvořen na straně vysílače. Přijatá data jsou demultiplexována na základě informací o jednotlivých kanálech. Výsledkem jsou kanály se shodným datovým tokem, které jsme navázali do přenosového systému na straně vysílače.

Experimentální přenosové schéma se proti reálnému liší realizací datových kanálů. Při práci s reálnými daty slučujeme N kanálů o dané šířce pásma, přenášíme je a následně demultiplexujeme do původní podoby. V případě experimentů a simulací se lze spokojit s jedním datovým kanálem, který vytvoříme. Kanál duplikujeme pomocí optického rozdělovače do N kopií. Vzájemným posunutím jednotlivých kanálů v čase a sloučením docílíme stejného výsledku jako při práci s reálnými daty.



Obr. 5.2: Vytvoření datového kanálu 10 Gbit/s a následná multiplexace na 40 Gbit/s v programu OptSim

5.1 Prvky používané v OTDM

Přenosový systém, pracující se šířkou pásma 320 Gbit/s, vyžaduje ke své funkci specifické prvky. Jedná se zejména o lasery generující impulsy šířky jednotek pikosekund, modulátory, optické pásmové filtry, zesilovací prvky, speciální optická vlákna a technologie demultiplexace datového toku.

5.1.1 Zdroje záření

Laserů splňujících kriteria pro adaptaci ve vysokorychlostních systémech je více. Všechny musí splňovat požadavky kladené na generování konstantního výkonu, splňovat výkonovou stabilitu v dané pracovní oblasti, mít schopnost laditelnosti a generovat signály s úzkou spektrální čarou.

Optický vysílač je složen ze zdroje záření, kterým může být luminiscenční dioda LED (Light-Emitting Diode) nebo laserová dioda LD (Laser Diode). Dále z vnitřního modulátoru a vstupní vazby. U řady laserů se používají vnější modulátory, které tvoří samostatné zařízení.

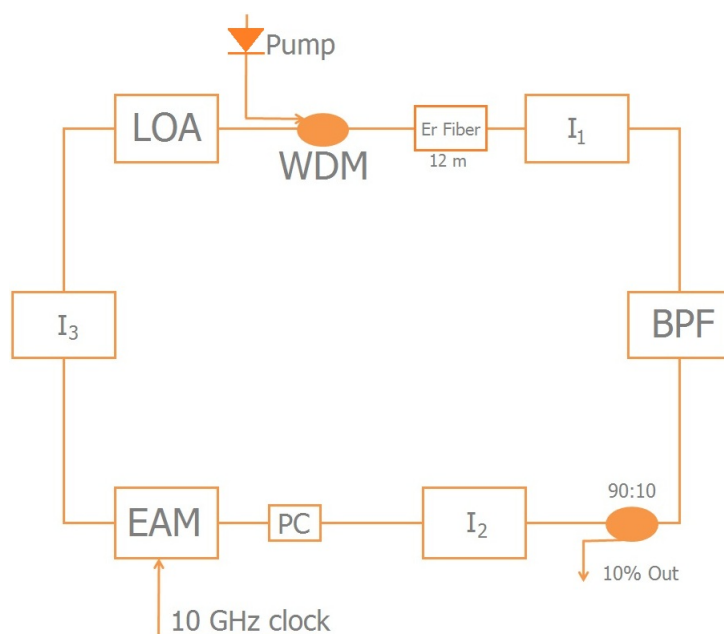
Luminiscenční diody se využívají pro přenosy na krátké vzdálenosti s nízkými přenosovými rychlostmi (velmi široká spektrální čára). Laserové diody vykazují podstatně užší spektrální čáru. Jsou velmi využívány a existuje celá řada technologických provedení (Fabry-Perotovy laserové diody, vláknové lasery, plošné vyzařující lasery atd.).

MLFL lasery

Pro účely návrhu a simulace se zaměříme na MLFL lasery (Mode-Locked Fiber Laser). Díky vysoké stabilitě a schopnosti přesného generování jsou velice vhodné pro použití v OTDM.

Jejich pracovní oblast je většinou stanovena v okolí 1550 nm se schopností generovat pulzy šířky nižší než jednotky femtosekund. Tato použitá vlnová délka, která spadá do konvenčního 4. pásma rozmezí 1530 nm - 1565 nm stanoveného ITU, je využita díky nízkému měrnému útlumu [9], [13], [30].

Vhodným prvkem pro účely sestavení OTDM může být aktivní 10 GHz MLFL erbiem dopovaný laser. Strukturu laseru lze konstrukčně vyjádřit jako smyčku.



Obr. 5.3: Struktura MLFL laseru [20]

Pomocí modulátoru EAM (Electroabsorption Modulator) navážeme do smyčky 10 GHz signál. Izolátory I_1 , I_2 a I_3 zajišťují jednosměrný přenos ve smyčce. Pomocí LOA (Linear Optical Amplifier) je laser méně náchylný na podmínky, ve kterých pracuje, protože dochází k řízení amplitudové odchylky. Pomocí WDM slučovače (coupleru) dopujeme vlákno délky 12 metrů s příměsí erbia (Er). Filtrem BPF upravujeme impulsy vlnové délky 1550 nm na šíři 6 nm. Deset procent energie je pomocí coupleru odděleno ze smyčky a tvoří výstup laseru, zbylý signál pokračuje směrem k polarizačnímu kontroléru. PC je využit pro optimalizaci PMD v celé smyčce [20].

5.1.2 Modulátory

Ve vysokorychlostní komunikační technice se využívají nejčastěji EAM - elektroabsorpční modulátory a LiNbO₃ modulátory (Lithium Niobate Modulator).

EAM

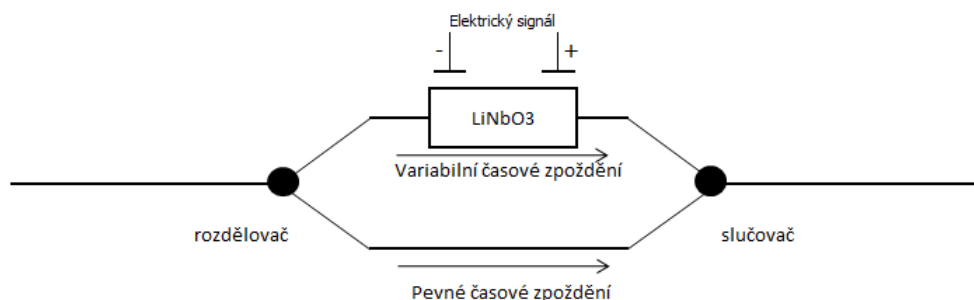
Elektroabsorpční modulátory k činnosti vyžadují nízké modulační napětí. Pracují na principu změny absorpčního koeficientu v závislosti na přiloženém elektrickém poli. Velikost EAM modulátorů je výrazně menší než u LiNbO₃, díky tomu a vhodným parametrům se často využívají jako integrované modulátory v laserech (obr. 5.3). Používají se dvě technologie. Využívají Franz-Keldyshova efektu (FKE) nebo QCSE (quantum-confined Stark effect).

Franz-Keldyshov jev nastává při působení elektrického pole na skupinu polovodičů. Pro dosažení vysoké účinnosti modulátoru musí docházet k minimální absorpci energie. Změny absorpčního spektra jsou způsobeny elektrickým polem. Vhodným materiálem pro vlnové délky 1300 a 1550 nm je InP (fosfid india).

QCSE je prováděno v kvantové hladině. Jedná se o provedení polovodičů realizovaných ze dvou různých materiálů. Mohou to být InGaAs a InP materiály, jedná se o sloučeniny Indium-Gallium-Arsenid a Fosfid-India [33].

LiNbO₃

Druhé provedení modulátoru využívá elektrooptického materiálu LiNbO₃. Jedná se o sloučeninu prvků niobu, lithia a kyslíku. Modulátor sestavený z této sloučeniny vykazuje velmi dobré parametry, co se nízkého řídicího napětí týká, je kompatibilní s optickými vlákny a zvládá modulaci datového toku > 10 GHz. Označován bývá podle sloučeniny LiNbO₃ (Lithium Niobate Modulator) nebo jako MZM (Mach-Zehnder Modulator).



Obr. 5.4: LiNbO₃ optický modulátor [24]

Optický signál, který chceme modulovat, přivedeme na rozdělovač, rozdělíme tak signál do dvou vláken. Horní paprsek projde přes krystal LiNbO₃. Paprsek procházející dolním vláknem je zpožděn aby oba signály přišly na slučovač ve stejný časový okamžik. Po sloučení obou větví dostáváme modulovaný optický signál [11], [13], [24].

5.1.3 Zesilovače

Optický zesilovač je zařízení zesilující přímo optický signál bez nutnosti převést ho na elektrický. Využívá se jevu stimulované emise. Přejed soustavy elektronů do stavu s nižší energií, který je vyvolaný stimulujícím fotonem, má za následek vyzáření fotonu. Foton má stejné parametry (energii, směr šíření a stejnou fázi) jako stimulující foton. Stimulující foton ale soustava nepohlí, pouze soustavou projde a přidá se k němu stimulovaný foton.

Existuje několik druhů optických zesilovačů. Podle principu se dělí na zesilovače řady xDFA, využívající vlákno s příměsí uvnitř zesilovače, SOA zesilovače nebo Ramanovské zesilovače.

EDFA

V OTDM se hojně využívá EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovačů. Tyto zesilovače v sobě obsahují médium (optické vlákno) podobné standardnímu jednovláknovému vláknu, pouze je dotováno (obohaceno) o některý prvek. V našem případě je dotován prvek Erbium. Při výrobě zesilovače je nutné dbát na přesné množství dotovaného prvku, aby nedošlo ke zhoršení účinnosti a poklesu zisku zesilovače. Zesílení je tedy dosaženo pomocí stimulované emise fotonů z iontů, které byly při výrobě přidány do optického vlákna. Pokud je použit EDFA zesilovač, zesílujeme tak jev chromatické disperze díky rozdílné rychlosti šíření spektrálních složek.

V přenosové trase existuje několik míst nasazení EDFA zesilovačů. Podle těchto míst dále dělíme zesilovače na booster, in-line a předzesilovače [13], [23].

- Booster zesilovač je umístěn v bezprostřední blízkosti za optický vysílač. Do zesilovače je navázán silný signál z vysílače, který je zesílen na maximální úroveň, kterou je schopno přenosové médium pojmout.
- In-line zesilovač je umístěn na přenosové trase. Na vstupu získává nízký signál z přenosové trasy a výstupem je maximální úroveň, kterou lze do optického vlákna navázat.
- Předzesilovače (Pre-amp) se umísťují před optický přijímač. Pracují s velmi nízkým signálem z přenosové trasy, který zesílují do úrovně vhodné pro použitý přijímač. Zesilovače musí splňovat podmínku minimálního vnitřního šumu.

xDFA

Z řady xDFA zesilovačů, kromě již zmiňovaného a velice rozšířeného EDFA zesilovače, existují další optovláknové zesilovače typu PDFA, TDFA a YDFA.

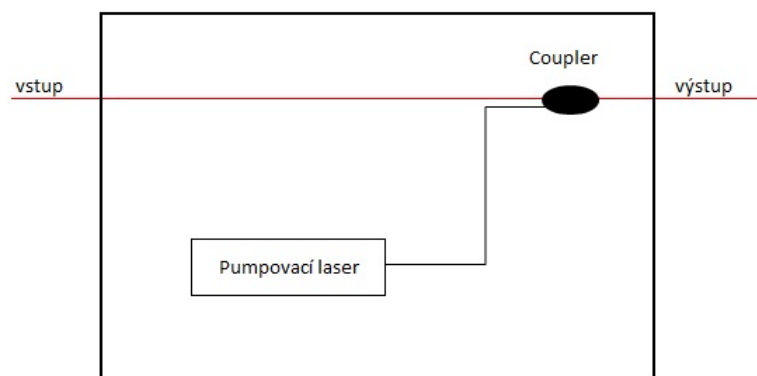
Zesilovače se liší prvkem, kterým jsou dopovány. PDFA (Praseodymium Doped Fiber Amplifiers) využívá příměsí látky praseodymium, pracují na vlnových dél-

kách 1280 - 1320 nm. TDFA (Thulium Doped Fiber Amplifiers) obsahuje fluoridové vlákno s příměsí thulia, pracovní oblast těchto zesilovačů je v oblasti 1460 - 1490 nm. YDFA (Ytterbium-doped Fiber Amplifier) využívají jako příměs prvek ytterbium, jejich pracovní oblast je 1055 nm - 1075 nm [23], [38].

Ramanovské optické zesilovače

Zesílení je prováděno nelineárním jevem - Ramanovským rozptylem (kapitola 2.2.1), na samotné optické trase. Zesilovač ke své činnosti nepotřebuje žádné speciální vlákno jako xDFA zesilovače.

Realizace může být provedena couplerem slučujícím pumpovací laser s optickou přenosovou trasou. Právě na výkonu pumpovacího laseru je závislý výkon celého zesilovače, i pracovní oblast. Lasery zesilují signál o 15 až 20 dB [23].



Obr. 5.5: Blokové schéma Ramanovského optického zesilovače [23]

SOA zesilovače

V polovodičovém zesilovači SOA (Semiconductor optical amplifier) jsou elektrony díky vnějšímu působení proudu vstříkovány do aktivního prostředí, nastat mohou tři vyzařující mechanismy.

- Stimulovaná absorpce, při které dopadající foton může stimulovat nosič z valenčního pásu do vodivostního. Jedná se o ztrátový proces.
- Stimulovaná emise nastává, pokud foton s dostatečnou energií dopadne na polovodič. Nastane rekombinace nosiče z vodivostního pásu a díry z valenčního pásu. Nový foton má stejné parametry jako původní. Tento proces se může opakovat a pokud je počet nosičů ve vodivostním pásu větší než ve valenčním, bude s nejvyšší pravděpodobností docházet k vyššímu zisku než k absorpci, jak tomu bylo v předchozím případě.

- Spontánní emise je nežádoucí efekt polovodičového zesilovače a způsobuje šum. Dochází při něm k rekombinaci nosičů a vytváření náhodných fotonů s rozdílným směrem a fází.

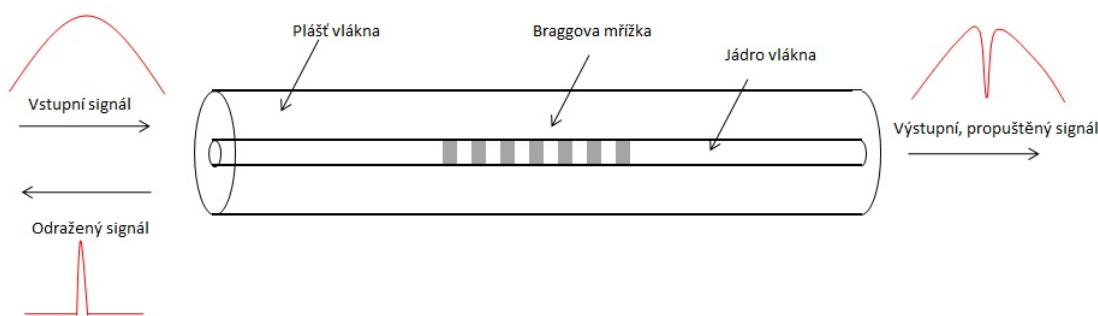
Technologicky se dělí na zesilovače, kterými prochází signál několikrát a důležité jsou odrazy z koncové plochy zesilovače, jedná se o FP-SOA (Fabry-Perot SOA), nebo o zesilovače se zanedbatelnými odrazy při jednorázovém průchodu signálu TW-SOA (travelling-wave SOA). Zvláštním typem je RSOA (Reflective SOA), má menší citlivost na polarizaci a nižší šum oproti předchozím SOA. Využívá se v pasivních přístupových sítích.

SOA zesilovače jsou levnější variantou s vyšším šumovým číslem, než je hodnota EDFA a Ramanovského zesilovače. Pracovní oblast je od 1280 nm do 1650 nm [5].

5.1.4 BPF filtr

Zkratka BPF označuje Optical Bandpass Filter. Podstatné je, jakou šíři pulzu nám tento filtr propustí. Jeho hodnota je udávána v nanometrech. Při výběru filtru volíme centrální vlnovou délku a $\Delta\lambda$, tedy šířku pásma, které filtr propustí.

Optické filtry pracují na principu FBG mřížek (Fiber Bragg Grating). Speciální FBG vlákna obsahují braggovské mřížky. Tyto mřížky jsou periodické změny indexu lomu ve vlákne. Mřížky se chovají jako zrcadla, která odráží určité vlnové délky a ostatní propustí.



Obr. 5.6: Využití Braggovy vláknové mřížky [12]

Existují tři základní provedení s braggovskými mřížkami. Homogenní provedení je periodické uspořádání mřížek za sebou v celé délce vlákna. Výsledkem je hlavní lalok s řadou postranních pásem. Pro eliminaci, potlačení těchto postranních pásem, lze využít apodizované braggovské mřížky. Apodizace znamená postupné zmenšování změn indexů lomu na krajích mřížky. Poslední variantou mřížek jsou chirped mřížky. U těchto mřížek dochází ke změnám vzdáleností mezi jednotlivými indexy lomu a používají se například ke kompenzaci chromatické disperze [12], [13].

5.1.5 Optická vlákna

V OTDM přenosovém systému budeme aplikovat optická vlákna ve formě propojovacích patch kabelů, pro vzdálený přenos klasické telekomunikační jednovodové vlákno dle doporučení ITU-T a inverzní disperzní vlákno na konci přenosové trasy. Konkrétní parametry jednotlivých vláken budou specifikovány v simulaci OTDM [9].

Pro úpravu signálů lze využít nelineárních vláken. Jejich vývoj byl nezbytný vzhledem k vývoji a aplikaci vysokorychlostních systémů. HNLF má velmi malý rozměr jádra (průměr $<1\mu\text{m}$). Cílem je pracovat s nelineárními efekty v optických přenosech. Vlákna byla vyvinuta s různými disperzními vlastnostmi včetně vláken zvaných DF-HNLF (dispersion flattened highly non-linear fibre), která dosahují nulové hodnoty disperze.

Nelineární vlákna mohou být provozována ve spektrálním rozsahu od 600 do 1700 nm. Díky hodnotě disperze blíží se k nule jsou vhodné pro použití u FWM čtyřvlnného směšování - vlnové konverze. Jsou vhodné pro celkové zvyšování nelineárních jevů - Romanova rozptylu, Kerrova jevu nebo Brillouinova rozptylu [13].

5.1.6 Demultiplexace v časové doméně

Proces získání původního signálu o dané přenosové rychlosti ze sloučeného kanálu pomocí OTDM byl realizován několika metodami. Mezi již testované metody, pracující na přenosové rychlosti $> 100\text{ Gbit/s}$, patří zejména použití TOAD zařízení (Terahertz Optical Asymmetric Demultiplexer). Může být řešeno principem nelineárního smyčkového zrcadla NOLM, popřípadě využitím symetrického Mach-Zehnderova (SMZ) interferometru.

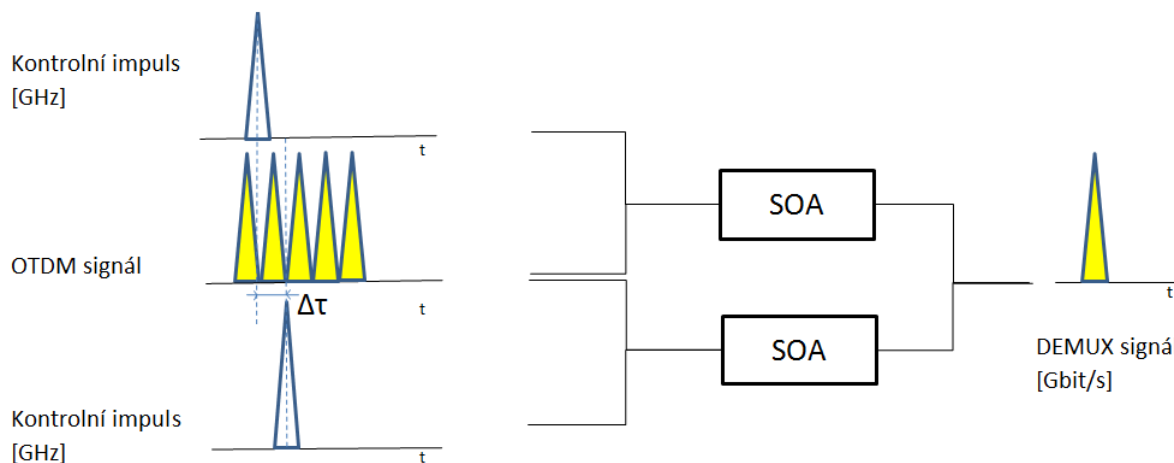
Je nutné, spolu se signálem obsahujícím příslušná data, přivést také kontrolní signál, pomocí kterého dojde k rozklíčování. Metoda musí být velice rychlá, stabilní a schopná pracovat s impulsy šíře řádu pikosekund či femtosekund.

Symetrický Mach-Zehnderův interferometr

Symetrický Mach-Zehnderův interferometr je jednou z technologií založených na optické demultiplexaci a je jedním z ověřených principů aplikovaných například pro přenos 320 Gbit/s . Využívá dvou polovodičových optických zesilovačů SOA jako nelineární spínací prvky, které se osvědčily díky své rychlé odezvě 100 fs a schopnosti efektivně spínat optický signál.

Na vstup obou polovodičových optických zesilovačů přivedeme multiplexovaný signál. Dále přivedeme na vstupy polovodičových optických zesilovačů kontrolní impulsy, které jsou vzájemně posunuty o časový interval o $\Delta\tau$, reprezentující velikost

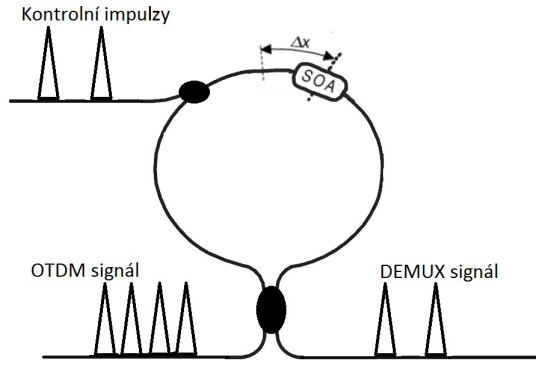
doby trvání datového impulsu. Díky tomuto paralelnímu rozdělení dokáže tento systém velice efektivně pracovat v reálném čase a s vysokými přenosovými rychlostmi. Výsledkem je demultiplexovaný kanál. Nastavením doby zpoždění kontrolního signálu vymezujícího začátek datového impulsu vybíráme kanál, který bude následně demultiplexován [13], [31].



Obr. 5.7: Symetrický Mach-Zehnderův interferometr

Nelineární optické smyčkové zrcadlo (NOLM)

NOLM je výraz pro nelineární optické smyčkové zrcadlo. To v sobě obsahuje symetrický Mach-Zehnderův interferometr. Do NOLM smyčky vstupuje multiplexovaný signál spolu s kontrolními impulsy. Smyčka obsahuje ve spodní části spojku s nastaveným poměrem 50/50. V přítomnosti kontrolního signálu dochází v SOA ke spínání a demultiplexování jednotlivých kanálů. Výběr kanálu zajišťuje posun symetrického Mach-Zehnderova interferometru o Δx . Výstupem NOLM je tedy konkrétní demultiplexovaný signál zvoleného kanálu [11], [13], [31].



Obr. 5.8: Demultiplexace pomocí NOLM smyčky

5.2 Diagram oka

Pro analýzu a stanovení kvality digitálních přenosů slouží diagram oka. Podle něj lze charakterizovat chyby jednotlivých kanálů a vyhodnocovat přenosové charakteristiky [6].

V souvislosti s diagramem oka lze určovat parametry BER (Bit Error Rate), Q-faktor nebo SNR (Signal to Noise Ratio) - odstup signálu od šumu.

5.2.1 Q-faktor

Jedná se o parametr udávající kvalitu grafického zobrazení diagramu oka v místě, kde bylo realizováno měření.

Q-faktor lze vypočítat podle vztahu

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (5.1)$$

jedná se o bezrozměrnou veličinu kde μ_0 je střední hodnota úrovně logické nuly, μ_1 je střední hodnota úrovně logické jedničky, σ_0 je rozptyl hodnot úrovně logické nuly a σ_1 je rozptyl hodnot úrovně logické jedničky. Lze jej také vyjádřit v jednotkách decibel dosazením do následujícího vzorce kde Q je hodnota Q-faktoru z rovnice 5.1 [32].

$$Q_{dB} = 20 \log_{10}(Q) \quad (5.2)$$

5.2.2 Bitová chybovost kanálu

Bitová chybovost kanálu BER je bezrozměrná veličina s hodnotou $BER < 10^{-9}$, udávající četnost výskytu chybně přenesených symbolů. V případě, že je znám počet

chybně přenesených bitů N_E a počet všech přenesených bitů N_A , jedná se o jednoduchý matematický výpočet [26].

$$BER = \frac{N_E}{N_A} \quad (5.3)$$

5.2.3 Odstup signálu od šumu

Odstup signálu od šumu SNR souvisí s bitovou chybovostí BER. Definuje poměr výkonu signálu a výkonu šumu. Pokud zesilujeme signál, který obsahuje složku šumu, zesíleny budou složky obě. Může nastat situace, kdy nelze signál rozpoznat díky vysoké úrovni právě zesílené složky šumu [6].

Odstup signálu od šumu lze vyjádřit

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (5.4)$$

hodnota SNR je udávána v decibelech, P_S výkon signálu a P_N výkon šumu. Odstup signálu od šumu můžeme vyjádřit pomoci bitové chybovosti kanálu.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{SNR}{2}} \quad (5.5)$$

5.3 Návrh 320 Gbit/s OTDM na vzdálenost 30 km

Pro laboratorní sestavení datového toku 10 Gbit/s využijeme Mach-Zehnderova modulátoru. Modulátor bude zpracovávat signál z Mode-Locked laseru pracujícího na vlnové délce 1550 nm a elektrického generátoru, na který bude přiveden pseudo-náhodný generátor dat. Propojování jednotlivých optických prvků bude provedeno 0,5 m dlouhým optickým kabelem opatřeným na obou koncích konektory. Útlum konektoru je -0,2 dB, útlum jednovidového optického vlákna -0,2 dB/km.

Takto vytvořený datový tok se šířkou pásma 10 Gbit/s upravíme na výsledných 320 Gbit/s. Realizováno to bude dvěma po sobě následujícími multiplexacemi s úpravou na 80 Gbit/s a na cílených 320 Gbit/s.

Výstup Mach-Zehnderova modulátoru přivedeme na optický splitter 1x8. Tím docílíme rozdělení signálu z 1 vstupní do 8 výstupních větví. Jednotlivé větve samostatně připojíme k optickým zpožďovacím jednotkám, s individuálním nastavením pevné doby zpoždění u každé jednotky. Ke sloučení těchto 8 větví využijeme OTDM multiplexeru 8x1 - 80 Gbit/s. Velmi podobný postup budeme aplikovat v následujícím kroku.

Signál s datovým tokem 80 Gbit/s z multiplexeru připojíme taktéž na optický splitter. Jeho specifikace ovšem bude 1x2, tedy rozdělení do 2 datových toků o stejné

šířce pásma. Signál každé z větví projde optickou zpožďovací jednotkou, s individuálním nastavením pevné doby zpoždění u každé jednotky. Pro sloučení těchto 2 optických cest, a dosažení datového toku 160 Gbit/s, využijeme 2x1 OTDM multiplexeru. Stejně řešení je využito pro následné vytvoření 320 Gbit/s datového toku.

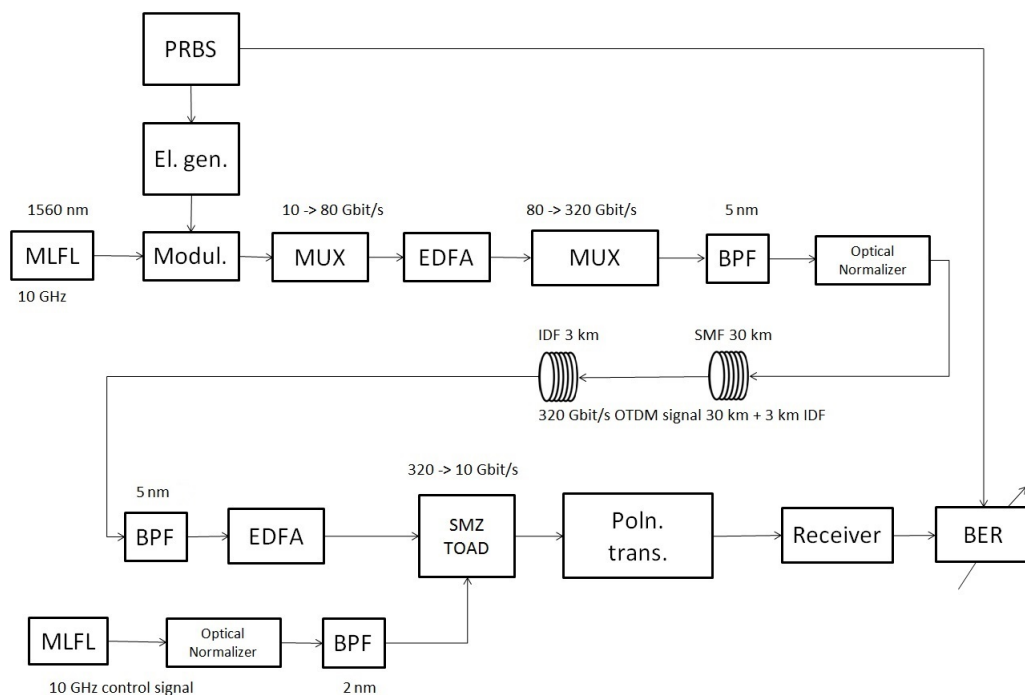
V následujícím kroku přivedeme výstup multiplexeru na optický pásmový filtr o vlnové délce 5 nm. Tato vlnová délka je převzata z literatury [25], a její přesná hodnota bude určena simulací. Optický výkonový normalizér slouží pro vyrovnání výkonových úrovní 320 Gbit/s signálu, který následně navážeme do přenosové trasy.

Pro přenos jsme zvolili jednovidové vlákno o délce 30 km. Pro kompenzaci disperze využijeme inverzní disperzní vlákno. Jeho délka bývá teoreticky stanovována v poměru 1:10 vzhledem k délce přenosové trasy. Skutečná délka bude taktéž stanovena při simulaci tohoto návrhu a ověřena disperzní mapou.

V přijímací části vytvoříme pomocí MLFL laseru, se shodnými parametry jako laser ve vysílací části, 10 GHz řídicí signál. Pomocí optického výkonového normalizéru vyrovnáme výkonovou úroveň signálu a následně jej upravíme optickým pásmovým filtrem. Z principu SMZ spínání bude výhodné aplikovat signály širší jednotek nm. Principiálně využijeme BPF filtru se šířkou pásma 2 nm, jehož skutečnou hodnotu taktéž stanovíme pomocí simulace.

Datový tok po průchodu inverzním disperzním vláknem přivedeme taktéž na optický pásmový filtr. Jeho šířka je stejná jako u filtru, který je použit ve vysílací části. Následně tento datový tok 320 Gbit/s zesílíme zesilovačem a spolu se samostatně vytvořeným řídicím signálem jej přivedeme na demultiplexer. Dle principu demultiplexeru, SMZ spínání uvedeného v kapitole 5.1.6, dosáhneme 10 Gbit/s demultiplexovaného kanálu. Tento optický signál přivedeme na polarizační kontrolér a převedeme jej na elektrický signál.

Posledním krokem je stanovení chybovosti celého systému spolu s určením hodnoty Q-faktoru. Pro tyto účely je využit měřič chybovosti porovnávající vyslaná a přijatá data, který je připojený na elektrický demultiplexovaný signál a zároveň na výstup pseudonáhodného generátoru dat umístěného ve vysílací části.



Obr. 5.9: Návrh 320 Gbit/s OTDM na vzdálenost 30 km

Útlumová bilance vysílací a přenosové části

V závislosti na vysílacím výkonu MLFL laseru, a díky celkovým ztrátám, je nutné umístění zesilovače za jeden z výše uvedených multiplexerů. Při vysílacím výkonu laseru < 20 dBm jej umístíme za multiplexer 8x1. Pokud použijeme vysílací výkon > 20 dBm, zesilovač umístíme na začátek přenosové trasy. Výkon laseru nám tedy stanoví, jaký zesilovač zvolit a kam jej umístit.

Zvolíme laser s výstupní výkonovou úrovní 15 dBm. Útlum modulátoru se pohybuje v jednotkách dB, námi zvolený modulátor má vnitřní útlum -3 dB. Celkový útlum multiplexeru, splitteru 1x8 a zpožďovacího členu je stanoven na -10 dB. Propojení modulátor - multiplexer - zesilovač nám zajistí 2 patch kabely o celkovém útlumu -1,2 dB. Na výstupu multiplexeru předpokládáme signál úrovně 1,4 dBm, který po průchodu patch kabelem dosáhne úrovně 0,8 dBm vstupující do zesilovače.

Zesilovač zesílí úroveň signálu na 20 dBm, tato intenzita je dostačující pro multiplexování signálu na 320 Gbit/s a následný přenos na vzdálenost 30 km.

Multiplexer vytvářející 320 Gbit/s datový tok má útlum -10 dB, vzhledem k propojovacímu kabelu zesilovač - multiplexer je na jeho výstupu hodnota úrovně 9,4 dBm. Následuje propojení filtru opět patch kabelem, útlum filtru je -3 dB.

Velikost úrovně signálu před navázáním do přenosové trasy činí 5,8 dBm, na tuto hodnotu je nastaven optický normalizér, který vyrovná úroveň průchozího signálu.

Celkový útlum jednovídného a inverzního disperzního kabelu je -9 dB, jednovídné vlákno má útlum -0,25 dB/km a inverzní disperzní vlákno -0,5 dB/km. Na vstupu do filtru na konci přenosové trasy dosahuje úroveň signálu hodnoty -3,2 dBm.

Celá přenosová trasa je zakončena zesilovačem. Na jeho vstupu je úroveň signálu -6,8 dBm, vlivem ztrát -3 dB na filtru a -0,6 dB na patch kabelu. Předpokladem pro následné demultiplexování je signál o velikosti úrovně -1,5 dBm. Musíme tedy v simulaci vybrat vhodný zesilovač splňující tento požadavek.

Celkový útlum vysílací a přenosové části lze vyjádřit jako

$$A_{vys} = A_{mod} + A_{m1} + A_{m2} + A_f + 5 * A_p \quad (5.6)$$

$$A_{prn} = A_s + A_i + A_p \quad (5.7)$$

kde:

A_{vys} - celkový útlum vysílací části

A_{mod} - útlum modulátoru

A_{m1} - útlum multiplexeru vytvářející 80 Gbit/s datová tok

A_{m2} - útlum multiplexeru vytvářející 320 Gbit/s datová tok

A_f - útlum optického pásmového filtru

A_p - útlum propojovacího patch kabelu

A_{prn} - celkový útlum přenosové části

A_s - celkový útlum jednovídného optického kabelu

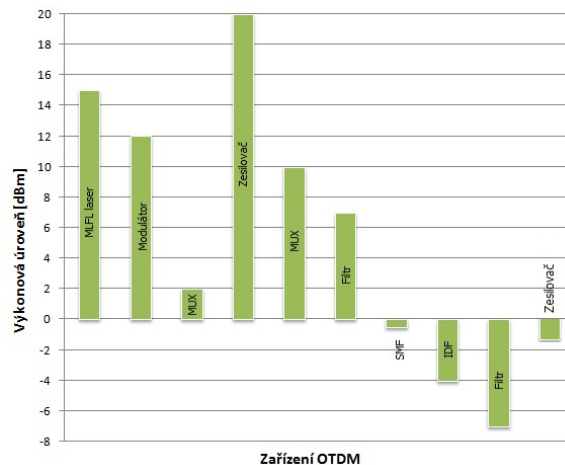
A_i - celkový útlum inverzního disperzního optického kabelu

Po dosažení hodnot útlumů jednotlivých prvků vypočítáme celkový útlum v decibelech pro vysílací i přenosovou část.

$$A_{vys} = -3 - 10 - 10 - 3 + 5 * (-0,6) = -29 \quad (5.8)$$

$$A_{prn} = 30 * (-0,25) + 3 * (-0,5) - 0,6 = -9,6 \quad (5.9)$$

Přehledně lze znázornit graficky výkonové úrovně na výstupech zařízení zahrnutých do vysílací a přenosové části.

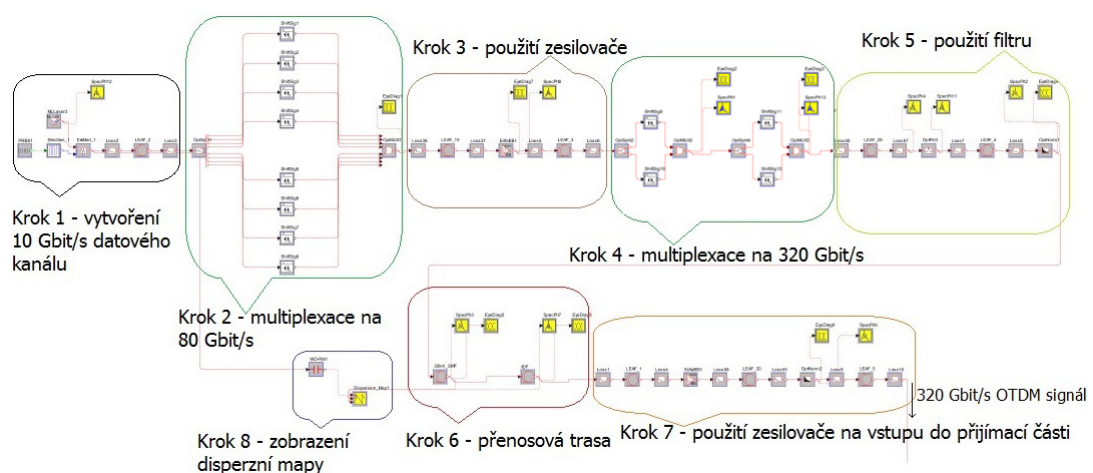


Obr. 5.10: Výkonové úrovně na výstupech jednotlivých zařízení vysílací a přenosové části OTDM

5.4 Simulace OTDM

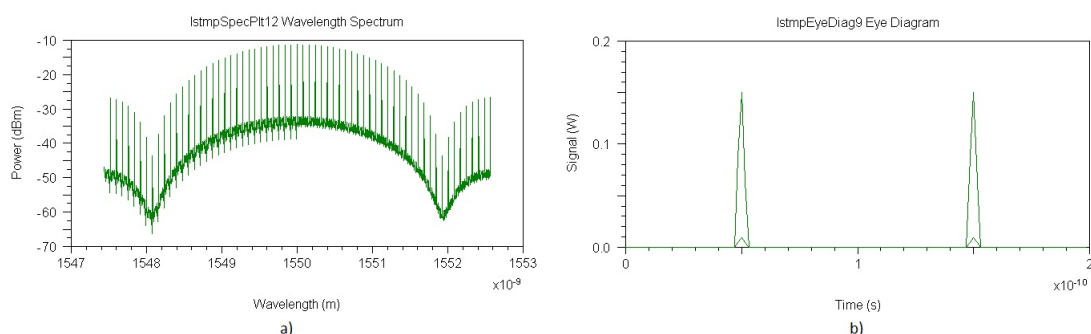
Postup sestavení 320 Gbit/s datového toku, jeho následné přenesení na vzdálenost 30 km a demultiplexování vychází z kapitoly 5.3. Díky simulaci však došlo k optimalizaci rozmístění jednotlivých prvků a ke změnám v nastavení. Tyto změny nastavení jednotlivých prvků jsou popsány v příloze A.2. Za účelem sestavení funkční simulace byla zvolena modulace 50% RZ.

5.4.1 Vysílací a přenosová část



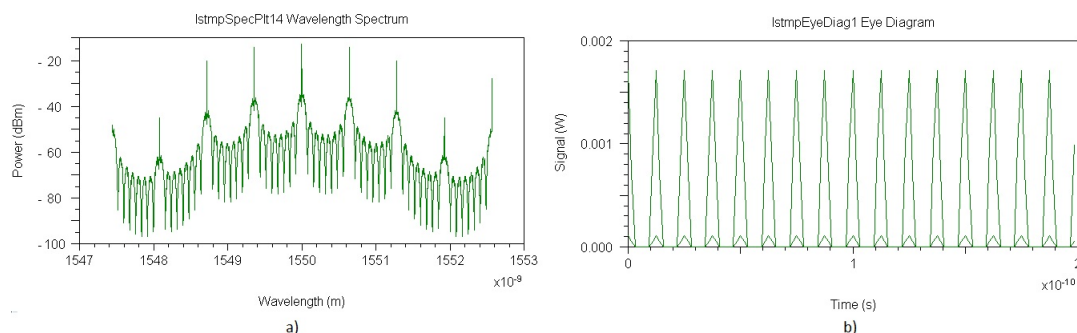
Obr. 5.11: Sestavení vysílací a přenosové části OTDM

Sestavení 10 Gbit/s datového toku zajišťuje MLFL laser o výkonu 0,30 W s centrální vlnovou délkou 1550 nm, pseudonáhodný generátor dat s datovým tokem 10 Gbit/s, elektrický generátor a modulátor.



Obr. 5.12: 10 Gbit/s signál na výstupu modulátoru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase

Propojovacím kabelem přivádíme tento namodulovaný signál do multiplexeru o celkovém útlumu -10 dB. Multiplexer je složen ze splitteru rozdělujícího vstupní signál do 8 totožných větví, ve kterých dochází ke zpoždování signálu pomocí zpožďovačů a multiplexeru slučujícího 8 signálů s rozdílnou dobou zpoždění na výstupní signál o výkonové úrovni -6,79 dBm.



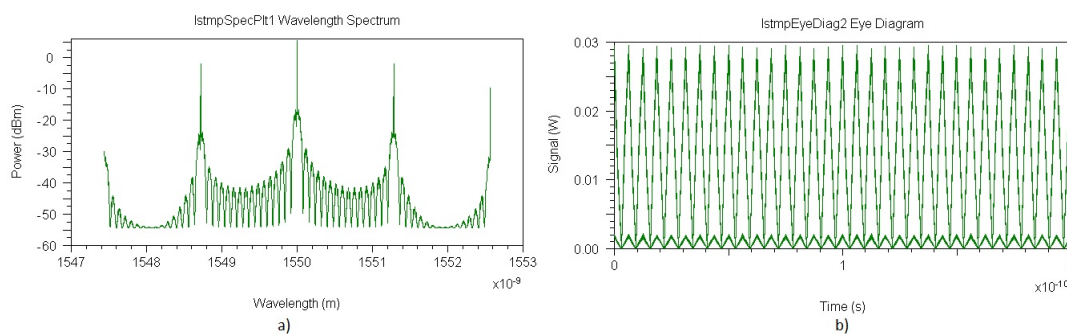
Obr. 5.13: 80 Gbit/s signál na výstupu multiplexeru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase

Multiplexovaný 80 Gbit/s signál je propojovacím kabelem připojen na zesilovač. Vybráno bylo takové zařízení, které je schopno zesílit signál nízké úrovně (v našem případě zesílení vstupní úrovně -7,20 dBm na výstupních 18,17 dBm). Díky tomuto umístění vytvoříme signál dostatečné úrovně nejen pro dokončení sestavení 320 Gbit/s datového toku, ale i pro přenos optickou trasou.

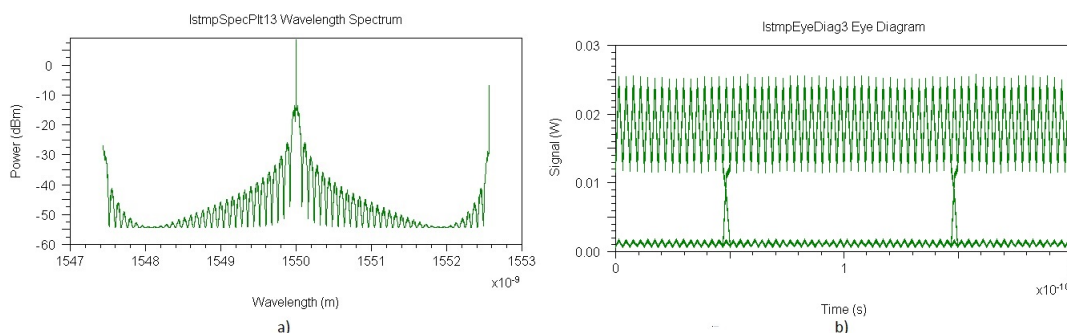
Následuje multiplexování signálu z 80 Gbit/s na 320 Gbit/s. Postup je podobný jako u předchozího multiplexování. Využit je splitter rozdělující 80 Gbit/s signál do

2 totožných větví, na jedné dojde k časovému zpoždění o 6,25 ps, druhá zůstane beze změny. Sloučením těchto 2 větví dosáhneme datového toku 160 Gbit/s. Celý proces je znovu opakován, nastaven je ovšem časový posun 3,13 ps, a tím je vytvořen 320 Gbit/s výsledný datový tok.

Předpokládáme, že celkový útlum vzniklý při multiplexování je -10 dB. Na výstupu multiplexeru je signál o výkonové úrovni 9,51 dBm.



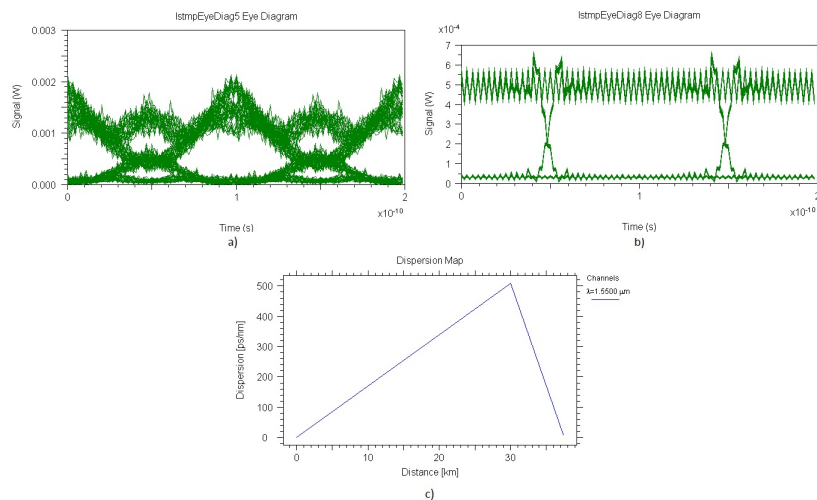
Obr. 5.14: 160 Gbit/s signál na výstupu multiplexeru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase



Obr. 5.15: 320 Gbit/s signál na výstupu multiplexeru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase

Před navázáním signálu 320 Gbit/s do optického vlákna by měl být aplikován optický pásmový filtr. Velikost filtru byla v návodu zvolena na hodnotu 5 nm, v simulaci je jeho nastavení upraveno na 4 nm, čímž zároveň splníme podmínku nastavení velikosti filtru v závislosti na době trvání impulsu, definovanou v příloze A.1. Za optický pásmový filtr je umístěn optický výkonový normalizér vyrovnávající výkonovou úroveň na hodnotu 5 dBm.

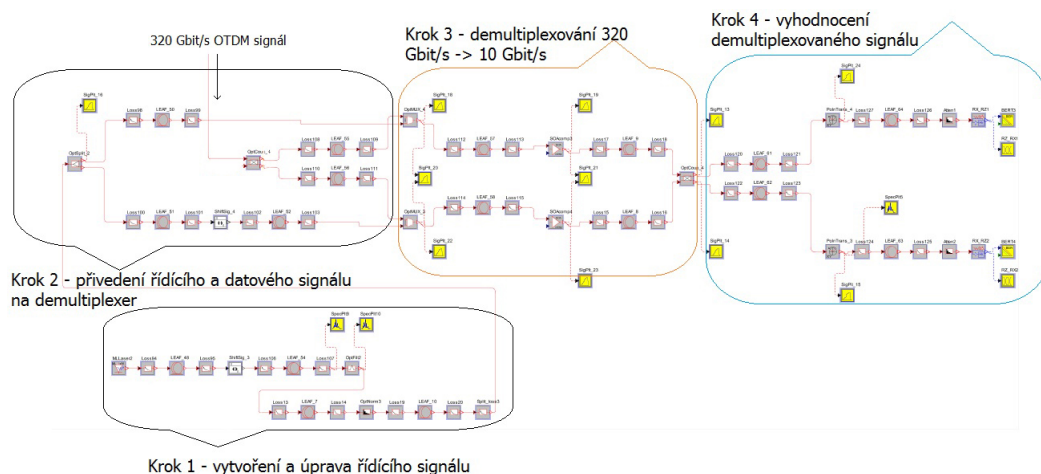
Signál výkonové úrovně 5 dBm je navázán do přenosové trasy složené z jednovidového optického vlákna o délce 30 km a inverzního disperzního vlákna o délce 7,4 km.



Obr. 5.16: a) výstupní signál po 30 km, b) výstupní signál z IDF, c) disperzní mapa

Za přenosovou trasu, respektive za inverzní disperzní vlákno, je připojen zesilovač zesilující -6,60 dBm vstupní signál na 4,94 dBm výstupní signál dostatečné úrovně pro demultiplexování. Následně průchodem optickým výkonovým normalizérem dojde k vyrovnání úrovně signálu na hodnotu 4,5 dBm. Poté jej přivedeme na demultiplexační zařízení společně s řídicím signálem 10 GHz.

5.4.2 Přijímací část



Obr. 5.17: Vytvoření řídicího signálu a demultiplexace 320 Gbit/s datového toku, 50% RZ modulace

Řídící signál je samostatně vytvořen v přijímací části MLFL laserem, který se liší od laseru ve vysílací části nastaveným výkonem 0,1 W. Za laser je umístěna časová zpožďovací jednotka. Nastavením časového zpoždění určujeme začátek impulsu v kanálu, který chceme demultiplexovat. Druhá zpožďovací jednotka posunutá o dobu trvání impulsu (v našem případě o 3,13 ps) nám určuje konec impulsu. Tento princip je teoreticky znázorněn na obrázku 5.7.

Řídící signál ořízneme optickým pásmovým filtrem nastaveným na hodnotu 2 nm. Optickým normalizérem vyrovnáme jeho výkonovou úroveň na -4,5 dBm.

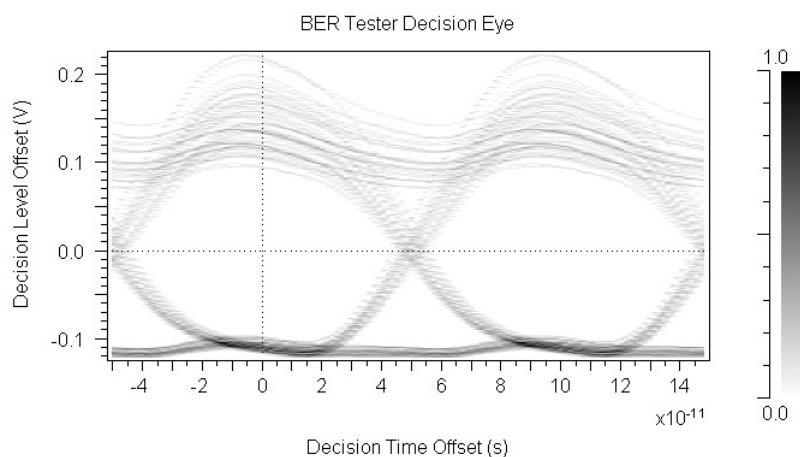
Do symetrického Mach-Zehnderova interferometru vstupuje 320 Gbit/s datový tok o výkonové úrovni -3,31 dBm a řídicí signál o velikosti úrovně -12,31 dBm.

Demultiplexovaný 10 Gbit/s signál je přiveden na polarizační kontrolér a výkonový normalizér -4 dBm, poté převeden z optického signálu na elektrický a připojen na zařízení měřící chybovost spolu s velikostí Q-faktoru.

5.4.3 Výsledky simulace

Tab. 5.1: Hodnoty bitové chybovosti a Q-faktoru přeneseného 10 Gbit/s kanálu, 50% RZ modulace

BER	BER_{lo}	BER_{hi}	Q_{dB} [dB]
$6,5463 \cdot 10^{-13}$	$8,9460 \cdot 10^{-15}$	$3,4472 \cdot 10^{-11}$	$1,7017 \cdot 10^1$



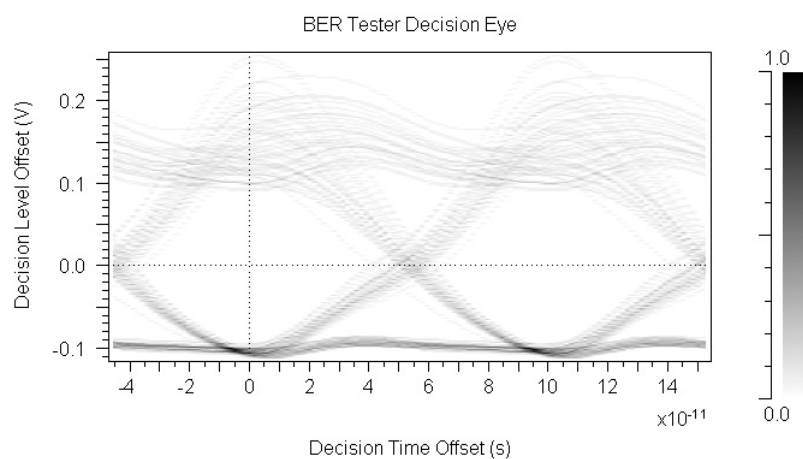
Obr. 5.18: Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, 50% RZ modulace

V přenosové části bylo využito IDF vlákno o délce 7,4 km, které není započítáno do celkové přenosové trasy vzhledem k možnosti kompenzace využitím kompenzační jednotky umístěné v přijímací části. Pokud bychom toto vlákno do simulace

nezahrnuli, vlivem disperze by došlo k částečnému zhoršení kvality přenosu. Vliv kompenzačního vlákna na kvalitu přenosu je popsán v příloze A.3.

Tab. 5.2: Hodnoty bitové chybovosti a Q-faktoru přeneseného 10 Gbit/s kanálu, 50% RZ modulace bez využití IDF

BER	BER_{lo}	BER_{hi}	Q_{dB} [dB]
$8,5408 \cdot 10^{-11}$	$1,4151 \cdot 10^{-12}$	$3,5827 \cdot 10^{-9}$	$1,6104 \cdot 10^1$



Obr. 5.19: Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, 50% RZ modulace bez využití IDF

6 VLIV MODULAČNÍCH FORMÁTŮ NA PŘENOS V OTDM

Na simulační model, který byl sestaven v předchozí kapitole, jsou testovány jednotlivé modulační formáty. Jejich vlivem dochází ke změnám parametrů, které charakterizují kvalitu přenosu. U jednotlivých modulací porovnáme spektrum signálu datového toku 320 Gbit/s, bitovou chybovost a hodnotu Q-faktoru.

Nastavení, která byla prováděna při sestavování modulátorů a demodulátorů konkrétních modulací, jsou uvedena v příloze A.2.3.

6.1 50% RZ

Modulační formát 50% RZ byl využit pro sestavení základního simulačního modelu popsaného v kapitole 5.4, ve které najdeme spektrální i časové zobrazení průchodu signálu některými jeho částmi.

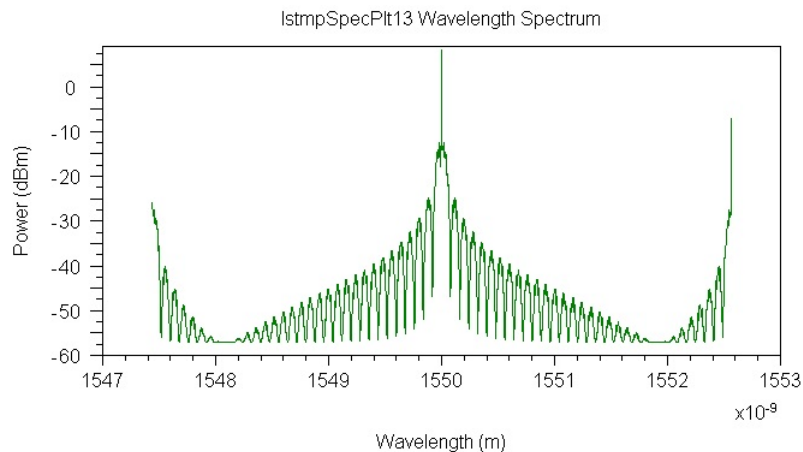
Výsledné parametry demultiplexovaného kanálu v přijímací části, které jsou vyhodnoceny zařízením měřícím chybovost přenosového systému, najdeme v tabulce 5.1 a diagram oka na obrázku 5.18.

6.2 NRZ

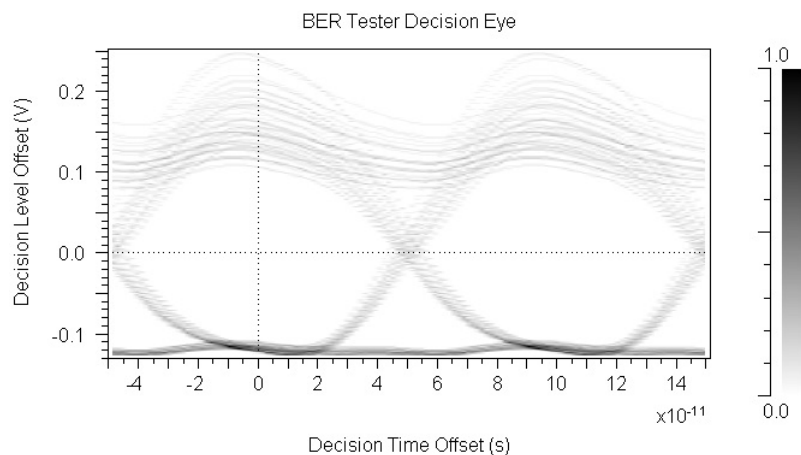
Druhou modulací, kterou aplikujeme na simulační model, je NRZ. Sestavení a modulování 10 Gbit/s datového kanálu je velmi podobné jako u modulace RZ na obrázku 5.11 krok 1. Pro simulaci byl využit model s nastavenou modulací 50% RZ, změny nastavení najdeme v příloze A.2.3.

Tab. 6.1: Hodnoty bitové chybovosti a Q-faktoru přeneseného 10 Gbit/s kanálu, NRZ modulace

BER	BER _{lo}	BER _{hi}	Q _{dB} [dB]
$2,0672 \cdot 10^{-13}$	$1,9584 \cdot 10^{-15}$	$1,5070 \cdot 10^{-11}$	$1,7208 \cdot 10^1$



Obr. 6.1: Vlnové spektrum modulace NRZ 320 Gbit/s signálu na výstupu multiplexeru

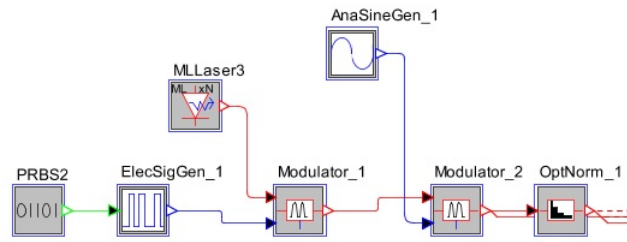


Obr. 6.2: Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, NRZ modulace

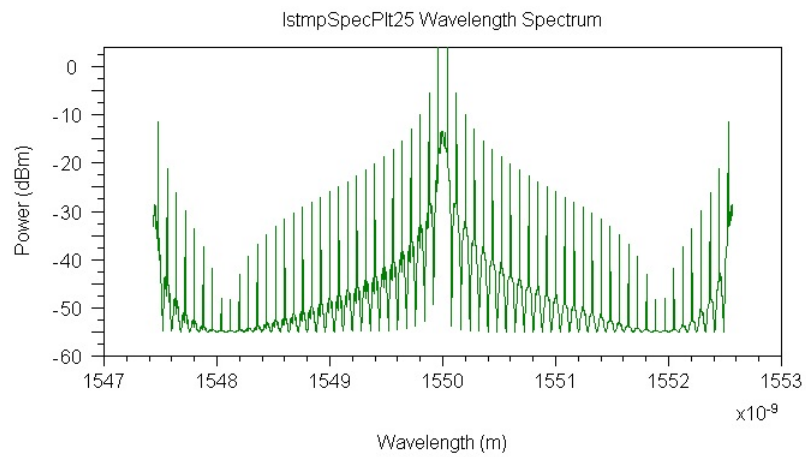
6.3 CSRZ

Třetí modulací testovanou na modelu 320 Gbit/s OTDM je CSRZ. Opět je využit model s modulací 50% RZ, u kterého je upraven modulátor. Na výstup Mach-Zehnderova modulátoru (na výstup modulace 50% RZ) je přidán druhý Mach-Zehnderův modulátor jehož elektrický vstup je připojen na analogový sinusový generátor.

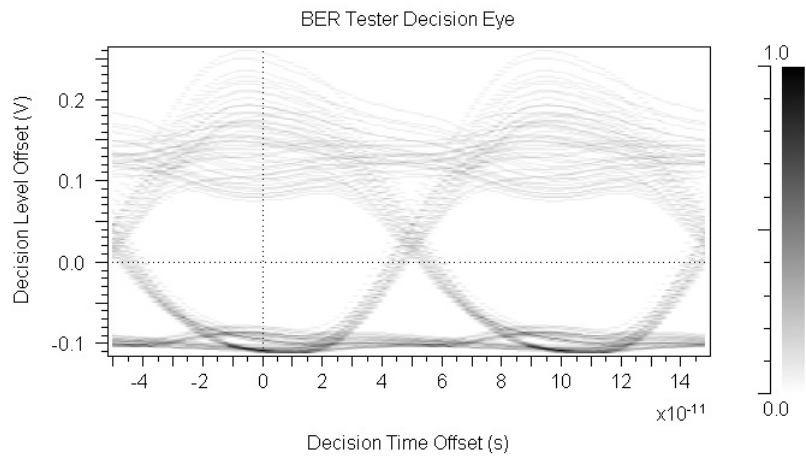
Tímto konstrukčním řešením vytvoříme CSRZ modulaci, u které optickým výkonovým normalizérem nastaveným na hodnotu 3,5 dBm vyrovnáme výkonové úrovně. Modulátor je znázorněn na obrázku 6.3, změny nastavení jsou uvedeny v příloze A.2.3.



Obr. 6.3: Modulátor CSRZ vytvářející 10 Gbit/s datový kanál



Obr. 6.4: Vlnové spektrum modulace CSRZ 320 Gbit/s signálu na výstupu multiplexeru



Obr. 6.5: Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, CSRZ modulace

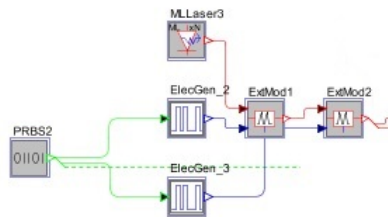
Tab. 6.2: Hodnoty bitové chybovosti a Q-faktoru přeneseného 10 Gbit/s kanálu, CSRZ modulace

BER	BER_{lo}	BER_{hi}	Q_{dB} [dB]
$2,3999 \cdot 10^{-6}$	$4,7490 \cdot 10^{-7}$	$1,0891 \cdot 10^{-5}$	$1,3205 \cdot 10^1$

6.4 CRZ

Pro vytvoření CRZ je použit model s 50% RZ modulací, u kterého je změněn typ externího modulátoru na amplitudový. Přidán je druhý elektrický generátor, jehož parametry jsou totožné jako u stávajícího, oba jsou přivedeny na pseudonáhodný generátor dat. Výstup nově vytvořeného elektrického generátoru je přiveden na fázový modulátor spolu s optickým signálem z amplitudového modulátoru.

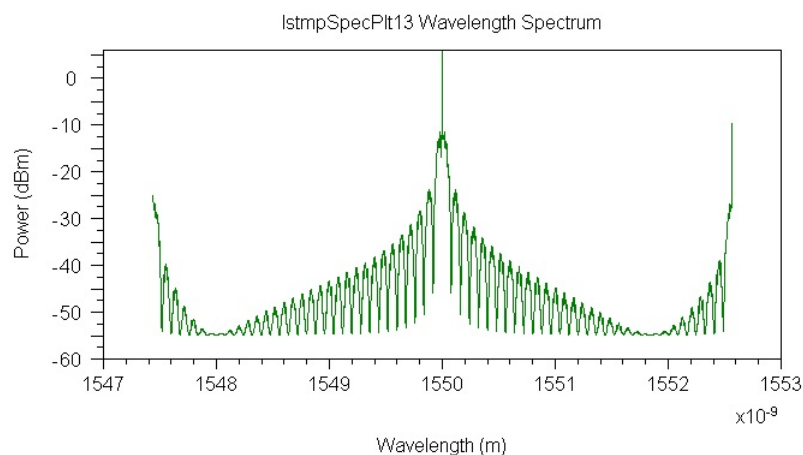
Tímto postupem je vytvořena modulace CRZ, nastavované parametry u externích modulátorů jsou uvedeny v příloze A.2.3.



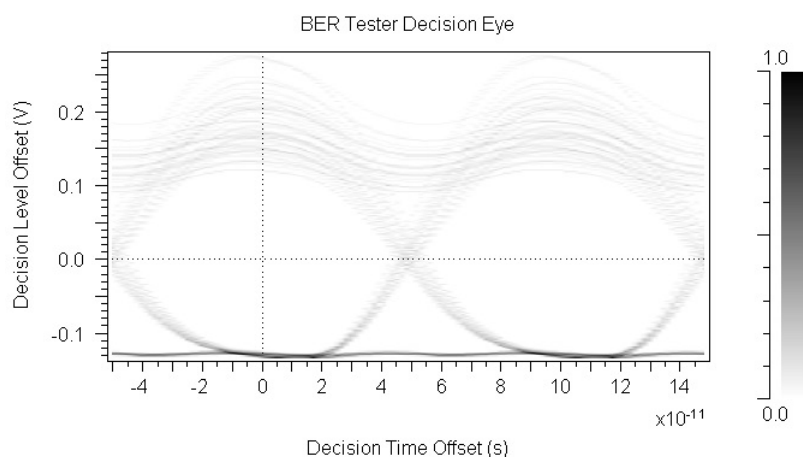
Obr. 6.6: Modulátor CRZ vytvářející 10 Gbit/s datový kanál

Tab. 6.3: Hodnoty bitové chybovosti a Q-faktoru přeneseného 10 Gbit/s kanálu, CRZ modulace

BER	BER_{lo}	BER_{hi}	Q_{dB} [dB]
$6,1728 \cdot 10^{-15}$	$2,8896 \cdot 10^{-17}$	$8,5364 \cdot 10^{-13}$	$1,7744 \cdot 10^1$



Obr. 6.7: Vlnové spektrum modulace CRZ 320 Gbit/s signálu na výstupu multiplexeru



Obr. 6.8: Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, CRZ modulace

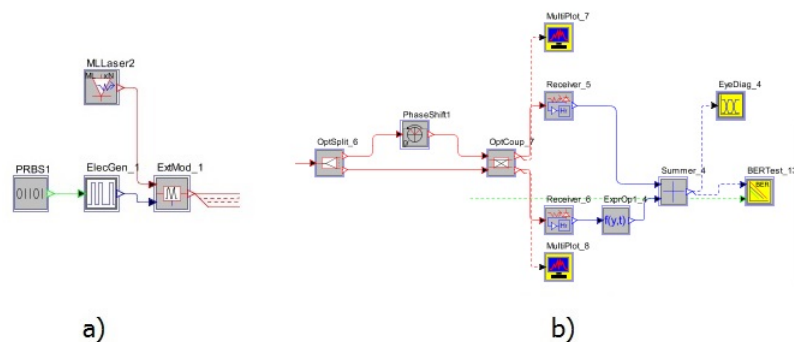
6.5 PSK

Další modulace testovaná na simulačním modelu, pracující na principu změny fáze o předem stanovenou hodnotu, je fázová modulace. Konkrétně byla zvolena diferenční binární dvoustavová fázová modulace označovaná jako DPSK nebo DBPSK. Jedná se o modulaci s posunem fáze o 180° .

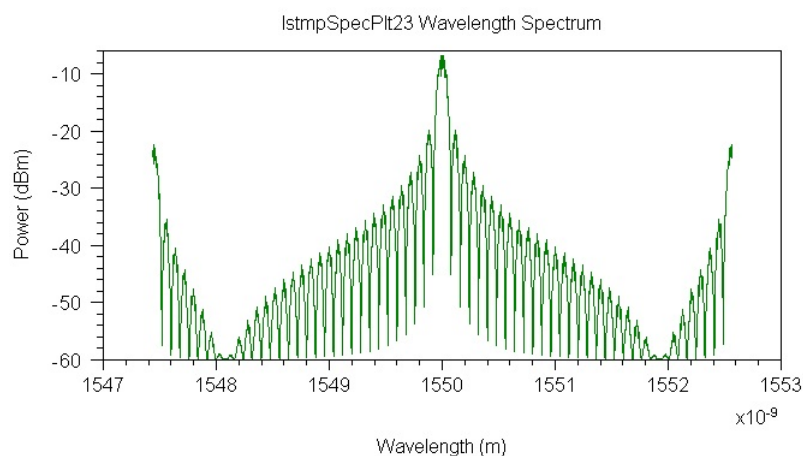
Na obrázku 6.9 je konstrukční řešení modulátoru a demodulátoru, nastavení je popsáno v příloze A.2.3 (popsány jsou změny v nastavení modelu s modulací 50% RZ).

Díky posunu fáze signálu v modulátoru je nezbytné rozdělit datový signál vstupující do demodulátoru na dvě větve. Jedna větev zůstává beze změn, druhá je po-

sumuta o stejnou hodnotu fáze, jaká byla použita v modulátoru (v našem případě 180°). Optické signály převedeme do elektrické podoby, sloučíme a vyhodnotíme zařízením měřícím chybovost.



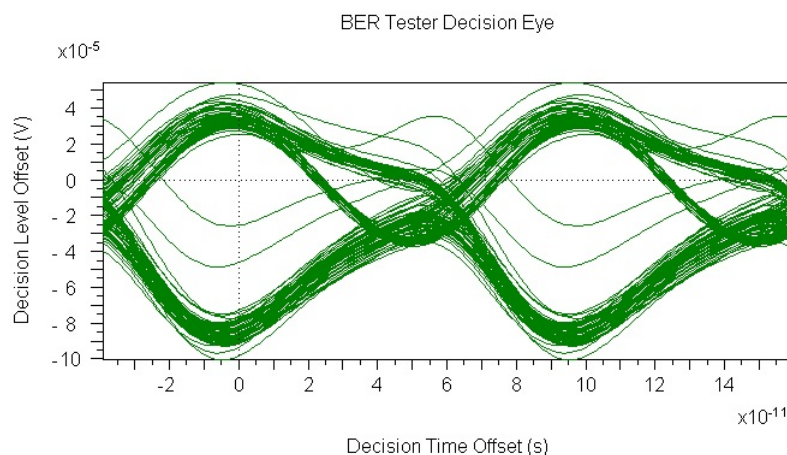
Obr. 6.9: a) DPSK modulátor, b) DPSK demodulátor



Obr. 6.10: Vlnové spektrum modulace DPSK 320 Gbit/s signálu na výstupu multiplexeru

Tab. 6.4: Hodnoty bitové chybovosti a Q-faktoru přeneseného 10 Gbit/s kanálu, DPSK modulace

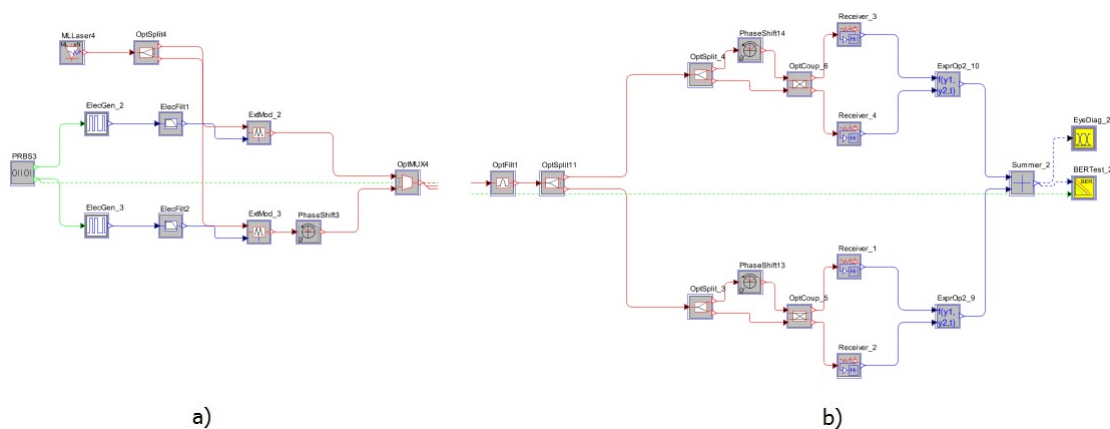
BER	BER_{lo}	BER_{hi}	Q_{dB} [dB]
$2,4467 \cdot 10^{-14}$	$9,3755 \cdot 10^{-18}$	$1,3779 \cdot 10^{-8}$	$1,7541 \cdot 10^1$



Obr. 6.11: Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, DPSK modulace

6.6 QAM

Další testovaná modulace na simulačním modelu je QAM. Konkrétně se jedná o 4QAM, tedy o čtyřstavovou modulaci, která je někdy označována jako QPSK [7].

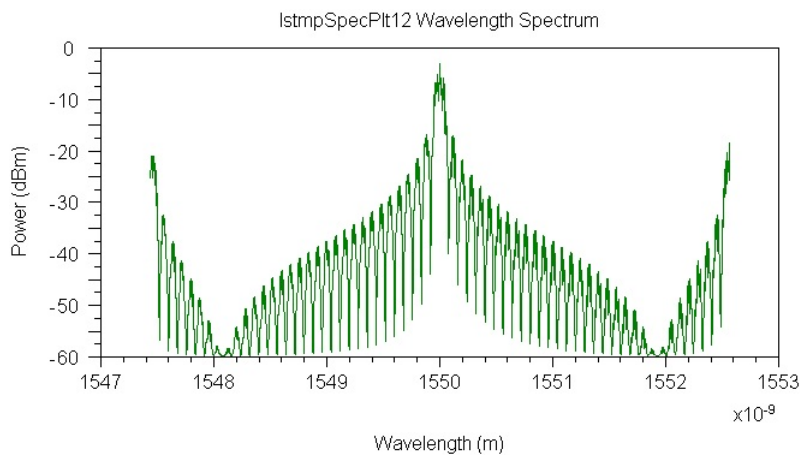


Obr. 6.12: a) 4QAM modulátor, b) 4QAM demodulátor

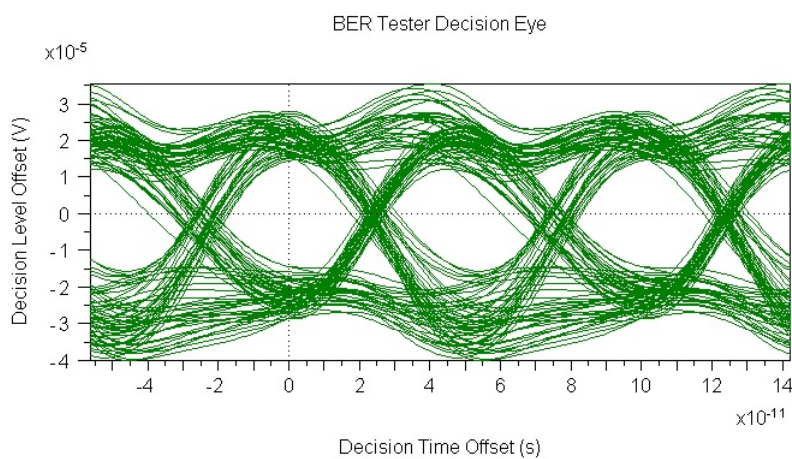
Sestavení modulátoru je technologicky náročnější proti předešlým testovaným modulacím. Využito je dvou elektrických generátorů s totožným nastavením, do kterých vstupují generovaná data z PRBS. Oba tyto elektrické signály následně prochází elektrickými filtry (opět s totožným nastavením). Následuje průchod Mach-Zehnderovými modulátory, které mají na vstupech složku optického signálu tvořenou laserem. Jeden výstup Mach-Zehnderova modulátoru je fázově posunut o 90° . Následným sloučením obou optických větví dostaneme modulovaný signál.

Struktura demodulátoru je také poněkud rozsáhlejší. Skládá se ze dvou větví, podobně realizovaným jako demodulátor DPSK, kterým předchází optický pásmový filtr. Horní větev demodulátoru obsahuje zařízení realizující fázový posun o 90° , v dolní větvi je toho zařízení nastaveno na hodnotu -90° .

Nastavení modulátoru a demodulátoru je popsáno v kapitole A.2.3.



Obr. 6.13: Vlnové spektrum modulace 4QAM 320 Gbit/s signálu na výstupu multiplexeru



Obr. 6.14: Diagram oka demultiplexovaného 10 Gbit/s kanálu, 4QAM modulace

Tab. 6.5: Hodnoty bitové chybovosti a Q-faktoru přeneseného 10 Gbit/s kanálu, 4QAM modulace

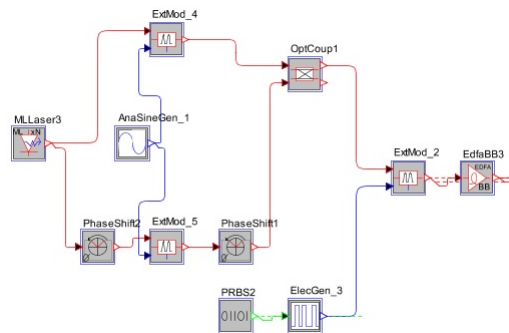
BER	BER_{lo}	BER_{hi}	Q_{dB} [dB]
$2,1192 \cdot 10^{-10}$	$1,0367 \cdot 10^{-11}$	$3,5897 \cdot 10^{-9}$	$1,5911 \cdot 10^1$

Abychom dosáhli těchto výsledků, v základním přenosovém modelu došlo k úpravě velikosti inverzního disperzního vlákna na 7,2 km. V původním nastavení (velikost IDF 7,4 km) dosahuje bitová chybovost $BER = 2,2254 \cdot 10^{-2}$.

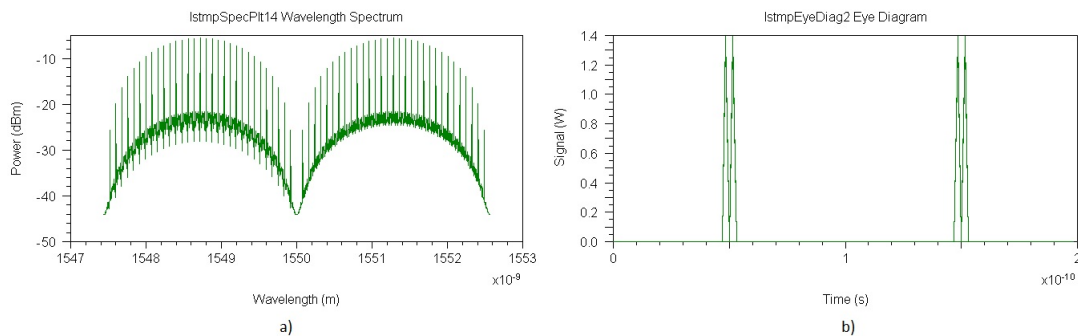
6.7 FSK

Frekvenční modulace je posledním typem testovaným na simulačním modelu. Předpokladem, dle literatury [18], by mělo být rozdělení centrálního laloku signálu ve spektrálním zobrazení na dvě části. Mezi jejími vrcholy by měla být mezera rovna dvojnásobné velikosti použitého generátoru. V simulaci je použit analogový sinusový generátor o frekvenci 10 GHz. Během sestavování modulovaného signálu by mělo dojít k opakovanému fázovému posunu vždy o -90° . Tento posun byl v simulaci realizován v dvěma optickými fázovými posuvníky.

Výkonová úroveň vykazuje na výstupu FSK modulátoru značný pokles. Z tohoto důvodu byl aplikován optický zesilovač. Nastavení modulátoru je popsáno v kapitole A.2.3.



Obr. 6.15: Modulátor FSK

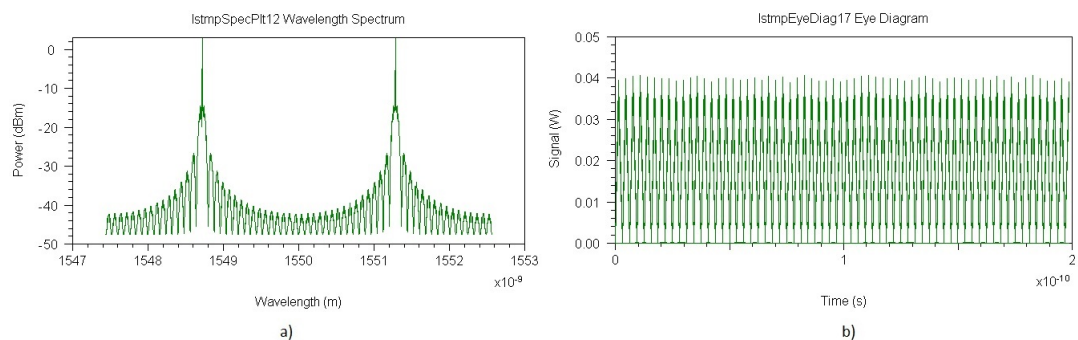


Obr. 6.16: 10 Gbit/s signál na výstupu FSK modulátoru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase

Při realizaci modulace FSK se nepodařilo nastavit modulátor, kterému by odpovídalo spektrální zobrazení výstupního signálu uvedeného v literatuře [18]. Spektrum je rozděleno na 2 totožné části, tomu odpovídá i příslušné zobrazení 10 Gbit/s modulovaného signálu v čase na obrázku 6.16.

Díky tomu došlo k nárůstu časové šířky modulovaných impulsů, v modelu nebylo možné realizovat přenos se šířkou pásma 320 Gbit/s. Jednotlivé impulsy se časově překrývaly. Tento jev by bylo možné odstranit vhodným použitím kompresního nelineárního vlákna, kterým bychom zmenšili šířku těchto impulsů v časové doméně (došlo by k nárůstu spektrální šířky).

Simulační model byl upraven pro šířku přenášeného pásma 160 Gbit/s, při které nedochází k překrývání jednotlivých impulsů.



Obr. 6.17: 160 Gbit/s signál na výstupu multiplexeru: a) zobrazení ve spektru, b) zobrazení v čase

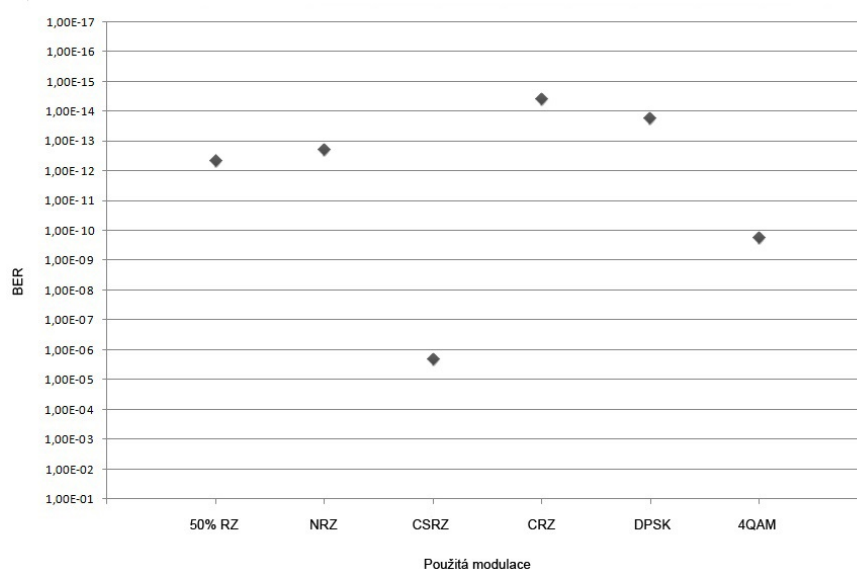
Takto sestavená modulace byla multiplexována na 160 Gbit/s, přenesena na vzdálenost 30 km a demultiplexována na původní datový kanál. Nepodařilo se sestavit vhodný demodulátor pro realizaci v programu OptSim. Nejsou tak známy

výsledné parametry kvality přenosu FSK modulace pro porovnání s ostatními modulačními formáty.

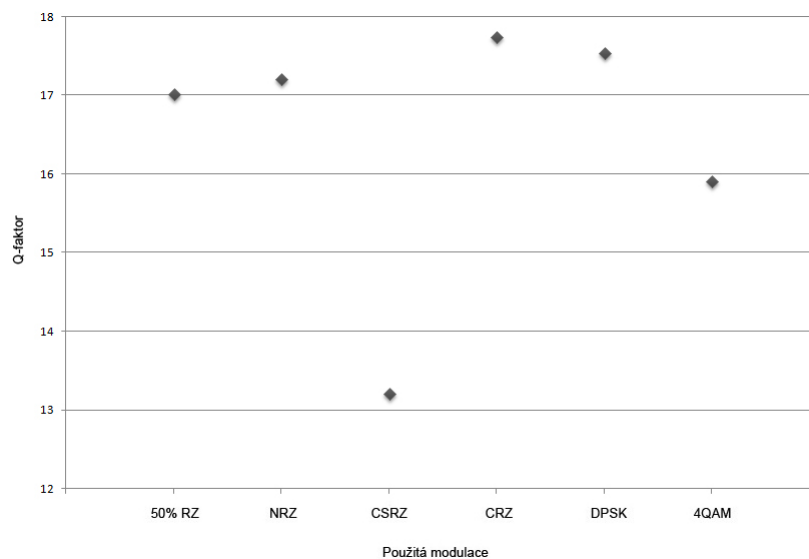
6.8 Vyhodnocení výsledků

Velmi podobných parametrů bitové chybovosti a Q-faktoru dosáhly modulace NRZ a 50% RZ, to stejné lze říci o dvojici modulačních formátů CRZ a DPSK.

Značný, téměř 50% pokles bitové chybovosti oproti ostatním testovaným modulacím (mimo FSK), vykazuje modulace CSRZ. Tento výsledek může být ovlivněn použitím MLFL laseru, neboť simulace ve stejném programu podle literatury [26] potvrzuje také nevyhovující výstupní parametry této modulace s využitím MLFL. Jedná se ovšem o přenos se šířkou pásma 160 Gbit/s.



Obr. 6.18: Porovnání bitové chybovosti u testovaných modulačních formátů



Obr. 6.19: Porovnání velikosti Q-faktoru u testovaných modulačních formátů

Vhodným předpokladem pro další testování modulačních formátů je aplikace vícecestavových modulací. Parametry simulované 4QAM modulace odpovídají perspektivnímu předpokladu pro aplikaci na technologii OTDM.

Obecně na přenos 1 bitu je potřeba dvou stavů (logické 1 a logické 0). 4 stavová modulace (4QAM) přenáší v jednom symbolu 2 bity ($2^2 = 4$ stavy). Aplikací vícecestavových modulací lze efektivněji využívat šířku pásma a navyšovat přenosovou rychlost. Protikladem je složitější identifikace přenášených symbolů a zvyšování nároků na kvalitu přenosu signálu.

7 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo prozkoumat možnosti optických sítí založených na technologii OTDM, se kterými souvisí také seznámení s jevy vyskytujícími se v těchto sítích. Popsány byly dva základní druhy optických vláken a technologie slučování kanálu. Dále jsou v samostatné kapitole shrnuty nejpoužívanější digitální modulační formáty. Zejména ty, které budou testovány simulačním programem.

Práce popisuje jednotlivé síťové prvky, používané v OTDM se šířkou pásma 320 Gbit/s. Navržen je model tohoto přenosového systému na vzdálenost 30 km. Tímto máme kompletní teoretický předpoklad pro následnou simulaci modelu realizovanou v programu OptSim.

Výsledkem je simulační model obsahující ve svém základu modulaci 50% RZ. Tato modulace, respektive modulátor a demodulátor simulačního modelu jsou měněny podle aktuálně testovaných modulací.

Na tomto modelu jsou postupně testovány modulace 50% RZ (výsledek je součástí odsimulovaného základního modelu), NRZ, CSRZ, CRZ, DPSK, 4QAM a FSK. Uvedeny jsou nastavení a prováděné změny v jednotlivých simulacích. Zobrazeno je vždy spektrum jednotlivé modulace po průchodu multiplexerem vytvářejícím 320 Gbit/s datový tok, diagram oka a hodnoty BER spolu s hodnotou Q-faktoru.

U modulace FSK se nepovedlo realizovat šířku pásma 320 Gbit/s a demodulační část. Vzhledem k tomu není výsledkově zahrnuta mezi ostatní modulační formáty.

Modulace s velmi vhodnými parametry pro aplikaci na OTDM se šířkou pásma 320 Gbit/s jsou 50% RZ, NRZ, CRZ, DPSK a 4QAM. Nevhodné je nasazení modulačního formátu CSRZ v závislosti na vysoké bitové chybovosti.

Jako velmi perspektivní se jeví nasazení vícecestavových modulací, případně nasazení kombinací základních modulací společně s vícecestavovými (16 RZ/QAM) [13]. Bakalářská práce, respektive simulační model, by mohl sloužit jako základ pro testování vícecestavových modulací.

LITERATURA

- [1] ARMSTRONG, Jean. OFDM for Optical Communications. Journal of Lightwave Technology [online]. 2009, vol. 27, issue 3, s. 189-204 [cit. 2012-10-18]. DOI: 10.1109/JLT.2008.2010061.
- [2] BALADA, Radek. KLASIFIKACE TYPU DIGITÁLNÍ MODULACE [online]. Brno, 2010 [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27173>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. KAREL POVALAČ.
- [3] BĚLOHLÁVEK, Jiří. Návrh typu modulace pro prostředí s rušením: Modulation technique design for radio channels with interference [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009 [cit. 2013-03-04]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15667>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [4] BOHÁČ, Leoš. Disperze optických vláken. In: [online]. Praha [cit. 18.10.2012]. Dostupné z:<http://students.math.slu.cz/jakubchovanec/skola/PCsit/Dalsi/5_prednaska.pdf>
- [5] ČECH, Martin. OPTICKÉ ZESILOVAČE PRO METROPOLITNÍ A PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ [online]. Brno, 2011 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z:<https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39582> . DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. VLADIMÍR TEJKAL.
- [6] DOROCIÁK, Petr. Vliv polarizační disperze na chybovost optického kanálu: The impact of polarization mode dispersion on error-rate of optical fibre link [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008 [cit. 2013-05-02]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z:<<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/18751/Vliv%20polariza%C4%8Dn%C3%AD%20disperze%20na%20chybovost%20optick%C3%A9ho%20kan%C3%A1lu.pdf?sequence=1.Diplomovápráce.VysokéučenítechnickévBrně>> .
- [7] DUFFEK, Luděk. Modulátor QAM: QAM Modulator [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

- 2008 [cit. 2013-03-04]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4927>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. RADIM ČÍŽ.
- [8] FILIP, Tomáš. Disperzní vlivy na vysokorychlostní přenos optickou sítí: Dispersion effects in high-speed optical networks [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010 [cit. 2012-11-28]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30404>. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Vladimír Tejkal.
- [9] FILKA, Miloslav. Přenosová média [online]. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav telekomunikací, 2012, 202 s. ISBN 978-80-214-4444-7.
- [10] HANGZHOU HUATAI OPTIC TECH. CO., LTD. Hangzhou Huatai Optic Tech. CO., LTD [online]. Hangzhou, China, 2006-2007 [cit. 2013-05-2]. Dostupné z: <<http://www.catvworld.net/products/index.htm>>
- [11] HANSEN MULVAD, H.C., L.K. OXENLOWE, M. GALILI, A.T. CLAUSEN, L. GRÜNER-NIELSEN a P. JEPPESEN. 1.28 Tbit/s single-polarisation serial OOK optical data generation and demultiplexing. Electronics Letters [online]. 2009, vol. 45, issue 5, s. 280- [cit. 2012-11-01]. DOI: 10.1049/el:20090206. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4796365&contentType=Journals+%26+Magazines&queryText%3D1.28+Tbit%2Fs+single-polarisation+serial+OOK+optical+data+generation+and+demultiplexing>>
- [12] HELÁN, Radek. Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur: Modelling and Optimization of Complex Fiber Diffractive Structures [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009 [cit. 2013-03-13]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18905>. DOKTORSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. Ing. FRANTIŠEK URBAN, CSc.
- [13] HIROOKA, Toshihiko, M NAKAZAWA, M YOSHIDA, K KASAI, P GUAN a T HIRANO. Recent progress on OTDM Terabit/s transmission

- and their future [online]. Japan, Tokohu University, 2010[cit. 2012-10-02]. ISBN 978-155-7528-841. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5465720&contentType=Conference+Publications&queryText%3DRecent+Progress+on+OTDM+Terabit%2Fs>>
- [14] Hu, H.; Munster, P.; Palushani, E.; Galili, M.; Dalgaard, K.; Mulvad, H.C.H.; Jeppesen, P.; Oxenlowe, L.K.; , "640 Gbaud NRZ-OOK data signal generation and 1.19 Tbit/s PDM-NRZ-OOK field trial transmission,"Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference , vol., no., pp.1-3, 4-8 March 2012
 - [15] ITU-T Recommendation G.657. ITU-T G.657: SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Geneva - Switzerland: International Telecommunication Union, 2007. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.657/en>>.
 - [16] ITU-T Recommendation G.694.1. ITU-T G.694.1: SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Geneva - Switzerland: International Telecommunication Union, 2002. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-200206-S/en>>.
 - [17] ITU-T Recommendation G.694.2. ITU-T G.694.2: SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Geneva - Switzerland: International Telecommunication Union, 2004. Dostupné z: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2/>>.
 - [18] KAWANISHI, T., K. HIGUMA, T. FUJITA, J. ICHIKAWA, S. SHINADA, T. SAKAMOTO a M. IZUTSU. 10Gbit/s FSK transmission over 95 km SMF using an external optical FSK modulator. The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004 [online]. IEEE, 2004, s. 609-610 [cit. 2013-05-15]. DOI: 10.1109/LEOS.2004.1363386. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1363386>>.
 - [19] KROH, Marcel. Semiconductor Mode-Locked Laser for High-Speed OTDM Transmission [online]. Berlin, 2006 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2006/1268/pdf/kroh_marcel.pdf>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Elektrotechnik und Informatik der Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades. Vedoucí práce Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. H. Boche.

- [20] LIXIN XU, L.K.F. LUI, P.K.A. WAI, H.Y. TAM a M.S. DEMOKAN. 10 GHz actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser using electro-absorption modulator and a linear optical amplifier. 2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference [online]. IEEE, 2006, 3 pp.- [cit. 2013-03-13]. DOI: 10.1109/OFC.2006.215511. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1636542>>
- [21] ROMAN, Maňák. Proč je obloha modrá a ne fialová?: ... aneb Rayleighův a Mieův rozptyl. In: Česká astronomická společnost [online]. 2012, 2012-05-15 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <<http://www.astro.cz/clanek/5165>>
- [22] MARŠÁLEK, Leoš. Optická vlákna: verze 2.1.3. In: Optická vlákna [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <<http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>
- [23] MLEJNEK, Zbyněk. Optické zesilovače: Optical Amplifiers [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008 [cit. 2013-03-14]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8652>. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [24] MOLLIER, Pascal. Lithium niobate modulators for fiber optic communications systems.[online]. Veracruz, Mexico, 2003 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: <<http://www-elec.inaoep.mx/cidcsver/spanish/magistrales/presentacion.pdf>>.
- [25] MULVAD, H.C. Hansen, E. TANGDIONGGA, O. RAZ, J. HERRERA, H. DE WAARDT a H.J.S DORREN. 640 Gbit/s OTDM Lab-Transmission and 320 Gbit/s Field-Transmission with SOA-based Clock Recovery. OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference [online]. IEEE, 2008, s. 1-3 [cit. 2012-11-01]. DOI: 10.1109/OFC.2008.4528768. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4528768>>
- [26] MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R.; TEJKAL, V.; FILKA, M. The Influence of Binary Modulations in OTDM Networks. In Research in Telecommunication Technologies. Žilina: University of Žilina, 2012. s. 193-196. ISBN: 978-80-554-0569-8.
- [27] NĚMEČEK, Ivo. Architektury a technologie v moderních optických DWDM sítích 2/2. In: Nezávislý odborný on-line magazín netguru [online]. [cit.

- 2012-11-04]. Dostupné z: <<http://www.netguru.cz/odborne-clanky/architektury-a-technologie-v-modernich-optickych-dwdm-sitich-22.html>>
- [28] PETERKA, Jiří. Datové přenosy v bezdrátových sítích. In: EArchiv.cz: archiv článků a přednášek Jiřího Peterky [online]. 2001 [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <<http://www.earchiv.cz/b01/b1100011.php3>>.
- [29] PETERKA, Jiří. Multiplexování. In: EArchiv.cz: archiv článků a přednášek Jiřího Peterky [online]. 1996-12-17 [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <<http://www.earchiv.cz/a96/a651k150.php3>>.
- [30] PETERKA, Pavel. Vlákňové lasery: Jasně světlo ze skleněných nitek. In: [online]. [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <<http://www.ufe.cz/~peterka/novehrady/vlaknovelasery.pdf>>.
- [31] RSOFTECH DESIGN GROUP, Inc. OptSim: Application Notes and Examples. Ossining, New York, 2010.
- [32] RSOFTECH DESIGN GROUP, Inc. OptSim Models Reference: Volume II Block Mode. Ossining, New York, 2010.
- [33] SHIN SOO, Dong. Electroabsorption Modulators: Their Mechanisms. In: ELECTROABSORPTION MODULATORS HOME PAGE [online]. 2000-01-02, 2001-01-02 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <<http://www.oocities.org/electroabsorption/eam/mechanism.html>>.
- [34] Takara, H.; Uchiyama, K.; Shake, I.; Morioka, T.; , "Ultra-high speed OTDM transmission systems and sub-systems," Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO '01. Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on , vol., no., pp.526-527, 2001
- [35] THORLABS. Thorlabs: Lithium Niobate Modulators [online]. Newton, New Jersey, USA: Thorlabs Inc, 2013 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918>.
- [36] ŤUPA, Martin. POLARIZAENÍ VÍDOVÁ DISPERZE (PMD) [online]. Brno, 2011 [cit. 2013-02-27]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37634>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce prof. Ing. MILOSLAV
- [37] U2T PHOTONIC, Datasheet. Four stage OTDM Multiplexer: OMUX-4-160/640. In: [online]. u2t Photonic AG Berlin Germany [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.i-waveco.com/category/pdf/5006-OMUX_4.pdf>.

- [38] YTTERBIUM-DOPED FIBER AMPLIFIER, Datasheet. YDFA (Ytterbium-doped fiber amplifier) series. In: [online]. QGLex Inc Ottawa Canada [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <<http://qglexinc.com/YDFA%20Optical%20Fiber%20Amplifier%201%20Micron%20SC%20R4.pdf>>.
- [39] ŽÁČEK, Martin. Nelineární charakter optického prostředí [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008 [cit. 2012-10-25]. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7994>. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Jiří Přinosil.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ASK	Amplitude-Shift Keying - Amplitudové klíčování
BER	Bit Error Rate - Bitová chybovost
BPF	Optical Bandpass Filter - Optický pásmový filtr
CD	Chromatic Dispersion - Chromatická disperze
CDMA	Code Division Multiple Access - Kódový multiplex
CRZ	Chirped-return-to-zero - RZ modulace s kmitočtovým rozmítáním
CSRZ	Carrier-suppressed-return-to-zero - Druh RZ modulace
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing - Hrubý vlnový multiplex
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying - Diferenční dvoustavové fázové klíčování
DEMUX	Demultiplexing - Demultiplexování
DF-HNLF	Dispersion Flattened - High Nonlinear Optical Fibre - Vysoce nelineární optické vlákno s nulovou disperzí
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift - Diferenční kvadrurní fázové klíčování
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing - Hustý vlnový multiplex
EAM	Electroabsorption Modulator - Elektroabsorpční modulátor
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier - Erbiem dotovaný optický zesilovač
ETDM	Electrical Time Division Multiplexing - Elektrický časový multiplex
FDM	Frequency Division Multiplexing - Frekvenční multiplex
FFT	Fast Fourier Transform - Rychlá Fourierova transformace
FSK	Frequency Shift Keying - Frekvenční klíčování
FWHM	Full Width at Half Maximum - Celá šířka v polovině impulsu
FWM	Four Wave Mixing - Čtyřvlnné směšování
HNLF	High Nonlinear Optical Fibre - Vysoce nelineární optické vlákno

IDF Inverse Dispersion Fiber - Inversní dispersní optické vlákno

ITU International Telecommunication Union - Mezinárodní telekomunikační unie

LiNbO₃ Lithium Niobate - Lithium Niobate

MLFL Mode-Locked Fiber Laser - M-L optický laser

MUX Multiplexing - Multiplexování

MZM Mach-Zehnder Modulator - Mach-Zehnderův modulátor

NOLM Nonlinear Optical Loop Mirror - Nelineární optické smyčkové zrcadlo

NRZ Non-return-to-zero - Modulace bez návratu k nule

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením

OOK On-off keying - Modulace zapnuto-vypnuto typu ASK

OTDM Optical Time Division Multiplexing - Optický časový multiplex

PC Polarisation Controller - Polarizační kontrolér

PMD Polarisation Mode Dispersion - Polarizační vidová disperze

PRBS Pseudorandom Binary Sequence - Pseudonáhodná binární posloupnost

PSK Phase Shift Keying - Fázová modulace

QAM Quadrature Amplitude Modulation - Kvadrurní amplitudová modulace

RZ Return-to-zero - Modulace s návratem k nule

SBS Stimulated Brillouin Scattering - Stimulovaný Brilluinův rozptyl

SMZ Symmetric Mach-Zehnder Interferometer - Symetrický Mach-Zehnderův interferometr

SNR Signal to Noise Ratio - Odstup signálu od šumu

SOA Semiconductor Optical Amplifier - Polovodičový optický zesilovač

SPM Self-Phase Modulation - Vlastní fázová modulace

SRS Stimulated Raman Scattering - Stimulovaný Ramanův rozptyl

TDM Time Division Multiplexing - Časový multiplex

TOAD Tera-hertz Optical Asymmetric Demultiplexer - THz optická asymetrická demultiplexace

WDM Wavelength Division Multiplex - Křížová modulace

W-CDMA Wideband CDMA - Širokopásmový vícenásobný přístup s kódovým dělením

XPM Cross-Phase Modulation - Křížová modulace

SEZNAM PŘÍLOH

A Příloha 1	78
A.1 Limitní hodnoty spektrální šíře impulsu vzhledem k době jeho trvání	78
A.2 Nastavení simulace s modulací 50% RZ	79
A.2.1 Vysílací a přenosová část	79
A.2.2 Přijímací část	81
A.2.3 Nastavení jednotlivých modulací	83
A.2.4 Popis nastavovaných parametrů	88
A.3 Vliv IDF na kvalitu přenosu	89
B Příloha 2	91
B.1 Obsah přiloženého CD	91

A PŘÍLOHA 1

A.1 Limitní hodnoty spektrální šíře impulsu vzhledem k době jeho trvání

Pokud pracujeme s časově úzkými impulsy, musíme se řídit pravidlem určujícím minimální dovolené hodnoty ořezu spektra těchto impulsů. V literatuře [19] je tento vztah popsán matematickým vzorcem

$$K = \frac{\Delta\tau \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2} \cdot c_0 \quad (\text{A.1})$$

kde $K = \Delta\nu \cdot \Delta t$, $\Delta\nu$ je spektrální šířka vyzářeného impulsu v polovině jeho maxima [nm], Δt časová šířka vyzářeného impulsu v polovině jeho maxima [ps], K je produkt časového trvání impulsu a spektrální šířky, $\Delta\tau$ časová šířka zkoumaného impulsu v polovině jeho maxima [ps], $\Delta\lambda$ spektrální šířka zkoumaného impulsu v polovině jeho maxima [nm], λ použitá vlnová délka [nm], c_0 rychlost světla ve vakuu $2.99792458 \cdot 10^8$ m/s. Hodnota K se liší v závislosti na použité technologii vyzáření impulsů, pro Gaussův tvar $K = 0,4413$ [19].

Vzorec A.1 lze snadno upravit pro výpočet limitní hodnoty šířky spektra impulsu v celé šíři polovině jeho maxima.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cdot K}{\Delta\tau \cdot c_0} \quad (\text{A.2})$$

Hodnoty $\Delta\lambda$ v závislosti na velikosti $\Delta\tau$ jsou uvedeny v tabulce A.1.

Tab. A.1: Velikosti spektra impulsů v závislosti na době jejich trvání, udáváno v FWHM

Doba trvání impulsu [ps]	Limitní hodnota velikosti spektra [nm]
3,5	1,01
3,0	1,18
2,5	1,41
2,0	1,77
1,5	2,36
1,0	3,54
0,5	7,07

A.2 Nastavení simulace s modulací 50% RZ

Nastavení modelu je rozděleno do 2 část podle popisu simulace v kapitole 5.4. Uvedeny jsou parametry, které jsou úpravou výchozího nastavení jednotlivých prvků. Jejich kompletní nastavení najdeme v manuálových stránkách programu OptSim, viz literatura [32].

A.2.1 Vysílací a přenosová část

Popis nastavení vychází z jednotlivých kroků sestavení a přenesení datového toku na obrázku 5.11.

Krok 1

Tab. A.2: Nastavení modulátoru 50% RZ

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
MLFL	type	supGaussian	-
	peakPower	0,3	W
	width	$3,13 \cdot 10^{-12}$	s
	pointsPerBit	6	2^x_bits
	riseTime	$1,00 \cdot 10^{-12}$	sec
PRBS	shift	32	bits
	preBits	5	bits
	postBits	3	bits
ElectGen	driveType	raisedCosine	-
	modulationType	RZ	-
	pointsPerBit	6	2^x_bits
ExtMod	onOffRatio	15	dB

Krok 2

Tab. A.3: Nastavení multiplexeru $10 \rightarrow 80$ Gbit/s

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
ShiftSig	shiftType	timeShift	-
	timeShift	$1,25 \cdot 10^{-11} * n$	s
OptMux	Representation	SingleBand	-
	loss	10	dB

Hodnota n u časové zpožďovací jednotky nabývá velikosti od 0 do 7, podle konkrétně nastavovaného zařízení. V kroku 4 nabývá tato hodnota velikosti 0 nebo 1.

Krok 3

Tab. A.4: Nastavení zesilovače ve vysílací části

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
EDFA	Psat	20	dB

Krok 4

Tab. A.5: Nastavení multiplexeru $80 \rightarrow 320$ Gbit/s

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka	Umístění
ShiftSig	shiftType	timeShift	-	
	timeShift	$6,25 \cdot 10^{-12} * n$	s	MUX 80 - 160 Gbit/s
	timeShift	$3,13 \cdot 10^{-12} * n$	s	MUX 160 - 320 Gbit/s
OptMux	Representation	SingleBand	-	
	loss	10	dB	MUX 80 - 160 Gbit/s
	loss	0	dB	MUX 160 - 320 Gbit/s

Nastavení útlumu u optického multiplexeru vytvářejícího 160 - 320 Gbit/s datový tok je nastavena na 0 dB, neboť celkový útlum -10 dB multiplexeru 80 -320 Gbit/s byl zahrnut do nastavení multiplexeru 80 - 160 Gbit/s. Principiálně je toto zařízení bráno jako celek (s celkovým útlumem -10 dB), programově je řešeno ve dvou krocích multiplexace. Hodnota útlumu je převzata z poznatků o reálných parametrech multiplexeru 160 Gbit/s a 640 Gbit/s, uvedeného v literatuře [37].

Krok 5

Tab. A.6: Nastavení filtru a výkonového opt. normalizéru

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
OptFilt	loss	3	dB
	BW	4	nm
OptNorm	AvePowerOut	5	dBm

Krok 6

V kroku 6 jsou nastaveny parametry jednojádrového optického vlákna a inverzního disperzního vlákna. Hodnoty nastavení jsou uvedeny v příloze A.3.

Krok 7

Tab. A.7: Nastavení zesilovače a výkonového opt. normalizéru

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
EDFA	Psat	5	dB
OptNorm	AvePowerOut	4,5	dBm

Krok 8

V tomto kroku je pouze definován počet vstupů pro měření disperzní mapy a jednotlivé vstupy připojeny za multiplexer, 30 km přenosovou trasu a za inverzní disperzní vlákno.

A.2.2 Přijímací část

Popis nastavení vychází z jednotlivých kroků na obrázku 5.17. Jedná se o sestavení řídicího signálu, demultiplexování a demodulování signálu.

Krok 1

Tab. A.8: Nastavení řídicího signálu

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
MLFL	type	supGaussian	-
	peakPower	0,1	W
	width	$3,13 \cdot 10^{-12}$	s
	pointsPerBit	6	2^x_bits
	riseTime	$1,00 \cdot 10^{-12}$	sec
OptFilt	loss	3	dB
	BW	2	nm
OptNorm	AvePowerOut	-4,5	dBm
Splitloss	attenuation	-3,6	dB

Krok 2

Tab. A.9: Nastavení řídicího signálu druhá část

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
ShiftSig	shiftType	timeShift	-
	timeShift	$3,13 \cdot 10^{-12}$	s
OptCoup	loss	4	dB

Za optický splitter rozdělující řídicí signál do 2 větví je vložen přídatný útlum. Jedná se o zvýšení útlumu o hodnotu propojovacího kabelu v horní větvi, který je v dolní větvi použit dvakrát (pro propojení s časovou zpožďovací jednotkou). Dosáhneme tak stejné hodnoty výkonové úrovně řídicího signálu v obou větvích, pro následnou demultiplexaci v kroku 3.

Krok 3

Tab. A.10: Nastavení demultiplexeru $320 \rightarrow 10$ Gbit/s

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
OptMux	Representation	SingleBand	-
	loss	5	dB
SOAComp	Pump_Current	0,1	A
OptCoup	loss	4	dB

Krok 4

Tab. A.11: Nastavení demodulátoru

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
PolnTrans	mode	PolarizationController	-
OptNorm	AvePowerOut	-4	dBm

Hodnota optického výkonového normalizéru je uvedena pro dolní větev demodulátoru (ze kterého odebíráme přenesený datový kanál). Vlivem demultiplexace je hodnota -4,5 dBm nedostačující pro horní větev, kde je nastavena dvojnásobná hodnota.

A.2.3 Nastavení jednotlivých modulací

Při testování modulačních formátů na simulačním modelu, jsou realizovány specifické modulátory a demodulátory těchto modulací. Podobně jako při popisu nastavení simulačního modelu, budou uvedeny změny základního nastavení prvků, popřípadě změny v již nastavené modulaci 50% RZ v tabulce A.2.

Modulace NRZ

Modulátor je složen ze stejných prvků jako u modulace 50% RZ, liší se nastavením elektrického generátoru dat. Nastavení demodulátoru zůstalo nezměněno.

Tab. A.12: Nastavení elektrického generátoru dat u modulace NRZ

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
ElectGen	driveType	on_off_ramp	-
	modulationType	NRZ	-

Modulace CSRZ

Tab. A.13: Nastavení modulátoru CSRZ

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
AnaSineGen	frequency	$5 \cdot 10^9$	Hz
	Vpp	2	V
	noPeriods	6	2^x_bits
	ptsPerPeriod	7	2^x_bits
OptNorm	AvePowerOut	3,5	dBm

Modulace CRZ

Tab. A.14: Nastavení modulátoru CRZ

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
ExtMod1	modulationType	Amplitude	-
	vPi	1	V
ExtMod2	modulationType	Phase	-
	phaseShift	57,29578	°
	vPi	0,5	V

Modulace DPSK

Tab. A.15: Modulátor DPSK

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
ML laser	type	raisedCosPow	-
ElectGen	driveType	on_off	-
	modulationType	NRZ	-
	pointsPerBit	6	2^x_bits
ExtMod2	modulationType	Phase	-
	phaseShift	180	°
	vPi	1	V

Tab. A.16: Demodulátor DPSK

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
PhaseShift	phaseShift	180	°
OptCoup	mode	custom	-
	coef11r	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	-
	coef12r	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	-
	coef21r	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	-
	coef22r	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	-

Modulace QAM

Tab. A.17: Modulátor QAM

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
ElectGen	driveType	on_off	-
	modulationType	NRZ	-
	pointsPerBit	6	2^x_bits
	Vmax	-5	V
	Vmin	5	V
ElecFilt	type	Lpbessel	-
	bandwidth	$1 \cdot 10^{10}$	Hz
	order	1	-
ExtMod	type	Mach-Zehnder	-
	vPi	5	V
	vBias	5	V
	vOffset	5	V
	onoffRatio	1000	dB
PhaseShift	phaseShift	90	°

Tab. A.18: Demodulátor QAM

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
OptFilt	loss	3	dB
	BW	4	nm
PhaseShift	phaseShift	90	°
	phaseShift	-90	°
OptCoup	mode	custom	-
	coef11r	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	-
	coef12r	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	-
	coef21r	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	-
	coef22r	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	-

Modulace FSK

Tab. A.19: Modulátor FSK

Typ zařízení	Parametr	Hodnota	Jednotka
AnaSineGen	frequency	$10 \cdot 10^9$	Hz
	Vpp	2	V
	noPeriods	7	2^x_bits
	ptsPerPeriod	6	2^x_bits
ElectGen	driveType	on_off	-
	modulationType	NRZ	-
	pointsPerBit	6	2^x_bits
PhaseShift	phaseShift	-90	°
ExtMod	type	Mach-Zehnder	-
	vPi	1	V
EDFA	Psat	15	dB

Dále došlo ke změnám v nastavení optických výkonových normalizérů (ve vysílací části na výkonovou úroveň 4 dBm, v přijímací části na úroveň 4,4 dBm).

A.2.4 Popis nastavovaných parametrů

Tab. A.20: Popis parametrů nastavovaných v simulaci část 1.

AnaSineGen	Analogový sinusový generátor
attenuation	Útlum
AvePowerOut	Průměrný výstupní výkon optického výkon. Normalizéru
BW	Šířka pásma
coefxxr	Reálný port optické spojky, x je číslo specifikující daný port
driveType	Typ modelu pro generování signálu
EDFA	EDFA zesilovač
ElecFilt	Elektrický filtr
ElectGen	Elektrický generátor
ExtMod	Externí modulátor
frequency	Frekvence
loss	Ztráty
MLFL	MLFL laser
mode	Režim polarizačního zařízení, popř. optické spojky
modulationType	Typ použité modulace
noPeriods	Celkový počet stavů výstupního signálu
onOffRatio	Zánik, popřípadě poměr zapnuto/vypnuto
OptCoup	Optická spojka
OptFilt	Optický pásmový filtr
OptMux	Optický multiplexer
OptNorm	Optický výkonový normalizér
peakPower	Maximální hodnota
pointsPerBit	Počet míst odběru vzorků el. sig. v době trvání 1 bitu
PolnTrans	Polarizační zařízení
postBits	Počet nulových bitů na konci sekvence
PRBS	Pseudonáhodný generátor dat
preBits	Počet nulových bitů na začátku sekvence
Psat	Saturační výkon optického zesilovače
ptsPerPeriod	Počet datových bodů, představujících jednotl. stavy výst. sig.
Pump_Current	Klidový proud
Representation	Nastavení jednopásmového nebo vícepás. multiplexeru
riseTime	Doba nábehu impulsu
shift	Posun

Tab. A.21: Popis parametrů nastavovaných v simulaci část 2.

ShiftSig	Počet bitů k posunu, výstup binární sekvence u PRBS
shiftType	Druh zpoždění signálu
SOAComp	SOA komplexní model
Splitloss	Útlum optického rozdělovače
timeShift	Časový posun
type	Režim laseru
vBias	Hodnota upřednostňovaného napětí
vOffset	Hodnota offset napětí modulátoru
vPi	Hodnota vPi v modulátoru
Vpp	Špičková hodnota napětí
width	Šířka generovaných impulsů FWHM

A.3 Vliv IDF na kvalitu přenosu

Na simulačním modelu s modulací 50% RZ, byl testován vliv inverzního disperzního vlákna na kvalitu přenosu. Nastavení jednotlivých vláken bylo zvoleno podle předdefinovaného modelu programu OptSim kompenzace chromatické disperze (uvedeno v literatuře [31], kapitola 2.3.2, Part-II).

Tab. A.22: Parametry jednovidového a inverzního disperzního vlákna

	SMF	IDF
Útlum [dB/km]	0,25	0,5
Délka [km]	30	7,4
S_0 [s/m ³]	$0,09 \cdot 10^3$	$-0,359 \cdot 10^3$
λ_0 [nm]	$1312 \cdot 10^{-9}$	$1312 \cdot 10^{-9}$

Hodnota S_0 uvedená v tabulce A.22 udává velikost disperzního sklonu, λ_0 je vlnová délka nulové disperze.

Tab. A.23: Vliv velikosti IDF na bitovou chybovost a Q-faktor

Číslo měření	Délka IDF [m]	BER	Q-faktor
1	0	$9,2756 \cdot 10^{-10}$	$1,5578 \cdot 10^1$
2	1	$1,6995 \cdot 10^{-9}$	$1,5433 \cdot 10^1$
3	100	$3,4554 \cdot 10^{-10}$	$1,5803 \cdot 10^1$
4	1000	$1,0119 \cdot 10^{-9}$	$1,5557 \cdot 10^1$
5	3000	$2,0961 \cdot 10^{-9}$	$1,7206 \cdot 10^1$
6	5000	$6,3761 \cdot 10^{-12}$	$1,6614 \cdot 10^1$
7	7200	$5,7957 \cdot 10^{-13}$	$1,7038 \cdot 10^1$
8	7400	$6,5463 \cdot 10^{-13}$	$1,7017 \cdot 10^1$
9	7600	$2,1069 \cdot 10^{-9}$	$1,5381 \cdot 10^1$

Z tabulky A.23 je patrné, že nejlepších parametrů bitové chybovosti a Q-faktoru bylo dosaženo při využití IDF o délce 7,2 - 7,4 km. Pro simulaci 320 Gbit/s OTDM na vzdálenost 30 km bylo zvoleno IDF o délce 7,4 km.

B PŘÍLOHA 2

B.1 Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD jsou, kromě elektronické verze práce ve formátu pdf, umístěny spustitelné soubory simulací jednotlivých modulačních formátů.

- **Simulace/**

4QAM/4QAM.moml

50RZ/50RZ.moml

50RZ_bez_IDF/50RZ_bez_IDF.moml

CRZ/CRZ.moml

CSRZ/CSRZ.moml

DPSK/DPSK.moml

FSK/FSK.moml

NRZ/NRZ.moml