

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

**Simulace koexistence více optických
systémů na fyzické vrstvě**

Praha, 2014

Autor:

Bc. Jiří Šebek

Vedoucí práce:

Ing. Michal Lucki, Ph.D.

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 12. 5. 2014

.....

Podpis studenta

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Šebek Jiří**

Studijní program:
Obor: Síť elektronických komunikací

Název tématu: **Simulace koexistence více optických systémů na fyzické vrstvě**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je studium možností současného provozování více optických systémů na společné fyzické vrstvě. Dílčím cílem je porovnání možností integrace vybraných párů optických systémů na společném fyzickém médiu, jako jsou například systémy o rychlostech 100Gbit a 40 Gbit a rychlejší, systémy DWDM, CWDM, SDH a další. Součástí práce je parametrizace výsledků pro různou hustotu vlnových délek, různé typy použitých zesilovačů, kompenzátorů disperze, detektorů nebo pro různé uspořádání trasy, včetně PON. Simulace provádějte v prostředí Optsim a s ohledem na platná doporučení ITU-T/IEEE v této oblasti. Finálním výsledkem jsou modely koexistence různých optických přenosových systémů a teoretické úvahy o tom, které optické systémy lze na fyzické vrstvě pomyslně slučovat či konvergovat a u kterých systémů nebo pro které varianty implementace se tento postup nedoporučuje.

Seznam odborné literatury:


- [1] Agrawal, G.P.: Lightwave Technology: Telecommunication Systems, Wiley Interscience, USA, New Jersey, 2005.
- [2] Lorente, R., Beltrán M.: Cost and Energy Efficient Multi-Standard OFDM Integrated Optical Access and In-Building Network Architecture, in Proceedings of 14th International Conference on Transparent Optical Networks, Coventry, England, paper Mo.C3.1, 2012.
- [3] Aissa, S., Maier, M.: Towards Seamless Fiber-Wireless (FiWi) Access Networks: Convergence and Challenges. In Proceedings of ICTON Mediterranean Winter Conference, paper Sa2.2, pp. 1-6, 2007

Vedoucí: Ing. Michal Lucki, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2014/2015


prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 20. 11. 2013

Abstrakt:

Tato práce se zabývá možnostmi koexistence optických přenosových systémů na jedné fyzické vrstvě. V práci je představeno několik modelů koexistence různých optických přenosových systémů a teoretických úvah, z kterých lze při návrhu hybridních systémů vycházet. Tyto poznatky jsou provázeny simulacemi z programu OptSim.

Klíčová slova:

OptSim, vlnový multiplex WDM, koexistence, CWDM/DWDM, hybridní systémy, 10G/40G DWDM

Abstract:

The main purpose of this thesis is to analyze coexistence possibilities of optical transmission systems on the one physical layer. There are introduced several coexistence models of different optical transmission systems and theoretical thoughts providing us with basis for designing of hybrid systems in this paper. All of the mentioned findings are supported by simulations from OptSim software.

Index Terms:

OptSim, wavelength division multiplexing WDM, coexistence, CWDM/DWDM, hybrid systems, 10G/40G DWDM

Poděkování

Velmi děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Luckimu, Ph.D. za vstřícný přístup, cenné připomínky a odborné rady. Poděkování také patří mé rodině, přátelům a přítelkyni za podporu během studia.

Obsah

1	Úvod	7
2	Problematika systémů WDM	8
2.1	Systémy s vlnovým sdružování WDM.....	8
2.1.1	<i>DWDM</i>	8
2.1.2	<i>CWDM</i>	8
2.1.3	<i>Struktura a vlastnosti WDM systémů</i>	9
2.1.4	<i>Slučování WDM systémů</i>	11
2.2	Modulační formáty	14
2.2.1	<i>Duobinární modulace</i>	15
2.2.2	<i>(P)DPSK</i>	15
2.2.3	<i>(RZ)DQPSK</i>	16
2.2.4	<i>PM-QPSK</i>	17
2.3	Disperze a nelineární jevy	18
2.3.1	<i>Chromatická disperze</i>	18
2.3.2	<i>Kompenzace disperze</i>	21
2.3.3	<i>Nelineární jevy v WDM</i>	22
3	Simulační metoda	24
3.1	TDSS metoda	24
3.2	Optické prvky a modely	24
3.3	Analýza a vyhodnocení	25
3.3.1	<i>Chybovost BER</i>	25
3.3.2	<i>Q-faktor</i>	25
3.3.3	<i>OSNR</i>	25
3.3.4	<i>Diagram oka</i>	26
4	Simulace a výsledky	27
4.1	Návrh výchozího systému	27
4.2	Koexistence systémů	30
4.2.1	<i>Výkonové úrovně</i>	33
4.2.2	<i>Kompenzace disperze</i>	38
4.2.3	<i>Kanálové plánování</i>	42
4.2.4	<i>Parametry trasy</i>	46
5	Závěr	49
	Seznam obrázků	51
	Seznam Tabulek	53
	Seznam použitých zkratk	54
	Literatura	56

1 Úvod

Provozovatelé optických systémů jsou nuceni neustále rostoucím objemem přenášených dat navyšovat celkovou přenosovou kapacitu systému. Nárůst datových přenosů je především způsoben zvyšující se oblibou cloudových a multimediálních služeb. Pro operátory je při navyšování kapacity systému logickým a ekonomicky zvládnutelným krokem provádět postupný přechod k vyšším přenosovým rychlostem za předpokladu, že bude co nejvíce využita stávající infrastruktura, do které byly investovány nemalé finance. V optických systémech s vlnovým sdružováním WDM je takovou možností nahrazení několika původních kanálů s nižší přenosovou rychlostí systémem s kanály o vyšší přenosové rychlosti. Dochází tak ke koexistenci více optických systémů a od nově nasazeného systému je požadována zpětná kompatibilita s původním systémem.

Práce se zabývá problematikou slučování optických systémů WDM, zkoumá interakci původního systému se systémem nově nasazeným a představuje možná řešení vyskytujících se problémů při slučování. Většina současných systémů s hustým vlnovým sdružováním pracuje s kanály o rychlostech 10 Gbps a amplitudovým klíčováním bez návratu k nule na rastru 50 GHz. Takový systém bude v práci uvažován jako výchozí. Navýšení přenosové rychlosti vybraných kanálů z 10 Gbps na 40 Gbps, či více, s sebou přináší několik omezení a zmíněná modulace NRZ-OOK přestává být použitelná. Navýšením přenosové rychlosti kanálů například klesá tolerance vůči chromatické a polarizačně vidové disperzi a dále je přijímačem požadován větší poměr hodnot optického signálu k šumu. Především ale nesmí být opomenut vliv původních 10 Gbps kanálů na sdružené kanály s větší přenosovou rychlostí, kdy může docházet k silnému vlivu nelineárních jevů a přeslechům mezi kanály, obzvláště jsou-li vloženy kanály fázově modulovány. Bude ukázáno, jakou roli při slučování systémů hraje modulační formát kanálů, schéma kompenzace disperze, typ kompenzátoru disperze, velikost výkonových úrovní, kanálové plánování a typ přenosového vlákna.

V druhé kapitole je představen princip optických systémů s vlnovým sdružováním a jejich variant s hustým a hrubým vlnovým multiplexem, po kterých následuje úvod do slučování WDM systémů. Kapitola se dále věnuje uvažovaným modulačním formátům, disperznímu plánování a nelineárním jevům. Třetí kapitola pojednává o simulační metodě, kterou program OptSim používá. Jsou zde rovněž diskutována vyhodnocovací kritéria, dle kterých lze charakterizovat systém. Čtvrtá kapitola obsahuje simulace a jejich výsledky, kde je nejprve uveden výchozí systém, na němž je prováděna simulace koexistence s jinými optickými systémy. Koexistence systémů je simulována z několika hledisek, například jsou to různá schémata kompenzace disperze, typy přenosového vlákna, apod., a výsledky jednotlivých simulací jsou vždy v příslušných podkapitolách okomentovány. V poslední páté kapitole jsou celkově zhodnoceny výsledky diplomové práce a vyvozeny platné závěry vycházející z provedených simulací.

2 Problematika systémů WDM

2.1 Systémy s vlnovým sdružováním WDM

Optické systémy s vlnovým multiplexem WDM (Wavelength Division Multiplex) jsou založeny na principu sdružování několika kanálů o různých nosných vlnových délkách do optického vlákna, který vychází z funkce frekvenčního sdružování FDM používané v elektrické oblasti [1]. Dochází tak k efektivnějšímu využití optického spektra. Základním parametrem WDM systému je jeho celková přenosová kapacita C_{WDM} , kterou spočteme jako:

$$C_{WDM} = \sum_{k=1}^N v_{pk}, \quad (2-1)$$

kde v_{pk} je přenosová rychlost k-tého kanálu a N je celkový počet kanálů systému WDM [5]. Každému kanálu je přiřazena určitá šířka spektra, bez ohledu na to, zda ji využije celou či nikoliv. Pokud je rozestup mezi kanály zbytečně veliký, dosahuje systém horší celkové spektrální účinnosti, kterou definuje vzorec:

$$\eta_{WDM} = \frac{C_{WDM}}{B_{WDM}}, \quad [bit \cdot s^{-1} \cdot Hz^{-1}] \quad (2-2)$$

kde B_{WDM} je celkové pásmo zabrané WDM systémem [5].

2.1.1 DWDM

Hustý vlnový multiplex DWDM (Dense WDM) umožňuje sdružování kanálů s velmi malým vzájemným rozestupem. Doporučení ITU-T G.694.1 definuje několik možných rozestupů mezi kanály, a to 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz a 100 GHz. Normalizovaným referenčním kmitočtem, od kterého se odvíjí kmitočty ostatních kanálů, je kmitočet 193,1 THz. Kmitočty ostatních kanálů pro rozestup 50 GHz spočteme:

$$f_n = 193,1 + n \cdot 0,05, \quad [THz] \quad (2-3)$$

kde n je kladné nebo záporné celé číslo, včetně nuly [6]. Tyto systémy mohou být provozovány v oblasti vlnových délek S, C a L pásma. DWDM systémy dosahují velké spektrální účinnosti a vysokých přenosových rychlostí, avšak vyžadují použití opticky přesných komponent, jako jsou například chlazené DFB lasery (Distributed Feedback laser) [9]. Nevýhodou jsou tedy vysoké náklady na vybudování tohoto systému.

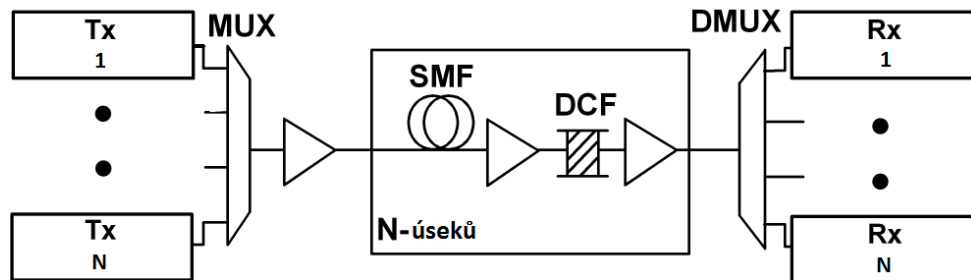
2.1.2 CWDM

Hrubý vlnový multiplex CWDM (Coarse WDM), jak název napovídá, je charakterizován většími rozestupy mezi kanály než povoluje DWDM systém. Z toho plyne nižší spektrální účinnost [1]. V doporučení ITU-T G.694.2 je uvedeno osmnáct nominálních vlnových délek s kanálovými rozestupy o velikosti 20 nm s tolerancí $\pm 6-7$ nm. Uvedená tolerance umožňuje použití mnohem levnějších komponent, například

nechlazených laserů, které mohou vykazovat nestabilitu vysílané frekvence signálu v tomto rozsahu. Proto jsou tyto systémy nasazovány především v metropolitních sítích.

2.1.3 Struktura a vlastnosti WDM systémů

Základní schématické uspořádání WDM systému je zobrazeno na Obr. 1. Celý systém lze rozložit do několika základních bloků.



Obr. 1 – Zjednodušené schéma WDM systému [2]

Vysílače jsou tvořeny zdroji optického záření opatřenými modulátory. Nejčastěji se používají DFB lasery, jejichž spektrální šířka se pohybuje řádu jednotek až desítek MHz [23]. DFB lasery jsou opatřeny rezonátorem tvořeným Braggovskou mřížkou s periodickou změnou indexu lomu, díky kterému je vygenerováno úzkospektrální záření, jehož spektrální šířka nepřekračuje šířku vyčleněnou pro jeden DWDM kanál [61].

Přestože přímá modulace laseru je nejjednodušší cesta k realizaci vysílače, na přenosových rychlostech vyšších než 10 Gb/s se příliš nepoužívá, neboť vede k frekvenčnímu čirpu, který rozšiřuje optické spektrum a dochází tak k degradaci signálu. Použití přímé modulace na 40 Gb/s ovšem není přímo vyloučeno [13]. Z výše uvedeného důvodu se používá externí modulace realizovaná například LiNbO₃ Mach-Zenderovým modulátorem (MZM) a InP elektroabsorpčním modulátorem (EAM) [12]. MZM je založen na principu elektro-optického jevu, kdy působením elektrického pole se mění indexu lomu v rameni modulátoru vůči druhému rameni. Na výstupu modulátoru dochází v závislosti na působícím elektrickém poli ke konstruktivní, či destruktivní interferenci signálů [2]. Takto mohou být realizovány různé modulační formáty, jako on-off klíčování (OOK), diferenční fázové klíčování (DPSK), diferenční kvadrurní fázové klíčování (DQPSK), return-to-zero (RZ) modulace a další.

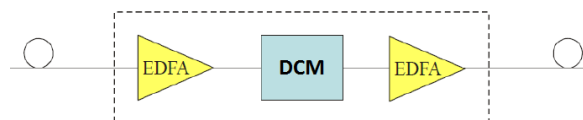
Sloučení všech sdružovaných kanálů se provádí v bloku zvaném optický WDM multiplexor. Ten se pro každý kanál chová jako pásmová propust. Opačnou funkci, vyčlenění kanálů, provádí na přijímací straně WDM demultiplexor. Jedná se buď o difrakčně založené multiplexory s Braggovskými mřížkami, nebo interferenční multiplexory AWG (Arrayed Waveguide Grating). Multiplexory Braggovskými mřížkami dosahují vysoké přesnosti a menších ztrát, jejich nevýhodou ale je, že ke své funkci potřebují další komponenty (vazební členy, cirkulátory) a zavádí do systému chromatickou disperzi [2]. AWG multiplexory jsou vyrobeny ze dvou vlnovodů na vstupu a na výstupu a z uspořádané vlnovodné mřížky AWG složené z nestejně dlouhých paralelních vlnovodů [10]. Technologie AWG umožňuje 50 GHz multiplexaci většího počtu kanálů, může být

integrována na vrstvu křemíku a netrpí chromatickou disperzí. Jedinou nevýhodou je její závislost na teplotě.

Při přenosu signálu optickým vláknem dochází k jeho útlumu a při přenosu na delší vzdálenosti je nezbytné signál po určitých úsecích obnovovat. K tomuto účelu slouží optické zesilovače signálu, z nichž nejdůležitějším a nejrozšířenějším je EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), erbiem dopované optické vlákno s laserovou pumpou o vlnové délce 980 nm nebo 1480 nm zesilující optické signály v oblasti 1500 nm. Vlivem laserové pumpy se elektrony postupně dostanou do metastabilního stavu, kde reagují s přicházejícím optickým zářením a vzniká stimulovaná emise záření se shodnou fází a vlnovou délkou původního signálu [10]. Zisk EDFA zesilovače se pohybuje okolo 20-45 dB [17]. Oblast 1500 nm je důležitá z toho důvodu, že spadá do C-pásma, v kterém se nacházejí i DWDM systémy a mohou být bez problému zesilovány a zároveň v tomto intervalu vykazuje standardní optické vlákno nejnižší útlum [1]. Pokud ale signál projde větším počtem EDFA zesilovačů, například ve velmi dlouhých trasách, začne být pozorovatelné nerovnoměrné zesílení dané spektrálním charakterem zisku EDFA zesilovače. Zesilující proces je doprovázen spontánním šumem ASE (Amplified Spontaneous Emission), který není ani polarizovaný ani koherentní a je přibližně charakterizován šumovým číslem F:

$$F = \frac{OSNR_{vstup}}{OSNR_{výstup}} \approx \log(2n_{sp}), \quad [dB] \quad (2-4)$$

kde OSNR specifikuje poměr optického výkonu signálu a výkonu šumu na vstupu a výstupu z EDFA zesilovače a n_{sp} je spontánní emisní faktor závislejší na populaci elektronů v excitovaném stavu [2]. Teoretické minimum šumového čísla F jsou 3 dB, v reálných případech se ale pohybuje okolo 3,5 až 4,5 dB. Nižšího šumového čísla, vyššího zisku a dalších výhod lze dosáhnout dvoufázovým zesilovačem (two-stage), který navíc může mít v prostřední fázi (mid-stage) vložený kompenzátor disperze, viz [16] [20]. Poté EDFA kromě zesílení signálu zajišťuje navázání rozdílných výkonových úrovní do SMF a DCF vláken a tím lépe potlačujeme vznik nelineárních jevů (především v DCF vlákne). Použití dvoufázových zesilovačů s DCF vlákny doporučuje i ITU-T dodatek G.39 [3].



Obr. 2 – Schéma dvoufázového zesilovače EDFA [27]

Typ optického vlákna sloužícího k přenosu signálu může být vybrán z doporučení ITU-T standardní jednovidové vlákno SSMF podle standardu G.652 (A,B,C,D varianty), kvůli nulové disperzi ve WDM systémech nepříliš používané DSF dle ITU-T G.653 a vlákno s posunutou disperzí NZ-DSF podle ITU-T G.655. Nejpoužívanější typy vláken jsou SSMF vlákna a NZ-DSF vlákna LEAF od firmy Corning [16].

Po průchodu optického signálu skrz N-úseků obsahující transportní optické vlákno, kompenzátory disperze a zesilovače, jsou kanály vyděleny výše zmíněným WDM

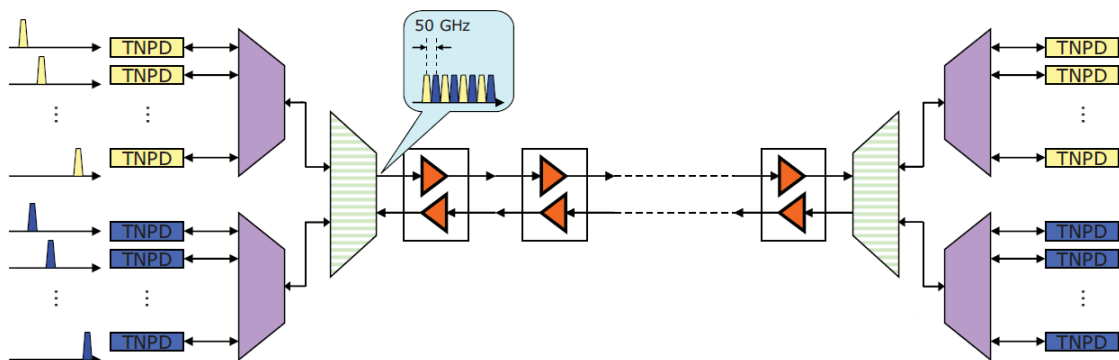
demultiplexorem a na patřičných přijímačích nastává pomocí fotodiody (PIN, APD) konverze signálu z optické domény do domény elektrické. Protože fotodetektor převádí pouze intenzitu optického záření na elektrický signál, je v případě pokročilejších modulačních formátů přijímač vybaven dalšími optickými prvky, jako třeba Mach-Zenderův interferometrem (MZI) nebo 90° hybridním optickým vazebním členem [4]. V závislosti na typu přijímaného signálu, rozlišujeme na detekci přímou a koherentní.

2.1.4 Slučování WDM systémů

Slučování WDM systémů lze provádět především za účelem navýšení celkové přenosové kapacity. Nárůstu přenosové lze docílit několika způsoby, které se navzájem nevylučují. První možností je přidat do systému další kanály, kdy ale dojde k rozšíření celkového pracovního spektra systému, které může být dalším rozšiřováním vyčerpáno, neboť většina prvků systému pracuje pouze v omezeném pásmu. Druhým způsobem je snížení rozestupu mezi kanály, např. z rastru 100 GHz na rastr 50 GHz. Tímto krokem zlepšujeme spektrální účinnost systému a zachováním původně obsazeného spektra opět získáme vyšší celkovou přenosovou rychlost. Posledním řešením je navýšení datové rychlosti jednotlivých kanálů.

Koexistenci systémů je především chápáno nasazení systému s vyššími datovými rychlostmi jednotlivých kanálů, např. kanály o rychlostech 40 Gbps, do stávajícího systému s nižšími datovými rychlostmi jednotlivých kanálů, např. 10 Gbps [11]. V literatuře lze tyto systémy také nalézt pojmy jako „hybridní systémy 10G/40G“, nebo „mix 10G/40G“ [7] [22] [24] [26].

Jak dokládá doporučení ITU-T G.696.1, většina současných optických systémů pracuje s kanály o rychlostech 10 Gbps a NRZ (případně RZ) amplitudovým klíčováním na rastru 50 nebo 100 GHz. Protože do 10G infrastruktury byly investovány nemalé finance a výměna celého systému za novější by byla příliš nákladná, je logickým krokem pro operátory při navyšování kapacity využít co nejvíce ze stávající infrastruktury (přenosová vlákna, zesilovače, atd.) a provádět postupný přechod k vyšším rychlostem. Od nově nasazeného systému je tak požadována zpětná „kompatibilita“. Na Obr. 3 je k vidění časté řešení při slučování systémů, vložení 40/100 Gbps kanálů mezi 10 Gbps kanály [4]. Proložení poté kanály rozlišujeme na liché a sudé.



Obr. 3 – Slučení dvou systémů do výsledného rastru 50 GHz [4]

Z výše uvedených důvodů plyne pro 40G a 100G systémy řada omezení, s kterými se budou muset při zachování stávajících prvků sítě vypořádat. Konkrétně se jedná o schopnost existence na staré infrastruktuře (často používaná vlákna SSMF a LEAF) beze změny disperzní mapy, odolnost vůči nelineárním jevům a PMD, vzájemné ovlivňování 10G a 40G/100G kanálů, průchod signálu skrz OADM a možnost zachování 50 GHz rastru.

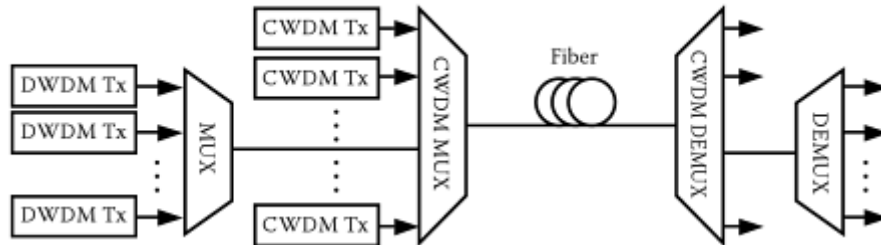
Navýšení přenosové rychlosti kanálu z 10 Gbps na 40 Gbps a více s sebou přináší několik problémů, kvůli kterým je klasické amplitudové klíčování OOK-NRZ (ON-OFF keying) na této úrovni nepoužitelné. Proto se v 40G a 100G systémech přechází na jiné modulační formáty, jako např. duobinární modulaci [29] a fázové klíčování PSK (Phase Shift Keying) [34].

Přechodem z 10 Gbps na 40 Gbps vzroste chybovost způsobená chromatickou disperzí šestnáctinásobně, tedy s druhou mocninou násobku rychlosti. Zatímco 10G NRZ modulace toleruje velikost chromatické disperze až 1000 ps/nm, pro 40G NRZ je to pouze 60 ps/nm [18]. Z toho plyne, že v 40G/100G systémech je přesná kompenzace disperze velmi důležitá. Další zpřísnění se týká požadavku na OSNR (optical signal to noise ration), který musí být na 40G (100G) přijímači o 6 dB (10 dB) větší, než na 10G přijímači, chceme-li zachovat stejnou chybovost [33]. Také odolnost vůči polarizačně vidové disperzi PMD klesá s násobkem rychlosti na limitní hodnoty 3 ps pro 40G a 1 ps pro 100G systémy, která vzniká kvůli výrobním nedokonalostem vlákna, způsobuje zpoždění mezi dvěma polarizačními složkami vidu a její kompenzace v porovnání s kompenzací chromatické disperze není stochastickým procesem [15]. Vlákna vyrobená před rokem 1995 jsou z důvodu vysokých hodnot PMD pro 40G/100G přenosy nepřijatelné [31]. Bylo dokázáno, že použitím koherentního příjmu s digitálním zpracováním signálu lze omezení plynoucí z chromatické disperze a PMD zanedbat [25].

Nesmí být opomenut ani vliv 10 Gbps kanálů na 40G/100G kanály. Je-li sloučen 10G OOK-NRZ systém s 40G systémem s fázovým klíčováním PSK, dochází k rušení 40G kanálu křížovou fázovou modulací XPM pocházející z amplitudové modulace [19]. Interakci mezi 10G a 40G kanály lze ovlivnit (zmírnit) pouhou změnou vysílacích výkonů, nebo vhodnou volbou umístění kanálů. Vhodným plánováním kompenzace disperze a zavedením RDPS (residual dispersion per span) redukuje nejen vliv XPM, ale také dalších nelineárních jevů jako je např. FWM [7] [21]. S tím také souvisí výběr přenosového vlákna, ITU-T G.652 vykazuje větší chromatickou disperzi než ITU-T G.655 ITU-T G.653 a tak může lépe potlačovat vznik nelineárních jevů. Experimentálně bylo zjištěno, že fázově modulované signály s vyšší symbolovou rychlostí (např. DPSK) mají tendenci být XPM méně ovlivňovány, než signály s nižší symbolovou rychlostí (např. DQPSK) [14] [30].

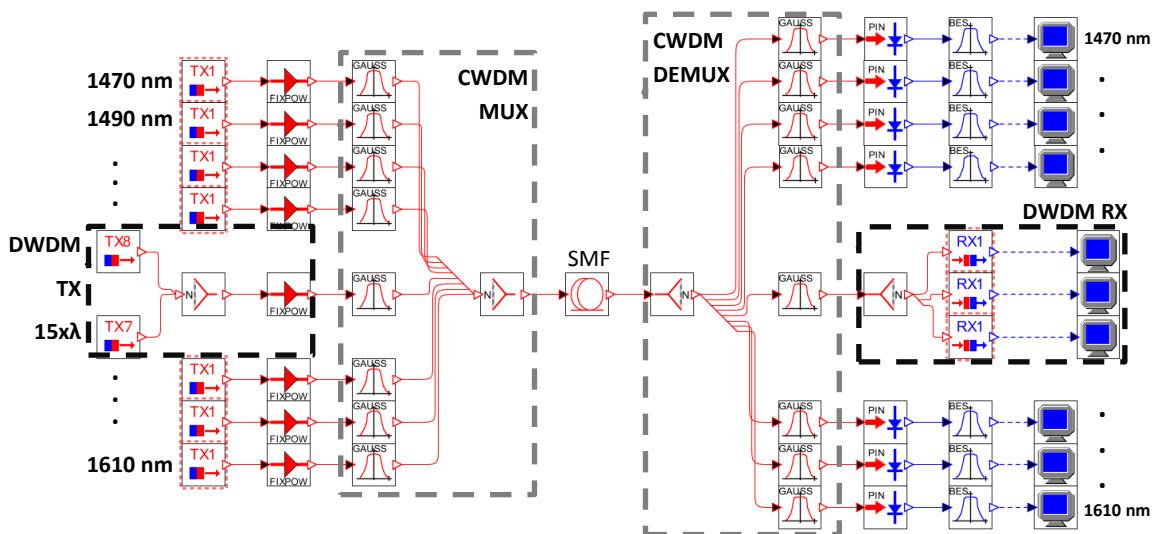
Druhou variantou koexistence je sloučení systémů CWDM a DWDM. Zkráceně se takový systém označuje CWDM/DWDM. V tomto případě se do existujícího CWDM systému integruje systém DWDM. Jedná se o výše zmiňované možnosti navýšení počtu kanálů a snížení rozestupu kanálů. Jak ilustruje Obr. 4, sloučení systémů spočívá v nahrazení jednoho (či více) CWDM kanálu systémem DWDM [63]. Za CWDM

multiplexor/demultiplexor se umístí DWDM multiplexor/demultiplexor s DWDM vysílači/přijímači [59]. Teoretická šířka pásma, kterou lze vloženým DWDM využít, odpovídá kanálovým rozestupům CWDM systému, tedy 20 nm. V reálném případě se ale kvůli toleranci CWDM filtrů dané doporučením ITU-T využívá pásmo o velikosti 12 nm.



Obr. 4 – Princip systému CWDM/DWDM [58]

Dle doporučení ITU-T G.695 CWDM systémy o 8 kanálech okupují vlnové délky v rozsahu 1470 nm až 1610 nm [60]. Například odebráním 5. CWDM kanálu na nominální frekvenci 1550 nm lze do CWDM systému umístit DWDM systém s 15 kanály s rozestupem 0,8 nm (100 GHz) na vlnových délkách 1544,53 nm až 1555,75 nm. Pro takový CWDM/DWDM systém byla provedena exemplární simulace, viz schématické zobrazení na Obr. 5. Původních 8 CWDM kanálů s rozestupy 20 nm rozprostřenými na 1470 nm až 1610 nm, přenosovou rychlostí 10 Gbps, NRZ-OOK formátem a výkonovou úrovní 1 dBm na kanál bylo sloučeno v CWDM multiplexoru a přeneseno přes 50 km dlouhé SMF vlákno s parametry dle Tab. 2. Na přijímací straně byly kanály vyděleny CWDM demultiplexorem a došlo k vyhodnocení jejich Q-faktoru a chybovosti. Následným nahrazením 1550 nm CWDM kanálu výše zmíněnými 15 OOK-NRZ DWDM kanály vzniká systém CWDM/DWDM. Výkonová úroveň na kanál je 1 dBm a přenosová rychlost DWDM kanálů se rovná přenosové rychlosti CWDM kanálů, díky tomu je vliv disperze stejný jako na původní 1550 nm kanál [58]. Výsledné hodnoty detekované CWDM přijímači čistého CWDM a CWDM/DWDM systému jsou v Tab. 1.



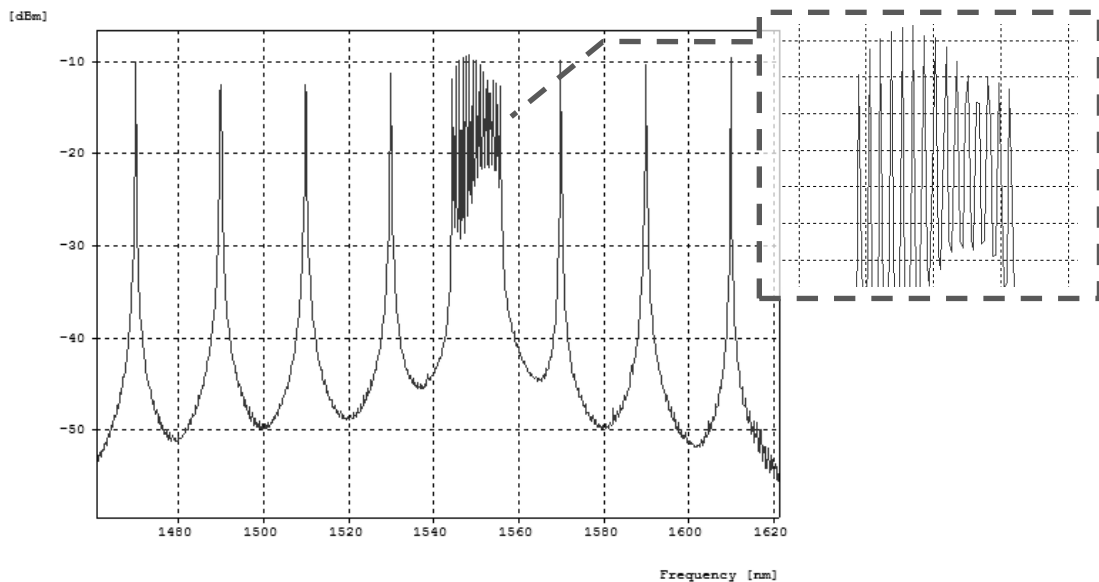
Obr. 5 – Systém CWDM/DWDM

Srovnáním hodnot Q-faktoru z Tab. 1 pro čistý CWDM a CWDM/DWDM systém lze vyvozovat, že nahrazením 5. CWDM kanálu systémem DWDM nedochází ke změně Q-faktoru CWDM kanálů o více než 0,1 dB a je zřejmé, že přidání DWDM kanály v tomto případě nikterak nedegraduje původní CWDM systém. Q-faktor DWDM kanálů se pohyboval od 19,71 dB do 20,33 dB, což odpovídá chybovosti od 10^{-19} do 10^{-24} .

Tab. 1 – Výsledné hodnoty CWDM kanálů v systémech CWDM a CWDM/DWDM

CWDM kanál [nm]	CWDM		CWDM/DWDM	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
1490	20,58	0,56E-26	20,61	0,33E-26
1530	19,50	0,15E-19	19,50	0,13E-19
1570	21,14	0,86E-28	21,24	0,19E-29
1610	21,42	0,19E-30	21,45	0,14E-29

Na Obr. 6 je optické spektrum CWDM/DWDM systému s detailem na slučované DWDM kanály.



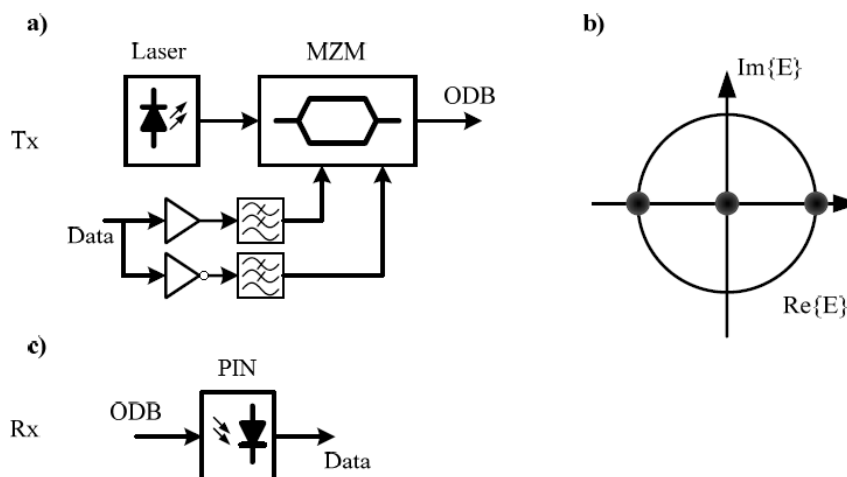
Obr. 6 – Optické spektrum CWDM/DWDM systému

2.2 Modulační formáty

Systémy definované v doporučení ITU-T G.957, ITU-T G.959.1, ITU-T G.691 a ITU-T G.692 jsou založeny na OOK-NRZ přenosu. Navýšením přenosové rychlosti kanálu z 10 Gbps na 40 Gbps se ale OOK-NRZ modulace z řady výše jmenovaných důvodů stává v nepoužitelnou, počítáme-li navíc s 50 GHz rastroem, a na vyšších přenosových rychlostech je nezbytné použít jiné linkové kódy [35] [37]. Pro 40G systémy přichází v úvahu několik modulačních formátů. První generace 40G systémů používá duobinární modulační schéma, za druhou generaci se pokládají systémy s (P)DPSK modulací a třetí generace obsahuje DQPSK modulační schéma [36]. V 100G systémech je prozatím nejrozšířenější variantou koherentní PM-QPSK modulace.

2.2.1 Duobinární modulace

Duobinární modulace (DB) spadá do kategorie amplitudových modulací a je charakteristická podstatně užším spektrem v porovnání s klasickou NRZ modulací. Kanály s přenosovou rychlostí 40 Gbps a duobinární modulací mohou operovat na 50 GHz rastru. Modulace je velmi odolná vůči chromatické disperzi až do velikosti 300 ps/nm a úzkospektrálnímu filtrování. Tolerance vůči PMD (DGD) je přibližně 3,5 ps. Její vysílací výkony jsou kompatibilní s 10G systémy. V [41] byl zkoumán 40G duobinární systém společně s 10G kanály. Na Obr. 7 je zobrazen vysílač (a), přijímač (c) a konstelační diagram duobinární modulace [35].



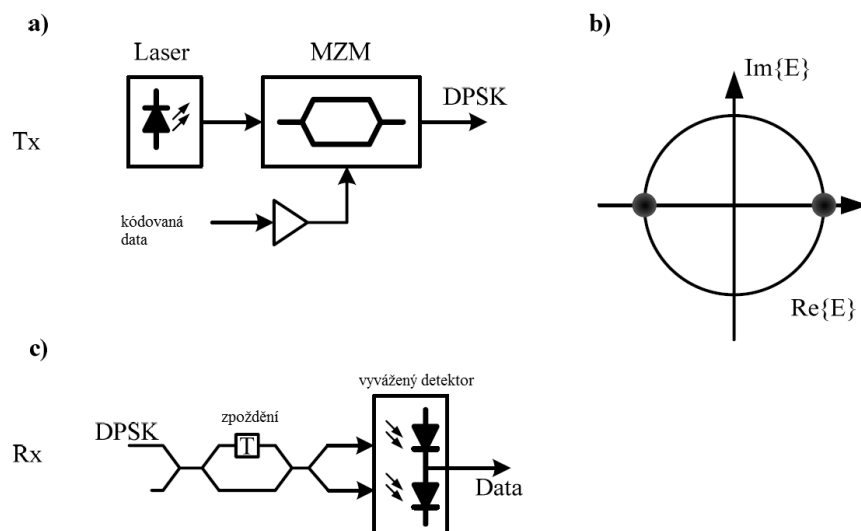
Obr. 7 – Schéma duobinární modulace: a) vysílač b) konstelační diagram c) přijímač [35]

Duobinární modulace je známá tří-úrovňovým signálem, vstupní bitová posloupnost (1,0,1) je dekódována na posloupnost s opačnými polaritami (-1,0,+1), kterou modulujeme MZM a dostáváme výstupní optický signál s intenzitami (1,0,1) se změnou ve fázi (0,0, π), jak je i možno si všimnout na Obr. 7c [12]. Šířka pásma elektrického filtru (dolní propust) ve vysílači je nastavena na 25% bitové rychlosti. Výhodou duobinární modulace je, že přijímač se neliší od NRZ přijímače.

Nevýhodou DB modulace je její omezený dosah, především kvůli intra-kanálovým nelineárním jevům [29] [35]. Proto na LEAF vláknech dosahuje lepších výsledků než na SSMF vláknech [37].

2.2.2 (P)DPSK

Diferenční fázová modulace DPSK (Differential PSK) se řadí k modulacím s fázovým klíčováním, které zachovávají amplitudu signálu. Diferenční modulace má také tu výhodu, že umožňuje nekoherentní příjem. Hlavními přednostmi DPSK modulace je zvýšená tolerance OSNR o 3 dB oproti OOK-NRZ, vysoká odolnost vůči nelineárním jevům SPM a XPM, z čehož plyne schopnost překonat velké přenosové vzdálenosti v porovnání s ostatními modulacemi [3] [38]. Tolerance disperze je menší než v případě DB modulace, PMD tolerance zůstává stejná. Uspořádání vysílače, přijímače a konstelační diagram je na Obr. 8.



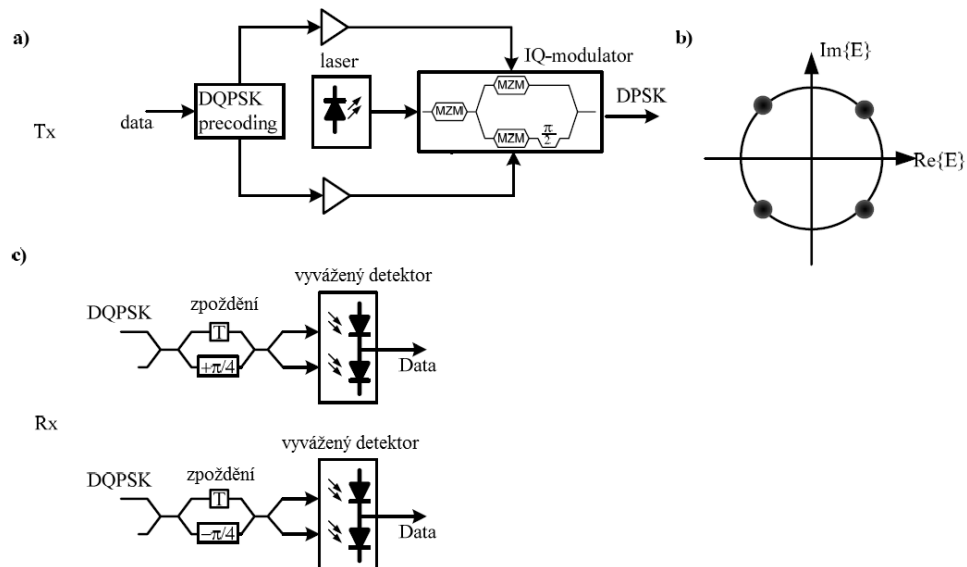
Obr. 8 – Schéma DPSK modulace: a) vysílač b) konstelační diagram c) přijímač [35]

Vstupní datový signál je do optické domény kódován jako změna fáze o hodnotu π , jestliže se vstupní bit liší od předchozího a fáze zůstává stejná, pokud se hodnota po sobě jdoucích bitů neliší. Optický přijímač DPSK modulace musí být doplněn vyváženým detektorem (skládající se z dvou PIN diod) a zpožďujícím interferometrem MZDI (Mach-Zehnder Delay Interferometer). Zpožďující interferometr rozděljuje vstupní signál do dvou ramen, kde v jednom rameni je signál zpožděn o dobu trvání jednoho bitu (25 ps při 40 Gbps rychlosti) a na výstupu detektoru pozorujeme destruktivní interferenci (stejně fáze) nebo konstruktivní interferenci (rozdílné fáze) [12]. Nevýhodou z pohledu operátorů může být složitější přijímač představující vyšší investiční náklady.

DPSK modulace má podstatně širší spektrum než je potřeba ke správné funkčnosti na 50 GHz rastru a úzkopásmovou filtrací nastává degradace signálu [38]. Tento problém řeší P-DPSK (Partial DPSK), která se od DPSK liší jen změnou přijímače, v kterém zpoždění zpožďujícího interferometru je zredukováno na 60 až 80 % doby trvání jednoho bitu [39] [40].

2.2.3 (RZ)DQPSK

Zatímco DPSK přiřazuje jeden bit na jeden symbol, diferenční kvadrurní modulace DQPSK (Differential Quadrature PSK) kóduje dva bity na symbol, čímž se symbolová rychlost snižuje na polovinu datové rychlosti (např. pro 40 Gbps je symbolová rychlost 20 GBaud) a stejně tak se ve frekvenční oblasti redukuje optické spektrum. Díky delšímu trvání symbolů se zlepšuje odolnost DQPSK modulace vůči PMD přibližně na 6 ps. Redukce optického spektra naopak pomáhá ve zvýšení tolerance chromatické disperze a v nasazení do WDM systémů s úzkospektrálním filtrováním a vysokou spektrální účinností [12]. Snížení symbolové rychlosti kanálů s PSK modulací ale naopak vede k jejich silnějšímu ovlivňování XPM jevy [3]. Obr. 9 zobrazuje schéma vysílače, přijímače a konstelační diagram DQPSK.



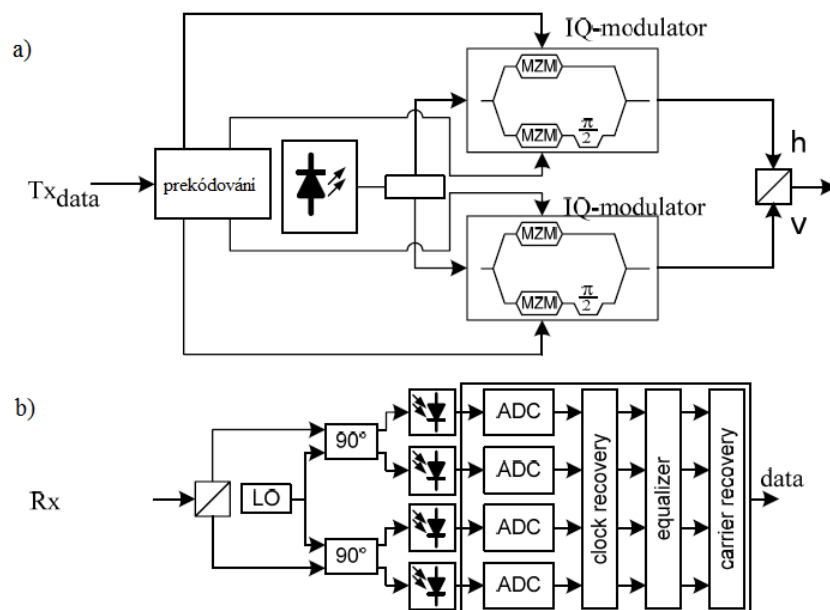
Obr. 9 - Schéma DQPSK modulace: a) vysílač b) konstelační diagram c) přijímač [35]

V závislosti na vstupní posloupnosti dat dochází k posunu fáze o 0 , $\pi/2$, π nebo $3\pi/2$. Prekodér vstupních dat je v porovnání s DPSK mnohem složitější. Vysílač se skládá ze dvou paralelně umístěných MZM zajišťující posun fáze. Jedno rameno vysílače je konstantně posunuto o $\pi/2$. V přijímači je signál rozdělen na dva vyvážené detektory vyhodnocující souřadnou a kvadraturní složku [3]. DQPSK na svém přijímači potřebuje pouze o 1 až 1,5 dB vyšší OSNR než DPSK na nízkých hodnotách BER (okolo 10^{-3}), ale s klesající chybovostí BER (např. 10^{-12}) se rozdíl mezi OSNR hodnotami DPSK a DQPSK propastně zvětšuje, až dokonce může u DQPSK docházet k přiblížení hodnotám známým u OOK modulací [12].

V mnoha optických systémech se lze také setkat RZ variantou DQPSK modulace [24] [42]. RZ-DQPSK signál je generován umístěním MZM za NRZ-DQPSK vysílač. MZM je řízen sinusovým signálem s frekvencí rovné polovině bitové rychlosti. Takto generovaný signál je označován jako 50% RZ-DQPSK. RZ-PSK modulace obecně jsou odolnější proti nelineárním jevům, PMD (pro RZ-DQPSK cca 8 ps) a šumu a proto se hodí do systémů s přenosy na velké vzdálenosti [35].

2.2.4 PM-QPSK

PM-QPSK (polarization multiplexed), někdy označována DP-QPSK (dual polarization) je v současnosti hlavní 100 Gbps modulací. Jestliže (D)QPSK redukuje symbolovou rychlost na polovinu datové rychlosti, PM-QPSK díky polarizačnímu multiplexu dosahuje redukce bitové rychlosti na čtyřnásobek (4 bity na symbol).



Obr. 10 – Schéma PM-QPSK modulace: a) vysílač b) koherentní přijímač s DSP [35]

Optický signál s modulací PM-QPSK je generován dvěma nezávislými QPSK modulátory, jejichž výstupy jsou sloučeny v polarizačním slučovači do dvou navzájem ortogonálních polarizačních rovin, viz vysílač na Obr. 10a. Prekódování může být ve vysílači zahrnuto, ale není požadováno. Na koherentním přijímači s DSP probíhá opačný proces, přichází optický signál je zpět polarizačně rozdělen a každá polarizační rovina je na 90° hybridních vazebních členech skombinována se zařízením z lokálního oscilátoru [44]. Elektrický signál z fotodiód je v rychlých ADC převodnicích odeslán do DSP. Koherentní přijímač s DSP procesorem díky digitálnímu zpracování signálu nevyžaduje fázový soulad lokálního oscilátoru s přicházejícím signálem, má lepší citlivost, tolerance k PMD je 25 ps a je schopen kompenzovat chromatickou disperzi až o velikosti 50 000 ps/nm [35] [43].

Sloučení 40G PM-QPSK s 10G OOK-NRZ systémem kvůli nízké symbolové rychlosti 40G kanálů, mající za následek depolarizaci 40G kanálů a vznik XPM mezi 40G a 10G kanály, se nedoporučuje [11] [45].

2.3 Disperze a nelineární jevy

2.3.1 Chromatická disperze

Chromatická disperze (CD) se skládá z materiálové a vlnovodné disperze. Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu křemene na vlnové délce optického záření. Vlnovodná disperze vychází z profilu indexu lomu vlákna a projevuje se závislostí rychlosti šíření optického záření na vlnové délce. Vlivem CD se spektrální složky optického pulsu, který není nekonečně úzký, vůči sobě zpožďují a na přijímači to v časové doméně pozorujeme jako rozšiřování pulsu. Velikost rozšíření pulsu $\Delta\tau$ lze vyjádřit:

$$\Delta\tau = L \cdot D \cdot \Delta\lambda , \quad [ps] \quad (2-5)$$

kde L je přenosová vzdálenost, D je parametr disperze s jednotkou ps/nm.km a $\Delta\lambda$ je šířka spektra optického signálu [49].

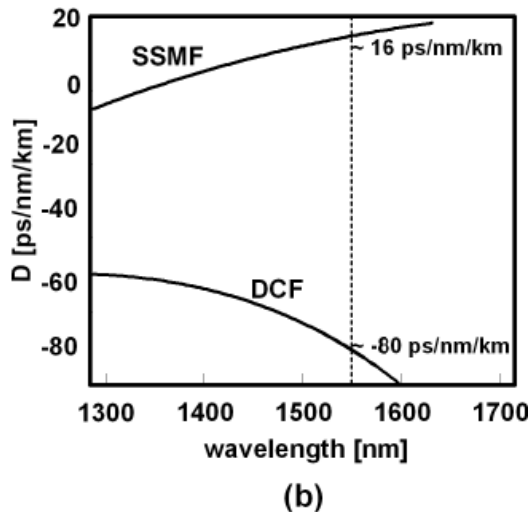
Chromatická disperze optických vláken, pocházející z materiálové a vlnovodné disperze, může nabývat kladných nebo záporných hodnot. Standardní SMF vlákno dle ITU-T G.652 má nulovou disperzi na vlnové délce 1300 nm. Na ostatních vlnových délkách je ale velikost chromatické disperze kvůli sklonu disperzní křivky S nenulová. Např. na 1550 nm, kde se nachází minimální útlum klasického SMF vlákna je disperze přibližně 17 ps/nm.km. Sklon disperzní křivky se vypočítá:

$$S = \frac{dD}{d\lambda} \quad (2-6)$$

a je v jednotkách ps/nm².km. Jak bylo předesláno, CD negativně ovlivňuje maximální překlenovací vzdálenost optické trasy [62]. Zatímco přenos 10 Gbps systému je limitován bez kompenzace disperze přibližně na 60 km SMF vlákna, pro 40 Gbps systém to znamená 16krát kratší vzdálenost. Pokles s druhou mocninou násobku přenosové rychlosti je zapříčiněn lineárním nárůstem spektrální šířky a lineárním poklesem periody bitu. Je zřejmé, že chromatická disperze musí být kompenzována. Systémy rychlejší než 10 Gbps obsahující více kanálů musí počítat i se sklonem disperzní křivky S , neboť naakumulovaná disperze je pro každý kanál různá.

CD potlačuje vznik nelineární jevy jako SPM a FWM na přijatelnou úroveň, proto se k redukci CD v optické trase, a především ve WDM systémech, nepoužívají vlákna s disperzí posunutou (nulovou na 1550 nm) DSF [62]. Kompenzace disperze realizovaná v optické rovině se ve většině případů provádí průběžně po určitých úsecích trasy pomocí komerčně nejrozšířenějších disperzních kompenzačních vláken DCF nebo čerpaných Braggovských mřížek FBG. Kompenzaci disperze je realizována disperzním kompenzačním modulem DCM. Nejtypičtější délkou jednoho úseku je 80 km, je to kompromis mezi lineárními (šum ASE) a nelineárními jevy [2]. CD a PMD lze kompenzovat i v elektrické rovině na koherentním přijímači vybaveným DSP, jak bylo řečeno v 2.2.4.

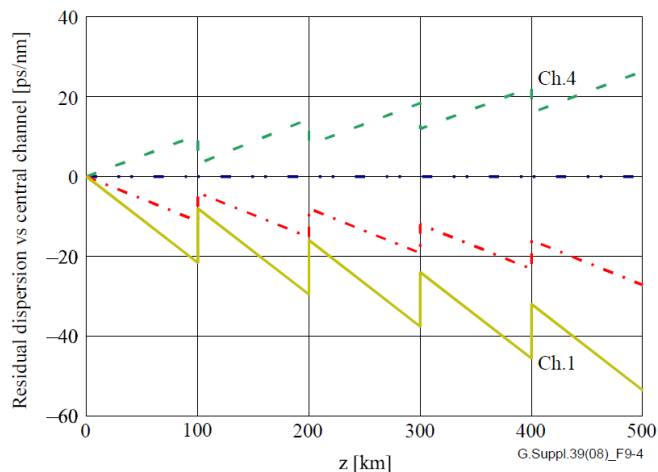
DCF je nejrozšířenější kompenzační technika vůbec. DCF vlákna jsou charakteristická velkým záporným disperzním koeficientem a záporným sklonem disperzní křivky. Záporné disperzní hodnoty kompenzují kladnou disperzi přenosového (např. SMF) vlákna a zpětně „komprimují“ optické pulsy do původního tvaru. DCF však trpí i negativními vlastnostmi. Mají velký vložný útlum a nemohou do nich být navázány větší výkonové úrovně, protože jsou vysoce nelineární (kvůli malé efektivní oblasti cca 20 μm^2). Proto bývají součástí tzv. dvoufázových EDFA zesilovačů [32] [49]. Sklon disperzní křivky DCF vlákna nemusí plně kompenzovat sklon přenosového vlákna a může tak docházet k akumulaci residuální disperze. Právě velikost sklonu disperzní křivky DCF vlákna je kritickým parametrem, vypovídající o kvalitě kompenzace (Obr. 11). Budou-li sklony křivek nepřizpůsobeny, může to ve WDM systémech s více kanály znamenat problém [3] [62].



Obr. 11 – Charakteristika SMF a DCF vlákna – disperzní spektrum [2]

Braggovská mřížka má tu vlastnost, že odráží určitou vlnovou délku a ostatní vlnové délky propouští. FBG moduly jsou vyráběny vypálením mřížky do jádra vlákna, díky kterým se v jádře mění efektivní index lomu. Jestliže se lineárně mění tzv. perioda mřížky (vzdálenosti mezi mřížkami), nazýváme mřížku čerpanou. Takto lze vyrobit FBG, která bude odrážet kratší („pomalejší“) vlnové délky dříve než delší („rychlejší“) vlnové délky. Tím vzniká komprese pulsu a kompenzace chromatické disperze [2] [62]. FBG mřížky jsou schopné lepší kompenzace sklonu disperzní křivky než DCF vlákna, jsou ale zase více teplotně závislé [49].

Pokud bychom byli schopni sklon disperzních křivek 100% kompenzovat, získali bychom perfektní disperzní kompenzaci pro všechny vlnové délky. To je ale velmi těžko realizovatelné a tak dochází na jednotlivých kanálech k akumulaci disperze, viz Obr. 12 (vlnová délka kanálu Ch4 je větší kanálu Ch1).



Obr. 12 – Akumulace disperze pro každý kanál, kanál 3 je plně kompenzován [3]

Nepřizpůsobení sklonu disperzních křivek DCM modulu a přenosového vlákna v rychlejších WDM systémech může způsobovat nejednotnou kompenzaci CD u jednotlivých kanálů, pokud například nebudou jednotlivé kanály dodatečně

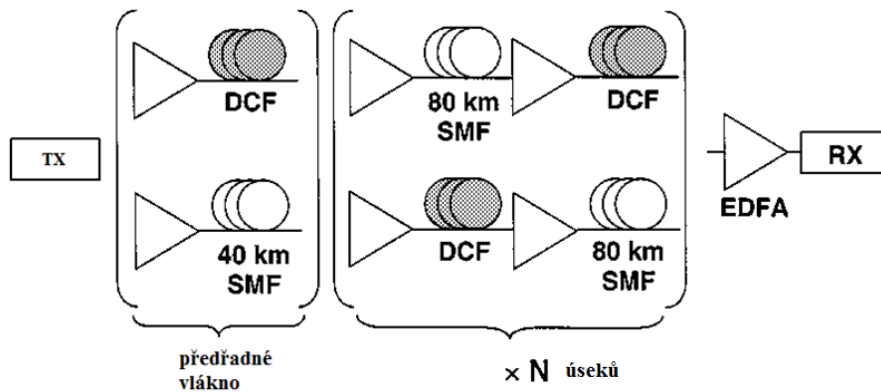
kompenzovány. Disperzní koeficient, za předpokladu známé disperze na vlnové délce 1550 nm, se pro každý kanál vypočítá:

$$D(\lambda) = D(1550) + S_0(\lambda - 1550), \quad (2-7)$$

kde D je disperzní koeficient, S je sklon disperze a λ je vlnová délka kanálu [3].

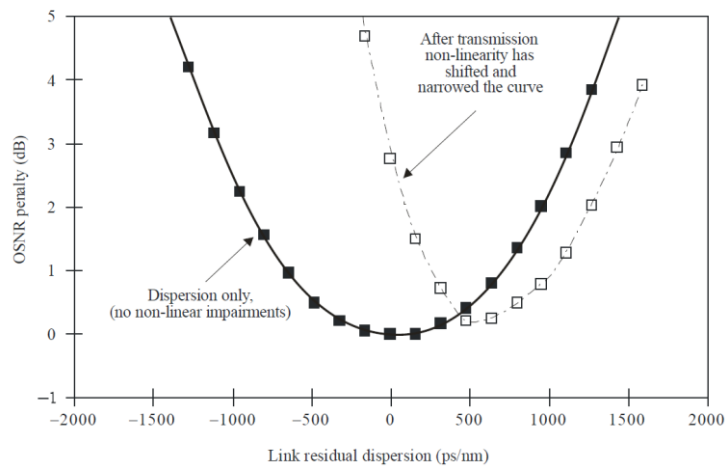
2.3.2 Kompenzace disperze

V závislosti na pozici DCM modulu rozdělujeme kompenzační schémata na pre-kompenzační (DCM modul je zapojen před SMF vláknem) nebo post-kompenzační (DCM modul je zapojen za SMF vláknem). Obě metody vykazují rozdílné chování systému [62]. Čistě post-/pre-kompenzační schémata v každém úseku plně kompenzují disperzi SMF vlákna umístěného před/za sebou. Takové plánování kompenzace disperze ale vykazuje špatné nelineární vlastnosti v důsledku vymizení odstupů (walk-off) mezi sousedními kanály [46] [47]. Na Obr. 13 je kromě klasického post-kompenzačního a pre-kompenzačního schématu zobrazena možnost zařazení předřadného DCF/SMF vlákna za vysílač.



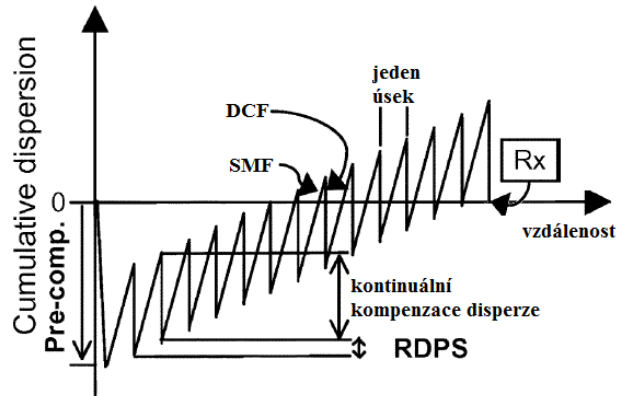
Obr. 13 – Pre-kompenzační a post-kompenzační schéma s předřadným vláknem [48]

Periodickou kompenzací podél přenosové trasy a postupným rozšiřováním spektra se optimální bod kompenzace disperze posouvá směrem ke kladným hodnotám a celkově se tolerance disperze snižuje, jak je vyobrazeno na Obr. 14 z doporučení ITU-T G.696 [7].



Obr. 14 – Efekt nelineárních jevů na toleranci disperze [7]

Disperzní mapa dle Obr. 15 s umístěným předřadným vláknem je definována parametry: pre-kompensace předřadným vláknem, RDPS (residual dispersion per span) a kontinuální kompenzací. Zavedením RDPS můžeme do vlákna navázat vyšší výkonové úrovně, protože jsou více potlačovány nelineární jevy [12] [48].



Obr. 15 – Příklad disperzní mapy s předřadným DCF vláknem [12]

2.3.3 Nelineární jevy v WDM

Nelineární jevy ve vláknové optice můžeme rozdělit na neelastické jevy, kam spadá stimulovaný Ramanův rozptyl SRS a stimulovaný Brillouinův rozptyl SBS, a na elastické (parametrické) jevy, známé také pod názvem Kerrův jev. Cílem této kapitoly není popsat komplexní a rozsáhlou problematiku nelineárních jevů, ale představit hlavní zdroj nelinearity v WDM systémech, kterým je Kerrův jev. Jestliže nelineární rušení probíhá mezi pulzy jednoho WDM kanálu, mluvíme o intrakanálových nelinearitách, naopak interkanálové (mezikanálové) nelinearity se dějí mezi dvěma a více WDM kanály [49]. Nutno upozornit, že v optickém vlákně s menší disperzí [$D < 10 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$] mají interkanálové nelinearity mnohem větší dopad než ve vlákně s větší disperzí [12].

Vznik Kerrova jevu závisí na velikosti intenzity optického záření, s kterou se mění výkonově závislý index lomu vlákna $n(\omega, I)$. Pro malé výkonové úrovně je dopad Kerrova jevu minimální, dojde-li ale k překročení určité úrovně, Kerrův jev začne hrát podstatnou roli. Příčinou je omezená efektivní oblast optických vláken pohybující se v rozmezí 20 až $110 \mu\text{m}^2$. Kerrův jev je definován Kerrovým koeficientem n_2 a jeho velikost bývá v rozmezí $2 \cdot 10^{-20}$ až $3,5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ [17] [49]. Závislost indexu lomu na optickém výkonu se spočte:

$$n = n_0 + n_2 \cdot \frac{P}{A_{eff}}, \quad (2-8)$$

kde n_2 je Kerrův koeficient a A_{eff} je efektivní oblast vlákna. Aby nedocházelo k výrazným nelineárním jevům a následné degradaci signálu v důsledku změny na intenzitě závislého indexu lomu, je potřeba vysílat na nižších výkonových úrovních nebo zvolit optické vlákno s vyšší efektivní oblastí.

Vlastní fázová modulace SPM (Self-Phase Modulation) je jeden z dopadů Kerrova jevu. SPM mění okamžitou frekvenci pulsu u náběžných a sestupných hran pulsu a dochází

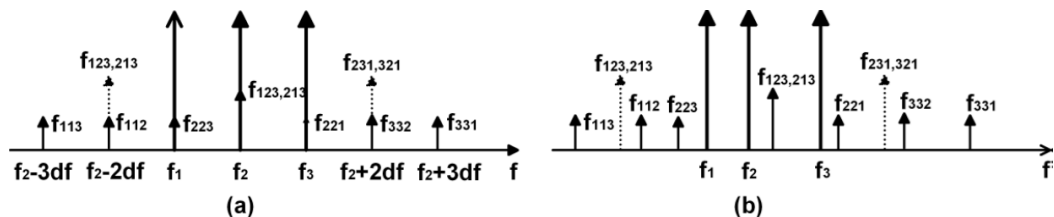
tak k frekvenčnímu čirpu. Změna se tedy děje v optické spektrální oblasti, v které se vytváří nové spektrální složky a tím se rozšiřuje celkové spektrum pulsu [2] [17].

Pod Kerrův jev také spadá křížová fázová modulace XPM (Cross-Phase Modulation). Podobně jako výkonové změny pulsu způsobovaly SPM, způsobují výkyvy výkonu sousedních kanálů v multikanálovém systému fázovou modulaci (ovlivnění průběhu fáze) zkoumaného kanálu. V časech, kdy se pulsy překrývají, může narůstat intenzita záření na takovou úroveň, že bude docházet k vzájemnému ovlivňování a tím se měnit spektrum. Míra XPM rušení je závislá na vzájemné polarizaci kanálů, nelineárním koeficientu vlákna, rozestupu kanálů a disperzi vláken. V případě stejně polarizovaných kanálů je vliv XPM největší, naopak u ortogonálně polarizovaných kanálů je vliv nejmenší. XPM vymizí při sníženém vysílacím výkonu, tím ale zkracujeme maximální překlenutelnou vzdálenost kvůli ASE šumu. XPM se také potlačí zvětšením rozestupů mezi kanály a vlákny s velkou disperzí. Signál narušený XPM jevem vykazuje kolísání zpoždění (timing jitter), kdy dochází různému příchodu optických pulsů, a amplitudové kolísání (amplitude jitter), což se projevuje fluktuacemi amplitudy signálu [2] [5].

Čtyřvlnné směšování FWM (Four-Wave Mixing) je dalším Kerrovým jevem. FWM je proces, v kterém se interakcí mezi třemi optickými zářeními s různou frekvencí generují tyto nové spektrální složky:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \quad (2-9)$$

kde f_i, j, k jsou původní frekvence, f_{ijk} je nová frekvence a platí nerovnost $i \neq j \neq k$. V systémech WDM může FWM způsobovat přeslechy a přenosy energie mezi kanály, které jsou tím intenzivnější, čím jsou výkonové úrovně kanálů větší, čím je počet kanálů větší a čím jsou rozestupy mezi kanály menší [2]. Obzvláště v systémech s rovnoměrným rozestupem mezi kanály je kvalita přenosu FWM jevem degradována, protože nově vytvořené složky se objevují na frekvencích kanálů (Obr. 16a). Zavedením nerovnoměrných rozestupů kanálů je vliv FWM omezen, nové složky vznikají mimo frekvence kanálů, viz Obr. 16b [2] [49].



Obr. 16 – FWM v systémech s a) rovnoměrnými rozestupy b) nerovnoměrnými rozestupy mezi kanály [2]

Aby ale docházelo ke vzniku FWM, musí být mezi vstupními zářeními splněna podmínka fázového souladu. Čím je fázový nesoulad větší, tím menší má FWM účinnost, protože dílčí příspěvky FWM se nemohou konstruktivně sčítat. S rostoucí disperzí roste fázový nesoulad a už i při nenulové disperzi je velmi obtížné splnit zmiňovanou podmínku [5] [15]. To znamená, že vhodným plánováním disperzní mapy lze potlačit FWM a že SSMF vlákna si vedou z hlediska FWM lépe než NZ-DSF vlákna, hlavně v systémech velmi velkým počtem kanálů.

3 Simulační metoda

3.1 TDSS metoda

Program OptSim od firmy Synopsys' RSoft, kterým byly zpracovány všechny simulace, provádí simulaci optického systému metodou dělení kroku v časové doméně TDSS (Time Domain Split-Step) využívající k výpočtu šíření optického signálu rovnice:

$$\frac{\partial A(t, z)}{\partial z} = \{L + N\}.A(t, z), \quad (3-1)$$

kde $A(t, z)$ je intenzita optického pole, L je lineární operátor zodpovědný za disperzi a další lineární jevy a N je nelineární operátor zastupující Kerrův jev a další nelineární jevy jako např. SRS [28]. Algoritmus funguje tak, že postupně po malých usecích Δz aplikuje nezávisle na sobě lineární a nelineární operátory L a N .

TDSS metoda počítá, na rozdíl od méně přesné FDSS metody (Frequency Domain Split-Step), optické pole $A(t, z)$ s operátorem L v časové doméně jako konvoluci:

$$A_L[n] = A[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A[k].h[n - k], \quad (3-2)$$

kde $h[n]$ je impulsní odezva operátoru L .

3.2 Optické prvky a modely

V programu OptSim jsou obsaženy jak samostatné základní optické komponenty, tak už sestavené a předdefinované modely. Sestavených modelů je zde celá řada, v knihovně lze vybírat z palety optických vysílačů s různými modulačními formáty, optických přijímačů, optických zesilovačů, přenosových vláken s přednastavenými parametry dle ITU-T doporučení a dokonce i dle parametrů některých známých výrobců optických vláken, atd. V případě, že v seznamu nenalezneme požadovaný model, je možné si ho ze základních optických bloků sestavit. Většina bloků, pokud se nejedná o koncový prvek, disponuje vstupními a výstupními porty sloužícími ke vzájemnému propojení s ostatními bloky. Jsou definovány tři typy vstupů/výstupu – logický, elektrický a optický. Například spojením několika bloků lze sestavit přijímač P-DPSK modulace, který se v seznamu vytvořených modelů nevyskytoval. Každý model či blok obsahuje nabídku s vlastním nastavením, kam se zadávají požadované parametry. V rámci zachování přehlednosti OptSim umožňuje sloučení více bloků do tzv. „složené hierarchické struktury“, která zároveň šetří místo ve schématické zobrazení celého systému. To například umožňuje složení osmi vysílačů do zdánlivě jednoho bloku. Dalším zjednodušením je vytváření iterační smyčky ze zvolených bloků. Iterační smyčka se používá v případech, kde je potřeba zvolenou část opakovat. Tím jsou například úseky přenosových vláken. Bohužel parametr (počet opakování) iterační smyčky nelze zvolit v parametrické analýze jako proměnnou a tak musí být vždy počet opakování přenastaven ručně.

3.3 Analýza a vyhodnocení

3.3.1 Chybovost BER

Vyhodnocení chybovosti BER (Bit Error Rate) je přímočará a relativně jednoduchá metoda ke zhodnocení kvality přenosu, založená na poměru přijatých chybných bitů ku celkovému počtu přijatých bitů:

$$BER = \frac{N_{chyb}}{N_{celk}}, \quad (3-3)$$

kde N_{chyb} je počet chybných bitů a N_{celk} je celkový počet přijatých bitů. Dle doporučení ITU-T nesmí být hodnota BER přijímaného signálu menší než 10^{-12} . Pro takto malé hodnoty je ale měření v reálných případech časově náročné a zavádí se chybovost BER se spolehlivostním interval.

3.3.2 Q-faktor

Dalším důležitým srovnávacím parametrem je Q-faktor. Na rozdíl od BER ho lze velmi jednoduše změřit. Q-faktor je definován:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3-4)$$

kde μ_1 , μ_0 jsou průměrné hodnoty logických úrovní 1 a 0 a σ_1 , σ_0 jsou standardní odchylky logických úrovní 1 a 0. Ve většině případů bude v práci sledován právě Q-faktor a ne OSNR, protože XPM a SPM nejsou v optické doméně měřitelné [32].

Z Q-faktoru lze aproximační metodou získat přibližnou hodnotu BER [17]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}}. \quad (3-5)$$

3.3.3 OSNR

Parametrem OSNR se rozumí poměr optického výkonu signálu P_S ku výkonu šumu P_N v mW:

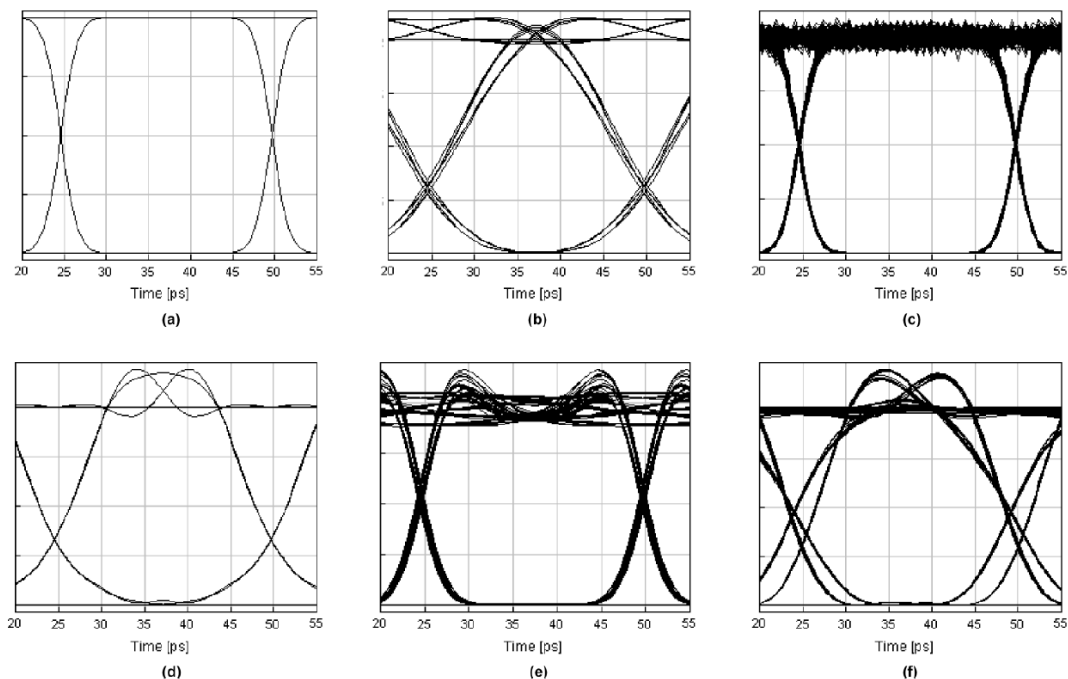
$$OSNR = 10 \log \left(\frac{P_S}{P_N} \right). \quad (3-6)$$

Optický šum okolo signálu redukuje schopnost přijímače správně detekovat přijímaný signál. Dominantním zdrojem šumu jsou zesilovače signálu a záleží na jejich počtu, rozmístění a tvaru zesilující křivky [16]. Tento jev lze potlačit zařazením optického filtru před přijímač.

Z OSNR parametru ale nejsme např. schopni zjistit velikost XPM a SPM, neboť jejich vliv není měřitelný v optické doméně a k odhalení jejich působení dochází až po převodu na elektrický signál [32].

3.3.4 Diagram oka

Hodnotící kritéria jako BER, Q-faktor a OSNR přímo neříkají, který jev stojí za případnou degradací systému. Diagram oka reprezentuje průběh signálu, který bychom pozorovali na osciloskopu, a je vytvořen superpozicí přijatých bitů. Je to dobrý způsob, jak odhalit některé negativní jevy zhoršující přenosové vlastnosti systému. Diagram oka nijak nerušeného signálu je na Obr. 17a.



Obr. 17 – Poruchy oka rozhodnutí kvůli různým vlivům: a) bez porušení b) úzkopásmová filtrace c) ASE šum d) CD e) intra-kanálové nelinearity f) inter-kanálové nelinearity [2]

Negativní jevy způsobují narušení ideálního průběhu diagramu oka, např. poruchu způsobenou úzkým filtrováním, která může zapříčinit rozšiřování pulsu a tak vznik ISI (Intersymbol Interference) - Obr. 17b, nebo zašumění signálu nahromaděným se ASE šumem Obr. 17c. Akumulací chromatické disperze dochází k rozšíření pulsu v různých úrovních signálu Obr. 17d. Intra-kanálové nelinearity (SPM) se projevují symetrickými fluktuacemi v oblasti nástupné a sestupné hrany Obr. 17e, nelineární jevy mezi kanály (např. XPM) vykazují asymetrické výkyvy spojené s časovým a amplitudovým jitterem objevující se v diagramu oka Obr. 17f [2].

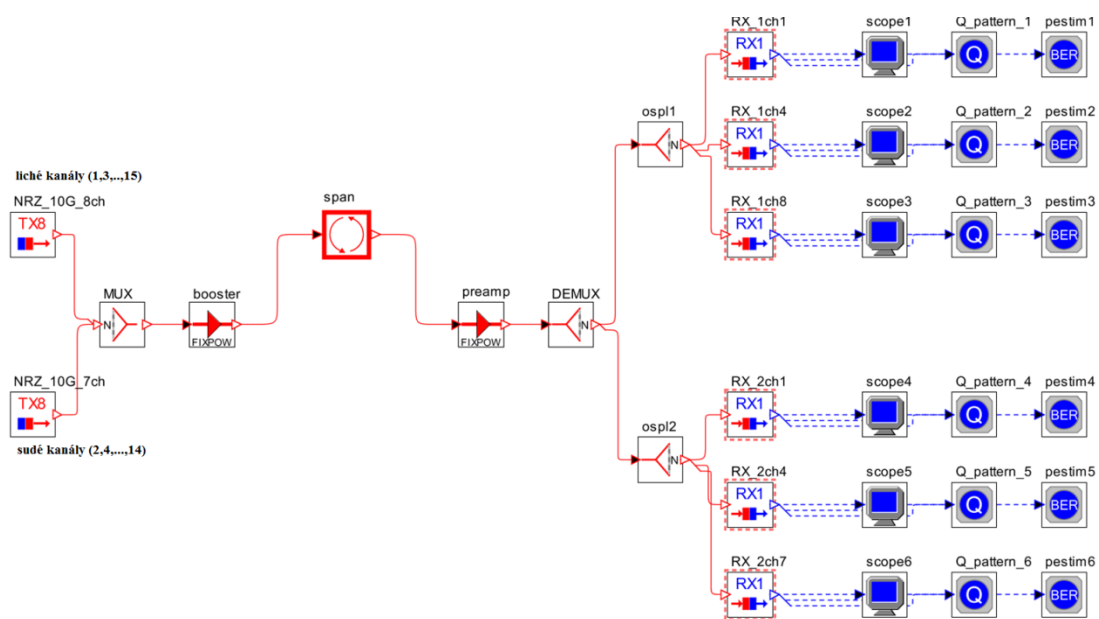
Čím je oko otevřenější, tím je systém méně degradován a dosahuje lepších výsledků. Místo největšího otevření se považuje za nejlepší okamžik k vzorkování signálu.

4 Simulace a výsledky

4.1 Návrh výchozího systému

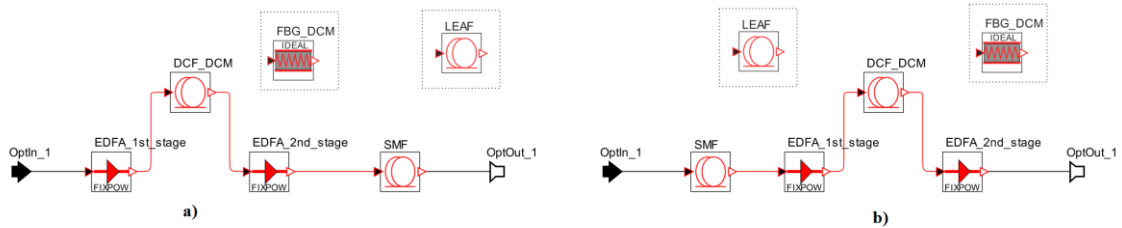
V následujících simulacích bude uvažován výchozí 10G systém, z kterého se při zkoumání koexistence 10G a 40G (případně 100G) systémů bude vycházet. Volba výchozího 10G systému plyne z reálné situace, s kterou se dnešní provozovatelé optických sítí potýkají, chtějí-li navýšit přenosovou rychlost systému, tedy přejít z 10G na 40G (100G). Logickým a ekonomicky přijatelným krokem pro operátory je plynulý přechod k rychlejším kanálům, kdy je ale zároveň zachováno co největší množství z infrastruktury existujícího systému, nejčastěji právě systému 10G.

Konfiguraci výchozího 6x80 km 15x10G systému zobrazuje Obr. 18. Systém se skládá z 15 OOK-NRZ vysílačů, které jsou tvořeny zdrojem dat s pseudonáhodnou posloupností o rychlosti 10 Gbps, CW laserem a externím MZM modulátorem. Kanály jsou vizuálně rozděleny do dvou skupin na sudé a liché. Rastr kanálů je 50 GHz v rozsahu 193,1 THz (1. kanál) až 193,8 THz (15. kanál), v souladu s frekvencemi dle doporučení ITU-T G.694.1. Za každým vysílačem se nachází optický filtr s šířkou pásma odpovídající rozestupu kanálů. Multiplexovaný optický signál je zesílen booster zesilovačem a prochází recirkulační smyčkou, skládající se z dvoufázového zesilovače s plochým zesílením a šumovým číslem 3,5 či 4,5 dB, 80 km přenosového vlákna a DCM. Počet recirkulací je nastaven na hodnotu 6, tedy na uvedenou vzdálenost 6x80 km. Na přijímací straně je signál zesílen a zkoumané kanály jsou po vydělení optickými filtry s centrální optickou frekvencí příslušného kanálu detekovány přijímači. Přijímače se skládají z fotodiody PIN, elektrického filtru a vyhodnocovacích bloků. Další důležité parametry systému budou dále diskutovány, zbylé (méně podstatné) parametry jsou dohledatelné v simulačních souborech.



Obr. 18 – Výchozí topologie 15x10G systému

Detailnější pohled na složení recirkulační smyčky poskytuje Obr. 19. Složení smyčky se liší v závislosti na typu kompenzace, použitého přenosového vlákna a DCM modulu.



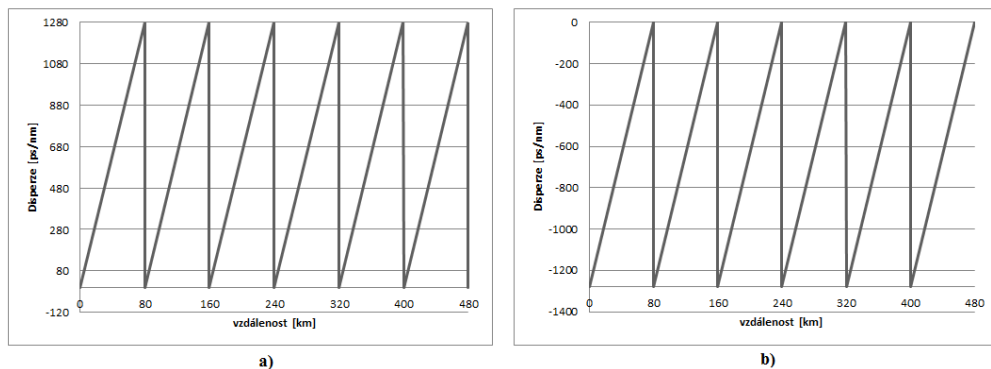
Obr. 19 – Recirkulační smyčka – a) pre-kompensace b) post-kompensace

Parametry SMF a DCF vlákn (na referenční vlnové délce 1550 nm) jsou uvedeny v tabulce Tab. 2 [2] [3] [28]. Délka 80 km SMF vlákna je ponechána u všech simulací konstantní, délka DCF vlákna se ve speciálních případech bude měnit, jinak uvažují plnou kompenzaci, která v případě neměnné délky SMF vlákna znamená také konstantní délku.

Tab. 2 – Parametry SMF a DCF vláken

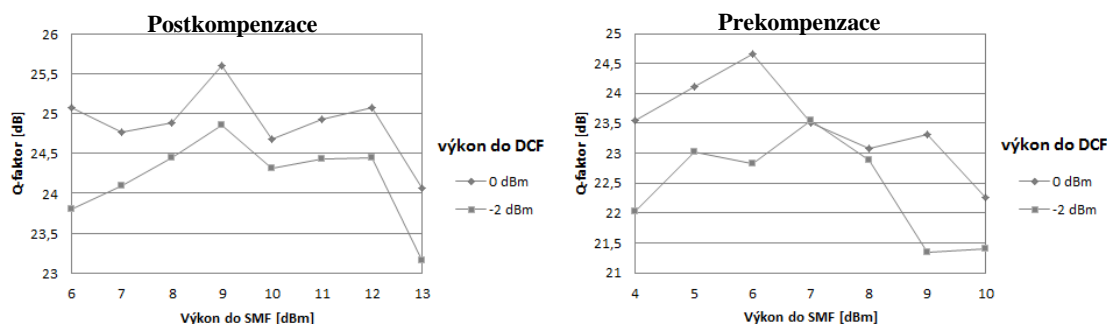
Parametr	SMF	DCF
Délka vlákna [km]	80	16
Útlum [dB.km ⁻¹]	0,19	0,41
Disperze vlákna [ps.nm ⁻¹ .km ⁻¹]	16	-80
Sklon disperzní křivky [ps.nm ⁻² .km ⁻¹]	0,07	-0,2
Efektivní oblast [μm ²]	80	20
Koeficient PMD [ps.km ^{-1/2}]	0,1	0,1

V rámci návrhu referenčního 10G systému je nejprve potřeba zjistit na jakých výkonových úrovních bude systém pracovat. Šetření provádím v souladu s [48] pro čisté post-kompenzační a pre-kompenzační schémata s 80 km úseky SSMF vlákna. Disperze je v každé smyčce plně kompenzovaná přilehlým DCF vláknem, viz Obr. 20. Útlum je kompenzován dvoufázovým zesilovačem, který navíc umožňuje navázat různý vstupní výkon do SMF a DCF vláken [50].



Obr. 20 – a) post-kompenzační schéma b) pre-kompenzační schéma (pro 1550 nm)

Výsledky simulace pro obě kompenzační schémata 7. kanálu (193,4 THz) a proměnný vstupní výkon do SMF a DCF vlákna jsou vidět na Obr. 21.



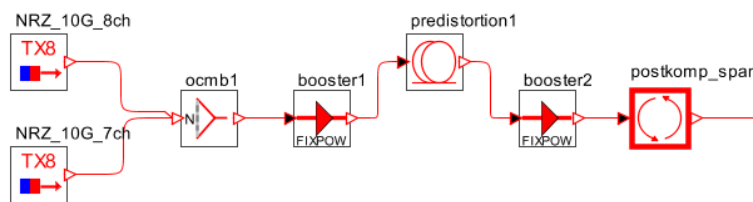
Obr. 21 – Q-faktor pro různý vysílací výkon do SMF a DCF (7. kanál)

Post-kompenzační schéma dovoluje do SMF vlákna navázat větší úroveň vstupního výkonu, až 9 dBm, než je tomu v případě pre-kompenzace, pouze 6 dBm, u které se ještě musel snížit rozsah testovaných výkonů v SMF vlákne. Zároveň pre-kompenzace dosahuje větší hodnoty Q-faktoru. Optimální vstupní výkon do DCF vlákna je pro oba případy 0 dBm. V Tab. 3 jsou shrnuty Q-faktory sledovaných kanálů. Sedmý kanál (193,4 THz) má horší Q-faktor, protože je obklopen ostatními kanály, je větší pravděpodobnost, že bude více narušený než krajní kanály, proto se budu v dalších simulacích odvolávat hlavně na něj. Je patrné, že pre-kompenzační schéma je horší. Přesto na všech kanálech pro oba případy je chybovost BER menší než 10^{-40} .

Tab. 3 – Hodnoty Q-Faktoru zkoumaných kanálů

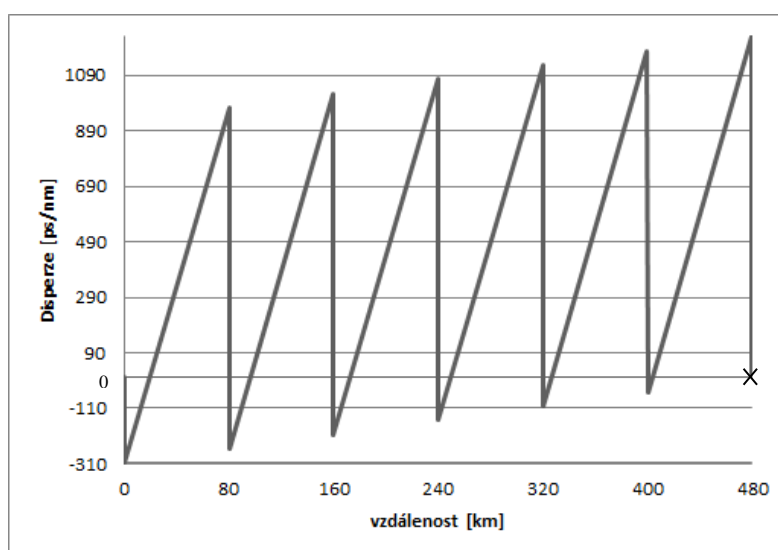
Kanál	Q-Faktor [dB]	
	Pre-kompenzace	Post-kompenzace
1	24,92	26,73
7	24,45	25,60
15	24,71	26,57

Zařazením úseku DCF vlákna za vysílač v post-kompenzačním schématu podle [48] dojde k účinnějšímu potlačení nelineárních jevů (XPM) včetně interkanálových, a do SMF vláken je možné navázat větší vstupní výkon (výkon do DCF vláken zůstává na 0 dBm). Touto úpravou disperzního plánování vzniká v systému RDSP a je narušena periodicitá kompenzace, viz Obr. 15 a Obr. 22. Simulaci jsem provedl pro post-kompenzační schéma, které v předchozím případě vykazovalo vyšší hodnoty Q-faktoru. Zjistí uji optimální velikost „předřadné“ disperze v rozsahu od -460 ps/nm do 0 ps/nm (neboli 94% až 100% kontinuální kompenzace v recirkulační smyčce, tzv. podkompenzace) [2].



Obr. 22 – Ukázka zařazení kratšího úseku DCF vlákna za vysílač

Nejlepších výsledků dosahují s disperzním plánováním na Obr. 23, je zde předřadné DCF vlákno o celkové disperzi -307 ps/nm umožňující navýšení výkonu do SMF vlákna na 11 dBm, aniž by došlo ke vzniku nelineárních jevů. Podkompenzace v recirkulační smyčce je tedy na hodnotě 96%, to se přibližně rovná -1228 ps/nm.



Obr. 23 – Úprava plánování disperze předřadným DCF

Pro tento případ disperzního plánování detekují zlepšení Q-faktoru 7. kanálu o 0,34 dB, naměřené hodnoty sledovaných kanálů je v Tab. 4.

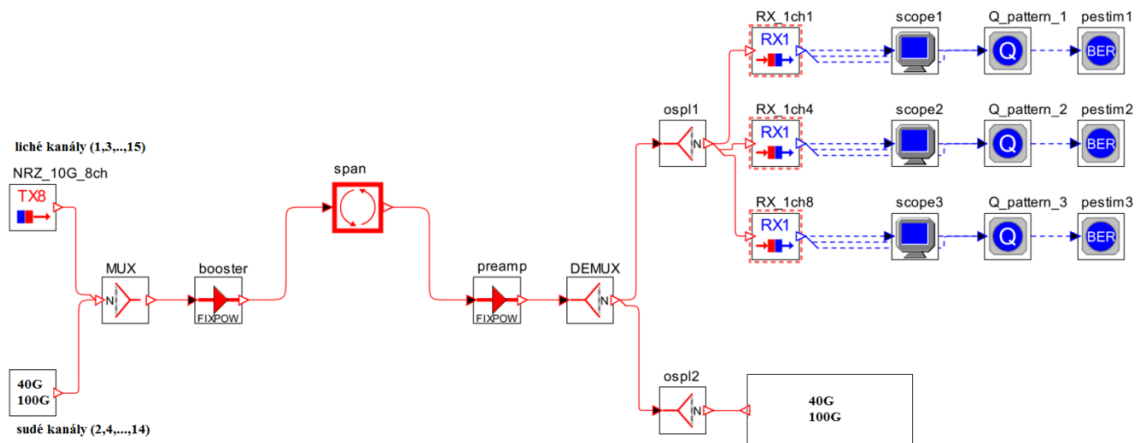
Tab. 4 – Hodnoty Q-Faktoru upraveného plánování disperze

kanál	Q-Faktor [dB]
1	27,20
7	25,94
15	27,38

4.2 Koexistence systémů

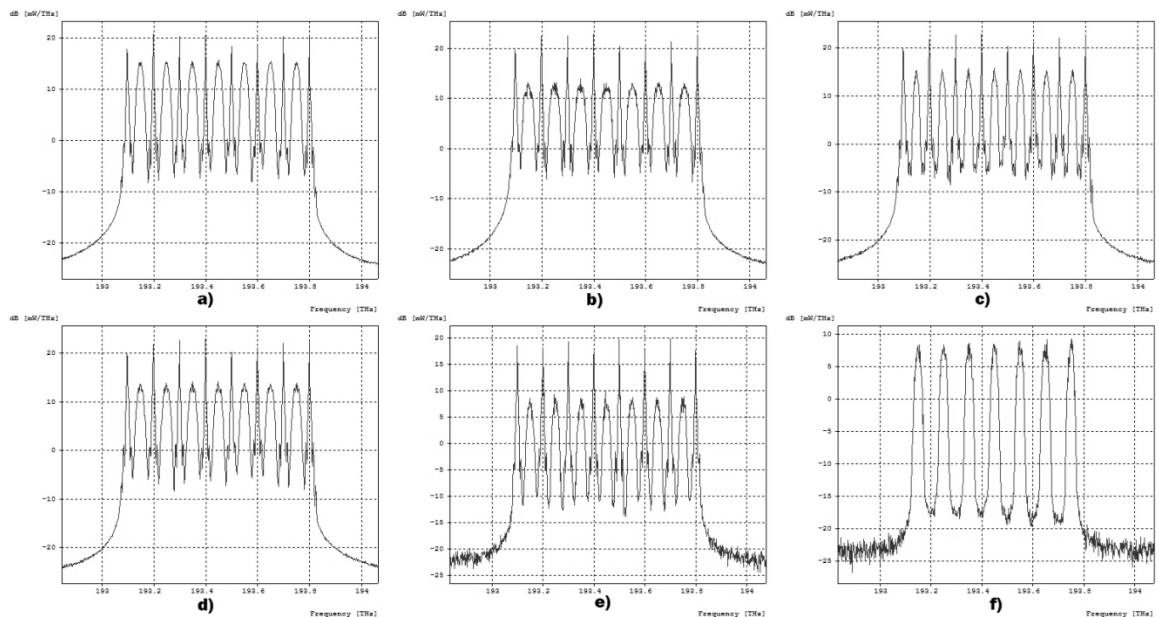
Ke zkoumání hybridních systémů 10G/40G a 10G/100G využijí navrhnutého 10G systému, z kterého budou simulace vycházet. Jak ilustruje Obr. 24, původní sudé kanály s rychlostí 10 Gbps jsou nahrazeny 40 Gbps kanály (100 Gbps), které používají vysílače s pokročilými modulačními formáty, konkrétně se jedná o modulace duobinární, P-DPSK, DQPSK a RZ-DQPSK (PM-QPSK). Popis modulací včetně skladby vysílačů a přijímačů je

k naleznutí v kapitole 2.2. Za vysílači a před přijímači se jako v předchozím případě vyskytuje optický filtr, zabraňující prvotní degradaci kanálů v důsledku překryvu spekter a vzniku přeslechů (napodobení AWG). Původní rastr 50 GHz je zachován a nebude-li řečeno jinak, zůstávají nezměněny i ostatní parametry. Nahrazení sudých kanálů si lze představit jako prokládání (multiplexování) kanálů dvou optických systémů s rozstupem 100 GHz, které mají vůči sobě offset 50 GHz [4].



Obr. 24 – Schéma hybridního optického systému

Lepší představu o plánování rozmístění kanálů získáme pohledem na vzniklé optické spektrum. Obr. 25 (detailněji v „Příloha A“) zobrazuje optická spektra všech uvažovaných modulací. Na obrázku jsou pro zajímavost u PM-QPSK odděleny roviny polarizace, kde v rovině y se nevyskytují 10G signály, které vysílají pouze v polarizační rovině x. Kanály s P-DPSK modulací jsou v porovnání s ostatními modulacemi více rozprostřeny ve spektru a proto je pro ně důležitá izolace jednotlivých kanálů optickými filtry na vysílači/přijímači [45].



Obr. 25 – Optické spektrum hybridního systému s modulací: a) duobinární, b) P-DPSK, c) DQPSK, d) RZ-DQPSK, e) PM-QPSK (x-polarizace) f) PM-QPSK (y-polarizace)

Nejprve představím výsledky pro případ, kdy pouze proběhla výměna 10G kanálů za 40G kanály, ale nedošlo k žádné úpravě parametrů, kromě samotných prvků 40G kanálu. Zachováno tak zůstalo kompenzační schéma disperze, vysílací výkon do SMF a DCF vlákna (10G a 40G kanály mají stejný optický výkon) a rastr kanálů. Porovnám mezi sebou 40G kanály s NRZ a RZ variantou DQPSK modulace a pro další úvahu vyberu vhodnější variantu. Dle [12] a [52] se předpokládá, že si lépe povede varianta RZ, neboť DQPSK je rušeno především skrz XPM a RZ je vůči nelineárním jevům odolnější.

Tab. 5 – Sloučení 10G systému se 40G kanály

40G duobinární						
kanál	post-kompence		pre-kompence		96% kompence	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
2	16,20	0,59E-10	15,06	0,14E-07	16,28	0,27E-10
8	15,88	0,17E-09	14,89	0,18E-07	16,42	0,15E-10
14	16,08	0,77E-10	15,60	0,13E-08	16,07	0,84E-10

40G P-DPSK						
kanál	post-kompence		pre-kompence		96% kompence	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
2	20,17	0,40E-23	18,29	0,17E-15	20,58	0,13E-24
8	20,12	0,37E-22	18,03	0,19E-14	20,34	0,13E-24
14	20,55	0,10E-25	18,53	0,39E-16	20,57	0,33E-25

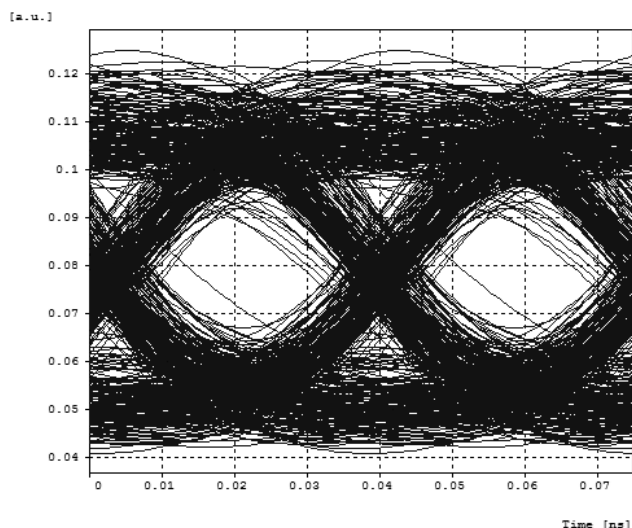
40G DQPSK						
kanál	post-kompence		pre-kompence		96% kompence	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
2	17,28	0,14E-12	16,37	0,28E-10	16,40	0,24E-10
8	17,25	0,29E-12	15,95	0,30E-09	16,55	0,38E-10
14	16,69	0,47E-11	15,97	0,16E-09	15,88	0,27E-09

40G RZ-DQPSK						
kanál	post-kompence		pre-kompence		96% kompence	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
2	19,39	0,36E-19	18,46	0,16E-15	19,69	0,37E-20
8	19,42	0,99E-20	18,03	0,17E-14	19,44	0,15E-19
14	19,67	0,50E-21	18,26	0,23E-15	19,33	0,35E-19

V tabulce jsou uvedeny hodnoty Q-faktoru a chybovosti BER sledovaných 40G kanálů (v případě, že výstup obsahuje kvadrurní a soufázovou složku, vynáším vždy soufázovou složku, jestliže se od kvadrurní složky neliší svým Q-faktorem o víc než 0,5 dB). Pre-kompensační schéma ve všech případech, podobně jako na výchozím 10G systému, trpí větší chybovostí v porovnání s jinými typy kompenzace. Proto už dále pre-kompensaci nebudu uvažovat. Nejhorší výsledky Q-faktoru a BER jsou pozorovány u duobinární modulace. Chybovost BER je pod limitní hodnotou 10^{-12} , kterou doporučuje ITU-T dodatek G.39 [3]. Zda se jedná o silné inter-kanálové rušení od 10G OOK-NRZ

kanálů nebo o vliv inra-kanálových nelinearit bude zkoumáno v dalších kapitolách. DQPSK kanály, kromě 14. kanálu, těsně splňují limitní hodnotu BER, ale změnou disperzního plánování na 96% kontinuální kompenzaci na rozdíl od ostatních modulací dojde ke zhoršení kvality systému. RZ varianta DQPSK modulace díky vyšší toleranci nelineárních jevů má chybovost mezi 10^{-19} a 10^{-21} , která je více než dostačující. Je potvrzeno, že RZ varianta DQPSK modulace si vede lépe než NRZ. Nejvhodnější modulací se ale v tomto bodě jeví P-DPSK, neboť ve všech situacích s velkou rezervou splňuje stanovené limity chybovosti.

Vložení 100G kanálů s modulací PM-QPSK do 10G systému proběhlo za stejných podmínek jako vkládání 40G kanálů. Avšak na koherentním 100G kanálovém přijímači s elektronickým vyhodnocením signálu pomocí DSP s CMA a Viterbi-Viterbi algoritmem byla detekována nulová chybovost. Protože koherentní přijímač s DSP procesorem umožňuje zároveň digitální kompenzaci disperze a chybovost nelze už v podstatě dále nijak zlepšovat, bude PM-QPSK z následujících simulací vypuštěna, neboť vyžaduje odlišný pohled než 40G kanály bez koherentního příjmu. Na Obr. 26 je ukázka diagramu oka (čas běhu simulace byl zkrácen, aby oko rozhodnutí bylo více zřetelné), který je dále zpracováván a vyhodnocován koherentním přijímačem.



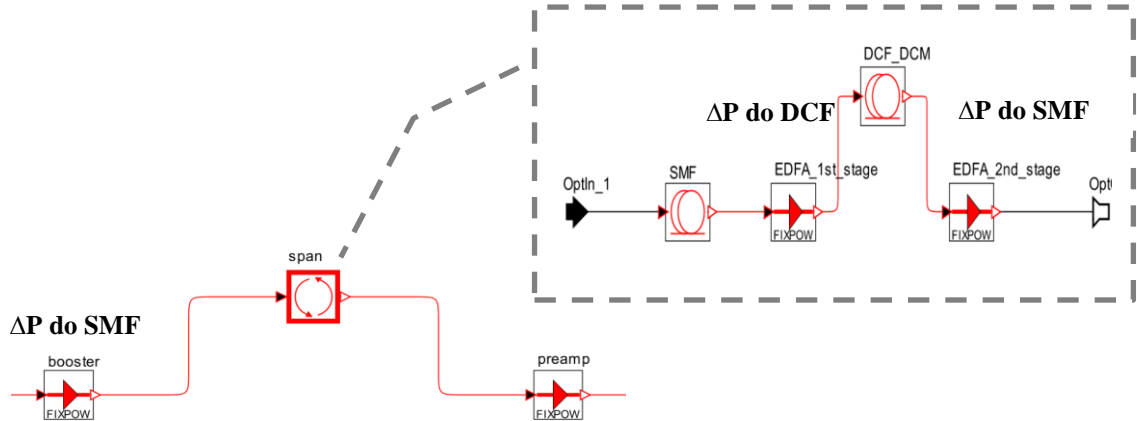
Obr. 26 – Diagram oka PM-QPSK před zpracováním koherentním přijímačem

Výsledků využijí v následujících kapitolách, kde bude koexistence systémů detailněji prozkoumána z hlediska vysílacích výkonů, rozestupů mezi kanály, kompenzace disperze a dalších případů.

4.2.1 Výkonové úrovně

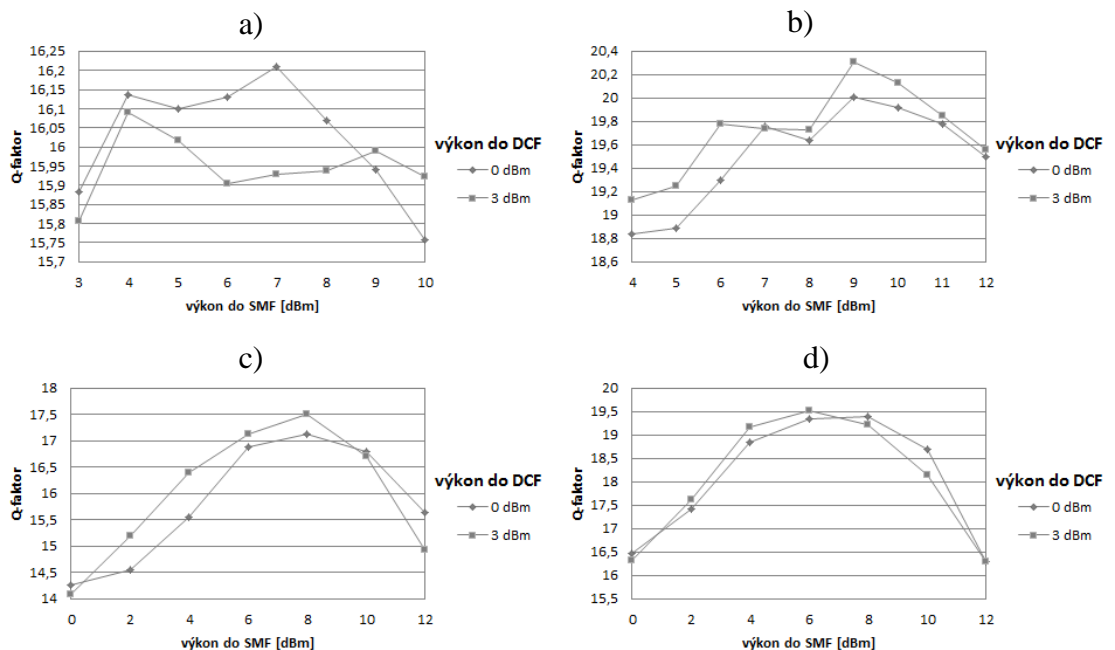
Optimální velikost vysílacích výkonů čistě 10G systému nemusí zároveň být optimální i pro hybridní 10G/40G systém a jejich úpravou je možné omezit nelineární jevy, které mají negativní dopad na kvalitu přenosu. V této kapitole je uvažováno pouze post-kompenzační schéma. V první fázi testu jsem sledoval, jak se se změnou vstupního výkonu do SMF a do DCF vlákna mění Q-faktor detekovaný 40G přijímači. Tuto změnu provádím úpravou parametru fixního výkonu patřičných zesilovačů umístěných před SMF a DCF vláknem, viz Obr. 27. Konkrétně v post-kompenzačním schématu výkon

výkonového zesilovače a druhá fáze dvoufázového zesilovače jsou zodpovědné za navázání signálu do SMF vlákna. První fáze dvoufázového zesilovače určuje velikost navázaného výkonu do DCF, toho je v praxi dosaženo například umístěním útlumových článků VOA [51]. Ztráty jsou po celé trase plně kompenzovány. Výstupní výkony 10G a 40G kanálů jsou nastaveny na stejnou úroveň.



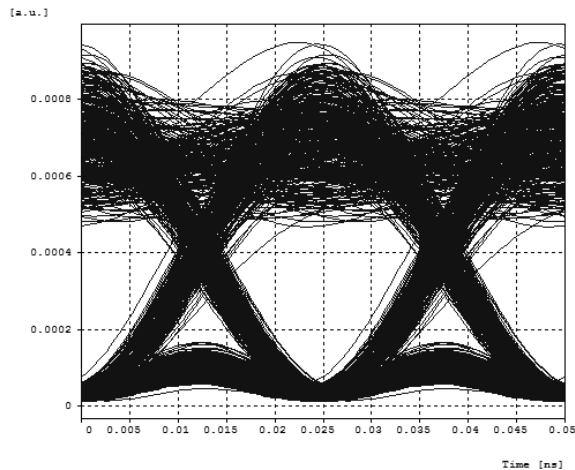
Obr. 27 – Změna výkonu v post-kompenzačním schématu

Rozsah výkonu zesilovačů umístěných před SMF vlákny měním v závislosti na typu modulačního formátu 40G kanálů. Vstupní úroveň výkonu do DCF vlákna může být nastaven na maximálně 3 dBm podle ITU-T dodatku G.39, omezí se tak nelineární jevy v DCF vlákne [3]. Změna Q-faktoru nejrušenějšího kanálu 8. kanálu na změně výkonových úrovní je na Obr. 28.



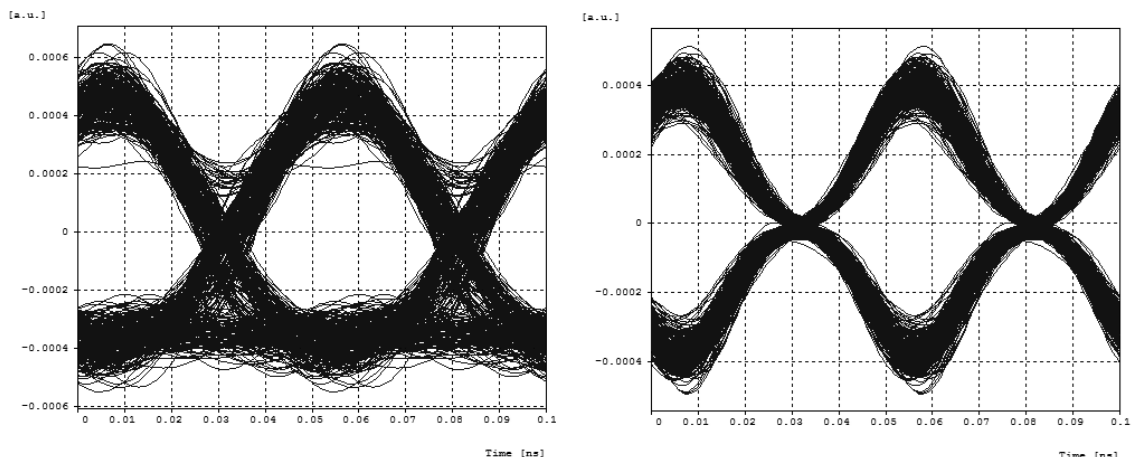
Obr. 28 – Změna Q-faktoru v závislosti na výkonu do SMF a DCF: a) duobinární b) P-DPSK c) DQPSK d) RZ-DQPSK

Pouhá změna výstupního výkonu zesilovačů na trase neznamenala pro 40G kanály výrazné zlepšení v porovnání s hodnotami z Tab. 5. Pro všechny 40G kanály kromě případu s duobinární modulací vychází lépe změna výkonu na 3 dBm do DCF vlákna. Naopak nárůst výkonu z 0 dBm na 3 dBm do DCF vlákna u duobinární modulace znamená degradaci intra-kanálovými nelineárními jevy, porovnáme-li oko rozhodnutí z Obr. 29 a obrázek Obr. 17.



Obr. 29 – Diagram oka – duobinární; vstupní výkony 7 dBm do SMF a 3 dBm do DCF

Na obrázku Obr. 28 jsou vidět typické průběhy, kdy malý vstupní výkon SMF vlákna znamená nízké OSNR a jeho velmi vysoké hodnoty způsobí vznik nelinearit, oboje způsobuje pokles Q-faktoru. NRZ a RZ varianty DQPSK mají velmi podobné průběhy, avšak RZ pro podobné vstupní SMF výkony stále vykazuje lepší Q-faktor, proto v dalších simulacích bude DQPSK zastoupena pouze RZ variantou. Oka rozhodnutí s nejlepšími Q-faktory obou variant jsou pro porovnání na Obr. 30.



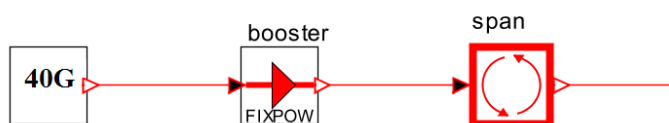
Obr. 30 – Diagram oka, porovnání NRZ-DQPSK a RZ-DQPSK (soufázová složka)

Úpravou vysílacích výkonů do SMF a DCF vlákna s ohledem na Obr. 28 dostáváme pro 40G kanály s duobinární, P-DPSK a RZ-DQPSK modulací hodnoty uvedené v tabulce Tab. 6, kde vysílací výkon do DCF byl 3 dBm kromě duobinární modulace s 0 dBm a výkon navazovaný do SMF byl 7 dBm, 9 dBm a 6 dBm postupně pro duobinární, P-DPSK a RZ-DQPSK modulaci.

Tab. 6 – Výsledné hodnoty po úpravě výkonových úrovní

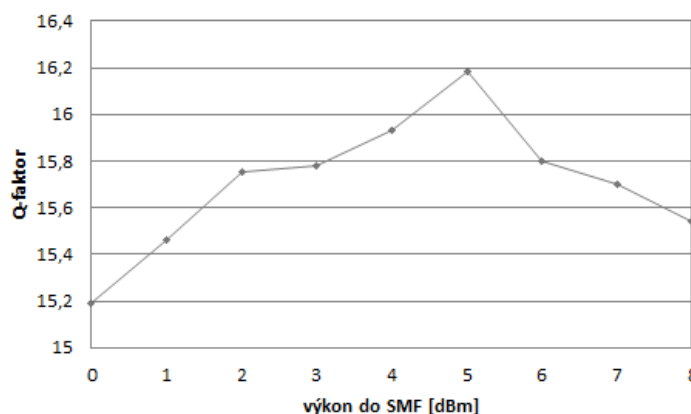
kanál	Duobinární		P-DPSK		RZ-DQPSK	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
2	16,36	0,21E-10	20,83	0,36E-26	19,73	0,14E-20
8	16,21	0,89E-10	20,31	0,25E-24	19,52	0,28E-20
14	16,42	0,13E-10	21,33	0,33E-30	19,77	0,23E-21

„Vypnutím“ (odstraněním) 10G kanálů ve zkoumaném systému odhalí, jak velký vliv mají 10G kanály na zkoumané kanály s rychlostí 40 Gbps. Modifikaci vysílací strany ilustruje Obr. 31. Jedná se o čistý 40G systém.



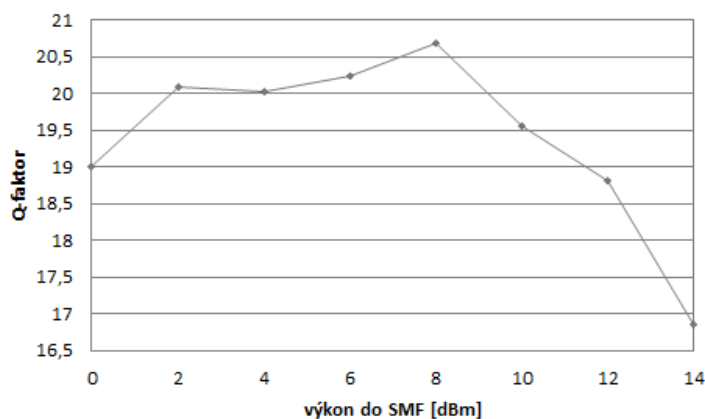
Obr. 31 – „Vypnutí“ 10G kanálů

Z důvodu menšího počtu kanálů je do DCF vysílán optický signál o výkonu 0 dBm. Výsledky simulace 40G duobinárního systému s vypnutými 10G kanály lze vyčíst z Obr. 32. Optimální vstupní výkon do přenosového SMF vlákna klesl o 2 dB na 5 dBm oproti stavu se zapnutými 10G kanály z Obr. 28. Q-faktor odpovídá hodnotě 16,2 dB. Přesto ani po odstranění 10G vysílačů čistý duobinární systém nedosahuje chybovosti BER 10^{-12} , ale pouze $8 \cdot 10^{-11}$. Je to důkaz toho, že duobinární modulace je více ovlivněna inter-kanálovými jevy než sousedními 10G kanály [53].

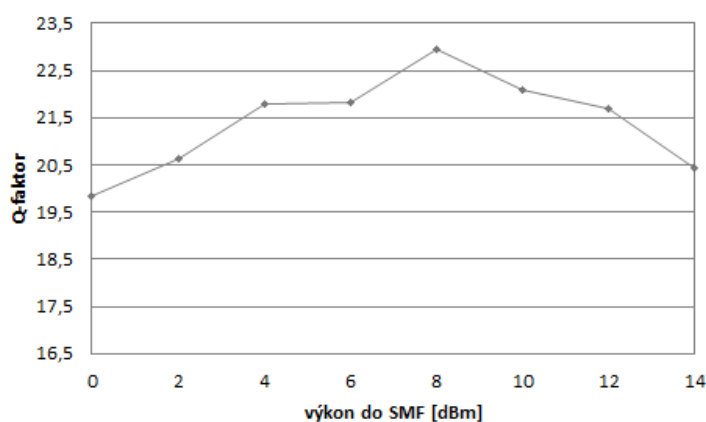


Obr. 32 – čistý 40G duobinární systém

Vypnutí 10G vysílačů přineslo podstatné zlepšení RZ-DQPSK kanálů, viz Obr. 34. Srovnáním Q-faktoru RZ-DQPSK (Obr. 34) a P-DPSK (Obr. 33) na optimalizovaných vysílacích výkonech kanálů zjistíme, že Q-faktor RZ-DQPSK má přibližně o 2 dB vyšší hodnotu. Chybovost RZ-DQPSK je dokonce menší než 10^{-40} , zatímco chybovost P-DPSK je „pouze“ $2 \cdot 10^{-27}$. Z toho lze usuzovat, že nelineární jevy (hlavně jev XPM) pocházející od 10G kanálů mají na 40G RZ-DQPSK mnohem větší vliv než je tomu v případě P-DPSK [12] [45].

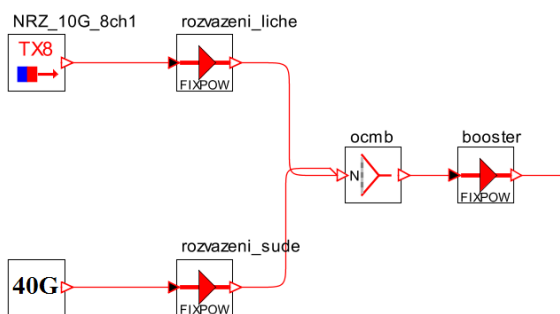


Obr. 33 – čistý 40G P-DPSK systém



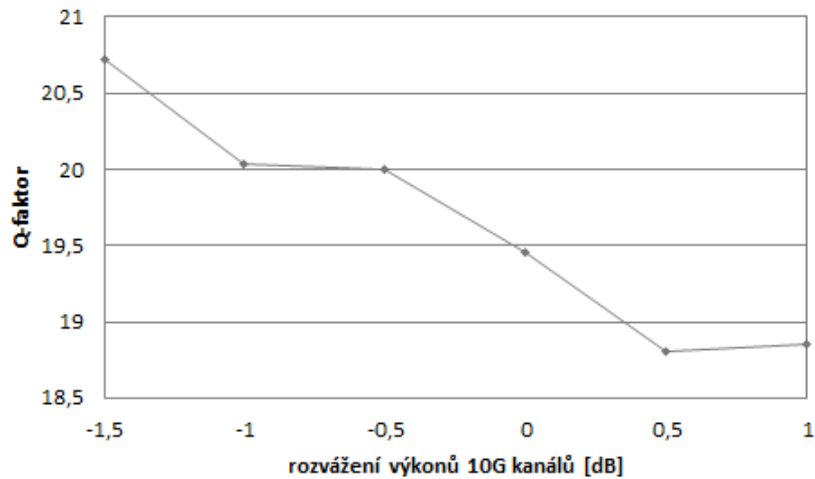
Obr. 34 – čistý 40G RZ-DQPSK systém

Protože 40G RZ-DQPSK kanály jsou nejvíce ovlivněné 10G OOK-NRZ kanály, zkusil jsem mezi nimi změnit výkonové poměry a zjistit dopad relativního rozvážení této změny na kvalitu přenosu 40 Gbps a 10 Gbps signálu. Na Obr. 35 je konfigurace vysílací části s rozvažujícími zesilovači lichých (10G) a sudých (40G) kanálů, kterých se změna parametrů týká. Relativním rozvážením rozumíme změnu poměru vysílacího výkonu mezi 10G a 40G kanály, kdy např. rozvážení o 1 dB znamená, že vysílací výkon 40G kanálů je o 1 dB vyšší než 10G kanálů (40G kanály mají výkon 3 dBm a 10G kanály 2 dBm).



Obr. 35 – Změna výkonových poměrů kanálů

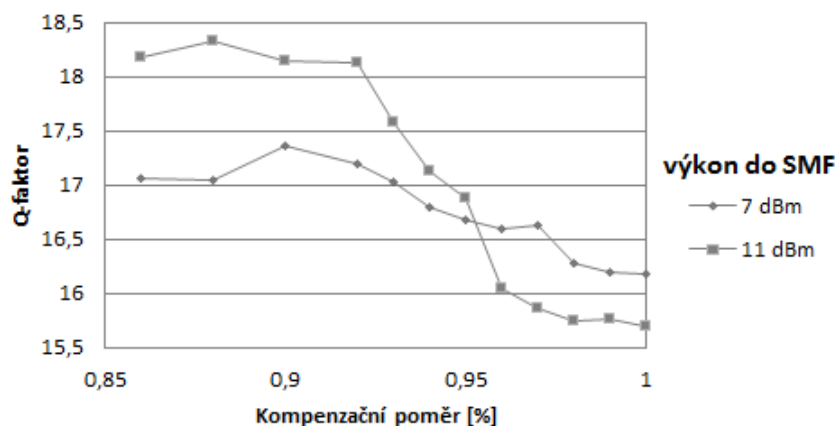
Výkon 10G jsem oproti původní hodnotě snížil až o 2 dB (příp. zvýšil o 1 dB), které pro 10G kanály stále ještě znamenaly zachování chybovosti na úrovni 10^{-40} . Změnu Q-faktoru 40G kanálu v závislosti na relativním rozvážení vysílacích výkonů 10G kanálů vidíme na Obr. 36. Jak už naznačil předchozí pokus, snížení výkonu 10G vysílačů přináší pro 40G kanály zlepšení, neboť dojde k potlačení nelineárního rušení pocházejícího od 10G kanálů.



Obr. 36 – Relativní rozvážení výkonů 10G kanálů

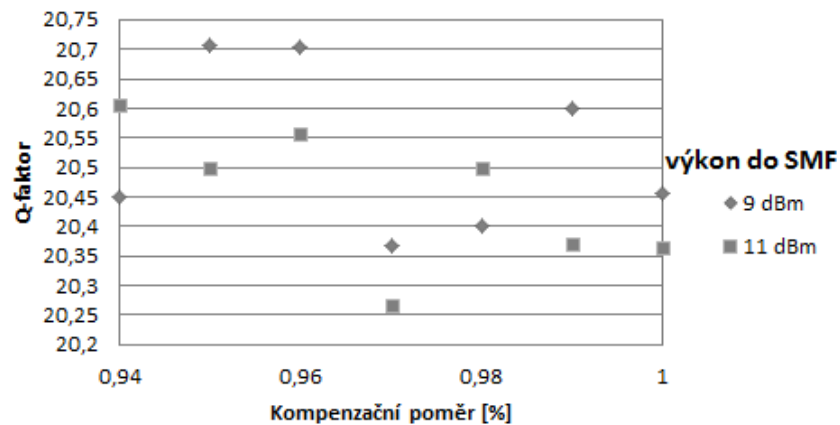
4.2.2 Kompenzace disperze

Úpravou původního post-kompenzačního disperzního schématu je možné více potlačit nelineární jevy, které na systém působí a tak do přenosového vlákna navázat větší výkony. Zařazením úseku DCF vlákna za vysílač zavedeme RDPS. Disperzní schéma navrhuji podobně jako v kapitole 4.1, které vychází z Obr. 15.



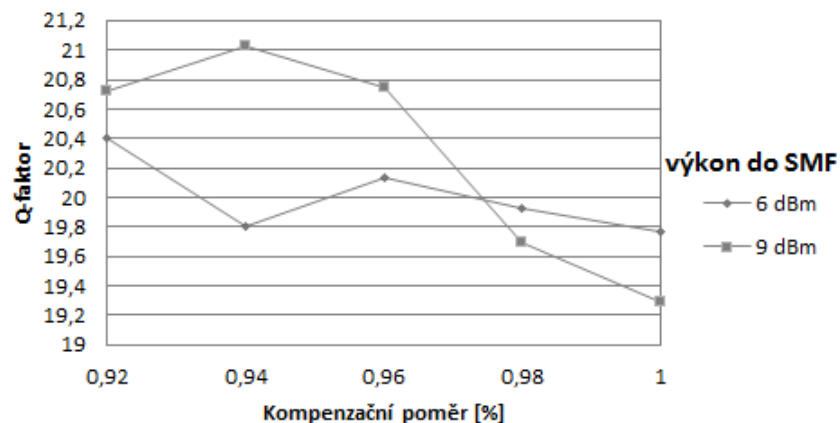
Obr. 37 – Kompenzační schéma 40G duobinární

Dle Obr. 37 snížením kompenzačního poměru až na 88% a tím vzniku nesymetrické disperzní mapy s předkompenzací na -921 ps/nm dojde k potlačení silného působení nelineárních intra-kanálových jevů, které degradují přenos 40G duobinárních kanálů a současně je díky této změně možné do SMF vlákna navázat výkon až 11 dBm, místo původní optimální hodnoty 9 dBm [37]. Tato změna znamená i splnění požadavku na minimální chybovost BER, kanály dosahují chybovosti $7 \cdot 10^{-13}$. Plánování disperze má na duobinární kanály velký vliv.



Obr. 38 – Kompenzační schéma 40G P-DPSK

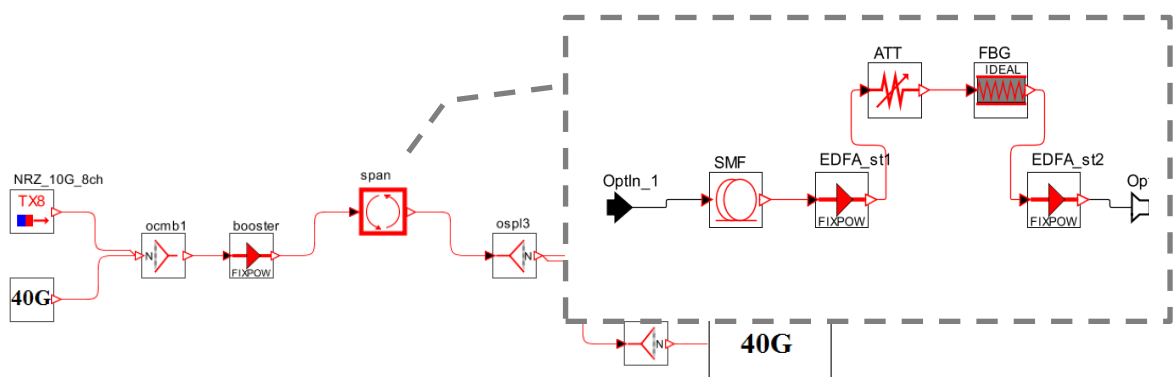
Zavedení nesymetrické kompenzace disperze neznamena pro 40G P-DPSK kanály příliš velkou změnu v hodnotě Q-faktoru. Pro kompenzační poměr 95% je zaznamenáno zlepšení Q-faktoru o 0,25 dB.



Obr. 39 – Kompenzační schéma 40G RZ-DQPSK

Upravené disperzní schéma, které zahrnuje umístění DCF vlákna za vysílač s celkovou disperzí -460 ps/nm (94% poměr) více potlačuje XPM generované OOK-NRZ kanály a umožní tak v 40G RZ-DQPSK hybridního systému navázání výkonu 9 dBm do přenosového SMF vlákna [22].

Kompensaci chromatické disperze lze kromě hojně používaných DCF vláken provádět také Braggovskými mřížkami FBG. FBG moduly mají oproti klasickým DCF vláknům několik výhod, kterými jsou nižší vložný útlum, přesnější kompenzace disperze a jednodušší kompenzace sklonu disperzní křivky. Simulace je provedena pro čisté post-kompenzační schéma s původním nastavením výchozího 10G systému, aby mohlo být provedeno objektivní porovnání. Modifikace, kterou jsem ve schématu provedl, byla výměna DCF vlákna za ideální FBG modul s útlumovým článkem, který představuje útlum reálného FBG, o velikosti 3,5 dB, viz Obr. 40. Disperze DCM FBG modulu je nastavena tak, aby plně kompenzovala sklon disperzní křivky a naakumulovanou disperzi plus $-4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^2$ SMF vlákna (číselně vyjádřeno: $D_{\text{FBG}} = -D_{\text{SMF}}\cdot\text{délka}_{\text{SMF}}-4 = -1284 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}$, $S_{\text{FBG}} = -S_{\text{SMF}}\cdot\text{délka}_{\text{SMF}} = -5,6 \text{ ps}\cdot\text{nm}^2$). Přidání $-4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^2$ zajišťuje potlačení nelineárních jevů, tento přídavek je na konci trasy dodatečně kompenzován.



Obr. 40 – Kompensace pomocí FBG

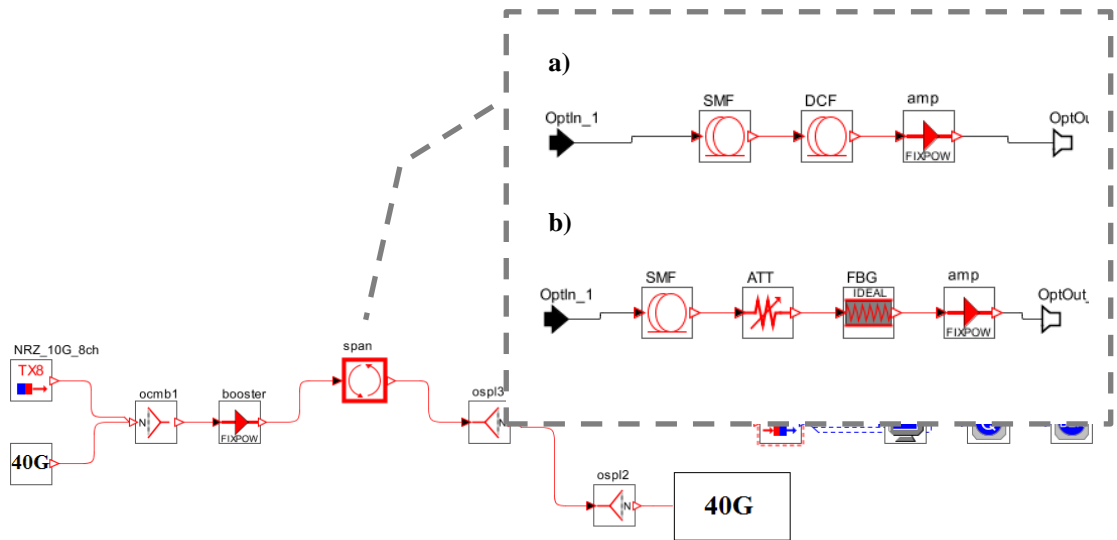
Tab. 7 obsahuje výsledky simulací s FBG modulem. Pouhá záměna DCF vlákna za FBG bez úpravy vysílacích výkonu vede v případě duobinární a P-DPSK modulace ke zlepšení Q-faktoru přibližně v rozsahu 0,6 dB – 1 dB. Jeden z duobinárních kanálů dokonce svojí chybovostí splňuje výše zmíněné minimum. Zvláštní chování je pozorováno u RZ-DQPSK, kde naopak u 2. a 14. kanálu došlo k poklesu hodnot, pravděpodobně kvůli plné kompenzaci sklonu disperzní křivky, která zapříčinila větší ovlivňování mezi kanály.

Tab. 7 – Výsledky post-kompensace FBG modulem

kanál	Duobinární		P-DPSK		RZ-DQPSK	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
2	16,94	0,72E-12	21,53	0,54E-31	19,17	0,11E-18
8	16,70	0,27E-11	21,50	0,12E-31	19,66	0,10E-20
14	16,60	0,49E-11	21,74	0,75E-32	19,12	0,83E-18

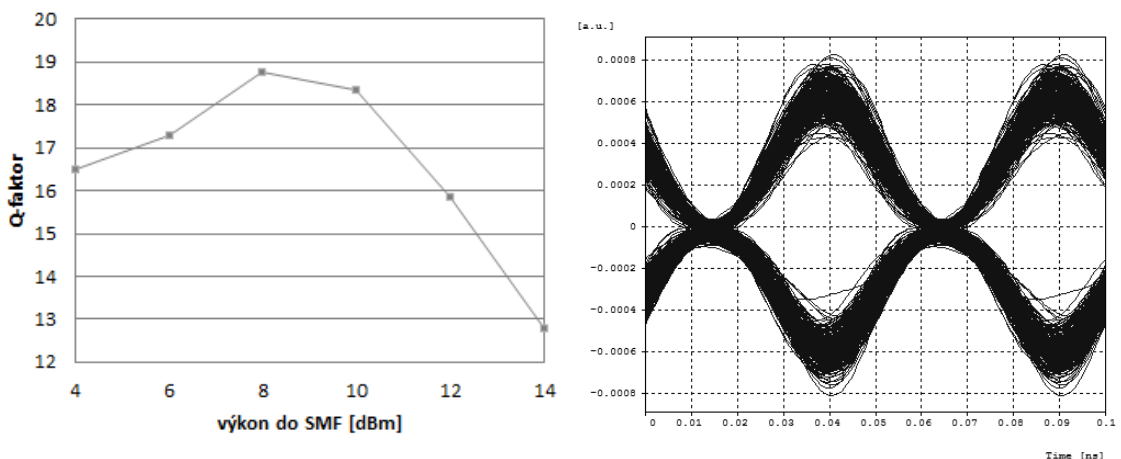
Pouze malých rozdílů nahrazením DCF vlákna FBG modulem je dosaženo proto, že na trase jsou použité dvoufázové zesilovače, která velmi omezují vznik nelineárních jevů v DCF vláknech a celkově na přenosové vůbec. FBG moduly ale dovolují místo těchto dražších dvoufázových zesilovačů použít klasické (jednofázové) výrazně levější optické zesilovače signálu [62]. Výhodu FBG kompenzátorů představím pouze pro hybridní

system s RZ-DQPSK kanály, u ostatních systémů by se daly očekávat podobné výsledky. Topologická úprava systému je představena na Obr. 41.



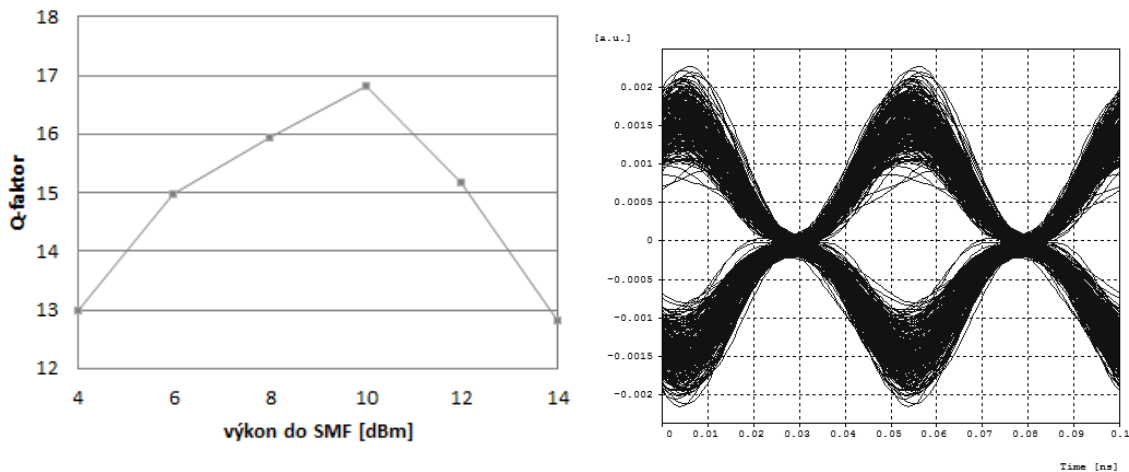
Obr. 41 – Změna složení recirkulační smyčky – a) DCF varianta b) FBG varianta

Složení recirkulační smyčky z Obr. 41 odpovídá přenosovému 80 km SMF vláknu, DCF vláknu a zesilovači pro variantu a), v případě b) dojde nahrazení DCF vlákna FBG modulem a útlumovým článkem. Smyčka se opět 6x opakuje. Je použito plné postkompenzační schéma. Parametry FBG a DCF vycházejí z předchozích nastavení. V simulaci měním výstupní výkon zesilovačů na trase, které určují vstupní výkon do SMF vlákna.



Obr. 42 – Porovnání kompenzačních modulů - FBG

Na Obr. 42 jsou výstupní hodnoty, Q-faktor a oko rozhodnutí, pro kompenzaci disperze s použitím FBG modulu. Maximální hodnota Q-faktoru 18,75 dB ($BER \approx 10^{-17}$) je v porovnání s původně používanými dvoufázovými zesilovači velmi uspokojivá, vzhledem k faktu, že použití jednofázových zesilovačů znamená snížení finančních nákladů.

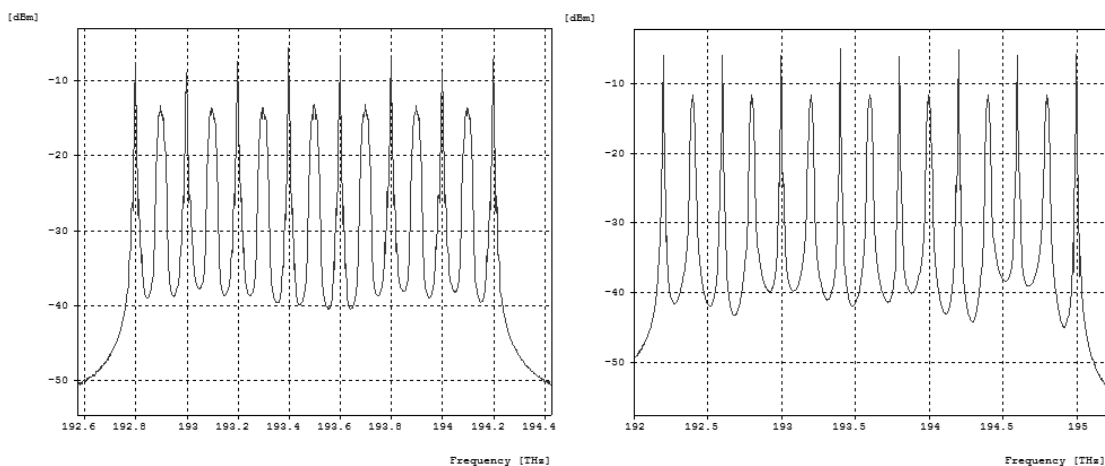


Obr. 43 – Porovnání kompenzačních modulů - DCF

Z diagramu oka a hodnot Q-faktoru pro případ kompenzací DCF vláknem na Obr. 43, které jsou značně nižší než za použití FBG, konkrétně 16,81 dB ($BER \approx 10^{-11}$), lze potvrdit horší vlastnosti DCF vláken oproti kompenzačním modulům s Braggovskými mřížkami. Strmější nárůst a pokles Q-faktoru s měnícím se vysílacím výkonem do SMF znamená menší toleranci vůči změně výkonu, která je způsobena větším útlumem a nelineárním koeficientem DCF vlákna v porovnání s FBG.

4.2.3 Kanálové plánování

V této kapitole bude představen dopad změny rastru kanálů na výsledný Q-faktor. Simulace budou prováděny na hybridním 10G/40G RZ-DQPSK systému, který v kapitole 4.2.1 vykazoval ze všech uvažovaných modulačních formátů největší vliv 10G kanálů na 40G kanály a tak by v tomto případě měla změna rozestupů hrát významnou roli. Topologie zobrazená na Obr. 24 zůstává stejná, použito je 100% post-kompenzační schéma s DCF vlákny. Bude zkoumán průběh Q-faktoru v systému se změnou ekvidistantních vzdáleností mezi kanály na 100 GHz a 200 GHz podle ITU-T. Přejdem z 50 GHz rastru na 100 GHz (200 GHz) rastr klesá spektrální účinnost, jak je patrné z porovnání optických spekter na Obr. 44a Obr. 25.



Obr. 44 – Optické spektrum systému s rastrem 100 GHz (vlevo) a 200 GHz (vpravo)

Zvětšením rozestupu na 100 GHz (200 GHz) se kanály přemísťují na frekvence od 192,8 THz až do 194,2 THz (192,2 THz až 195,0 THz) s ohledem na doporučení ITU-T. Osmý zkoumaný kanál se při rozestupu 100 GHz (200 GHz) nalézá na frekvenci 193,5 THz (193,6 THz). Rozšířením optického spektra se ale z důvodu neúplné kompenzace sklonu disperzní křivky na jednotlivých kanálech začne projevovat vliv residuální disperze, jestliže naroste nad stanovené limity. Proto musela být provedena její dodatečná kompenzace na přijímačích jednotlivých kanálů s využitím vzorce (2-7). Pro původní rozestup mezi kanály 50 GHz a optimální vstupní výkon 6 dBm do SMF vlákna byl v kapitole 4.2.1 Q-faktor roven 19,52 dB. Samotná změna rastru na 100 GHz (200 GHz) beze změny vysílacích výkonů znamenala pro 40G kanál nárůst Q-faktoru na 20,5 dB (20,6 dB). Ke spravedlivému porovnání je ale nutno nalézt vysílací výkony s největším Q-faktorem.

Tab. 8 – Srovnání Q-faktoru pro různé rozestupy

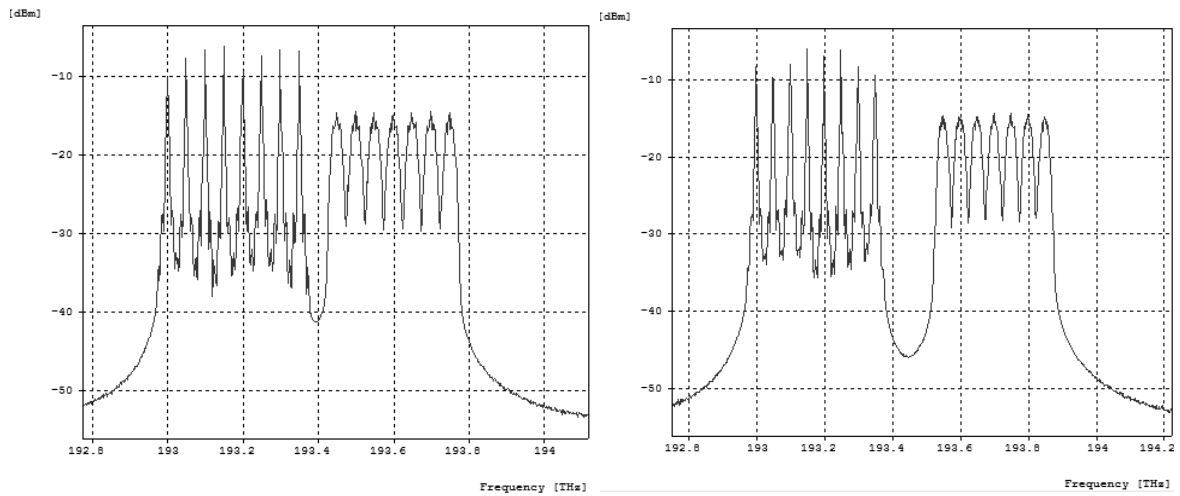
rozestup [GHz]	Q-faktor [dB]	BER [-]
50	19,52	0,28E-20
100	21,36	0,70E-31
200	22,09	0,21E-35

Se změnou rozestupu mezi kanály se ale mění optimální z hlediska Q-faktoru velikost vstupního výkonu, která lze do přenosového SMF vlákna navázat, konkrétně pro rozestup 100 GHz odpovídá optimální vysílaný výkon 7 dBm a pro 200 GHz to je 8 dBm, odpovídající výsledky jsou zaneseny do Tab. 8. Z tabulky Tab. 8 je patrný vliv sousední kanálů, který se se zvětšujícím rozestupem mezi kanály zmenšuje a tím pádem dochází k nárůstu Q-faktoru a zmenšení chybovosti. Jedná se především o jev XPM pocházející z 10G kanálů [24]. Největší rozdíl v hodnotách je pozorován při změně z 50 GHz na 100 GHz.

Další možností (vzájemně se nevylučující s předchozím případem) jak lze plánováním kanálů omezit rušení pocházející z 10G kanálů je spektrálně rozdělit kanály do dvou skupin podle datové rychlosti kanálu. Poté určitá část optického spektra se vyhradí pro první skupinu (např. 10G kanálů) a oddělí se od druhé kanálové skupiny (40G kanálů) tzv. ochranným frekvenčním pásmem [11] [55]. Poruší se tak fixní rastr daný v doporučení ITU-T G.694.1. Čím je ale ochranné pásmo větší, tím se snižuje spektrální účinnost. Přesto ale tato metoda je spektrálně účinnější než zvýšení rozestupů mezi kanály.

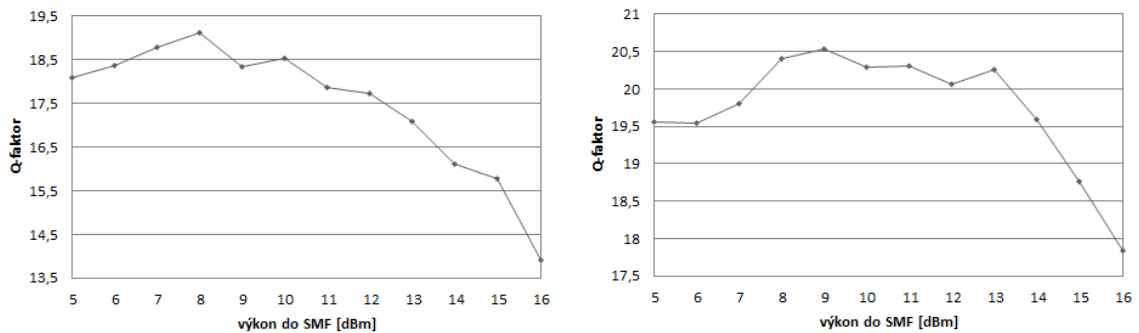
Vyšetřován bude systém s ochranným pásmem o velikosti 100 GHz a 200 GHz, které odděluje skupiny 8x10G a 7x40G RZ-DQPSK kanálů. Kanály v obou skupinách mají rozestup 50 GHz. 10G kanály pracují na optických frekvencích 193,0 THz až 193,35 THz, 40G kanály na frekvencích 193,45 THz až 193,75 THz v případě velikosti ochranného pásma 100 GHz. Má-li ochranné pásmo velikost 200 GHz, pracovní frekvence 10G kanálů zůstávají nezměněny a 40G kanály se nachází na frekvencích 193,55 THz až 193,85 THz. Nutno upozornit, že tím se mění i číslování kanálů a kanály se nyní nerozlišují podle rychlosti na sudé a liché. Disperze je kompenzována DCF vlákny uspořádanými v post-kompenzační schéma. Residuální disperze je dodatečně kompenzována na

přijímačích. Optická spektra pro varianty se 100 GHz a 200 GHz ochrannými pásmy jsou na Obr. 45.

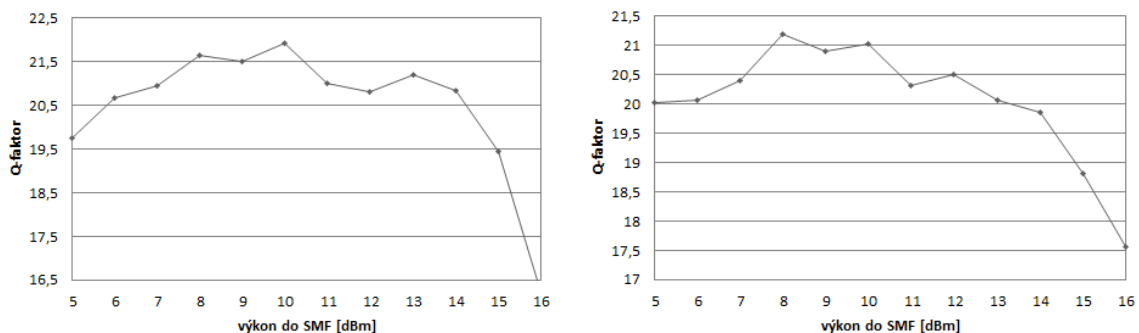


Obr. 45 – Ochranné pásmo o velikosti 100 GHz (vlevo) a 200 GHz (vpravo)

V takto navrhnutém kanálovém plánování bude od 10G kanálů nejvíce rušen první (v celkovém pořadí 9.) kanál ze skupiny 40G kanálů. Pro případ ochranného pásma o velikosti 100 GHz (200 GHz) nalezneme na Obr. 46 (Obr. 47) průběhy Q-faktorů 9. a 12. kanálu v závislosti na celkovém vysílacím výkonu.



Obr. 46 – Vývoj Q-faktoru 9. (vlevo) a 12. (vpravo) kanálu pro ochranné pásmo 100 GHz



Obr. 47 – Vývoj Q-faktoru 9. (vlevo) a 12. (vpravo) kanálu pro ochranné pásmo 200 GHz

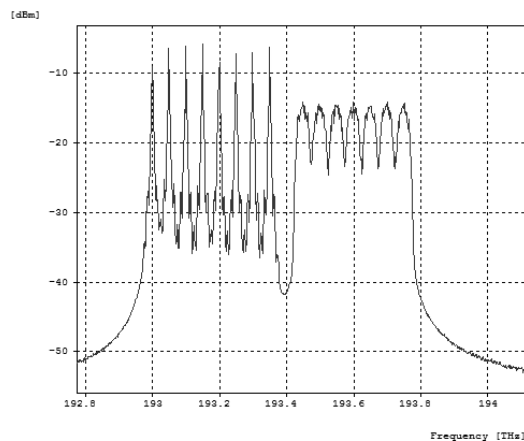
Z Obr. 46 plyne, že s rostoucím celkovým vysílacím výkonem narůstá vliv nelineárních jevů pocházejících od 10G kanálů, které nejvíce působí na krajní 9. kanál.

Proto v případě 100 GHz pásma na 9. kanálu detekují nižší Q-faktor na menším vstupním výkonu do SMF vlákna než je tomu u 12. kanálu. Rozšíření ochranného pásma na 200 GHz znamená pro 9. kanál dostatečný odstup od 10G kanálů a průběhy obou sledovaných kanálů se od sebe z hlediska Q-faktoru pro rozsah výkonových úrovní 8-10 dBm neliší o více jak 1 dB, viz Obr. 47. V tabulce Tab. 9 jsou shrnuty výsledné hodnoty 100 GHz a 200 GHz pásem pro výkony 8 dBm do SMF vlákna.

Tab. 9 – Vliv 100 GHz a 200 GHz ochranných pásem

kanál	100 GHz		200 GHz	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
9	19,11	0,10E-18	21,65	0,21E-31
12	20,4	0,12E-23	21,21	0,43E-28

Porovnáním hodnot z tabulky Tab. 9 a Tab. 6 bylo zjištěno, že oddělením 40G RZ-DQPSK kanálů od 10G kanálů pomocí ochranného pásma o šířce 200 GHz bylo dosaženo většího Q-faktoru a menší chybovosti než jejich prokládáním s 10G kanály. To ale nemusí platit u 40G kanálů P-DPSK kvůli šířce jejich spektra, jak ilustruje Obr. 48. Velikost ochranného pásma je 100 GHz, postup simulace souhlasí s výše uvedeným postupem.



Obr. 48 – Ochranné 100 GHz pásmo pro P-DPSK

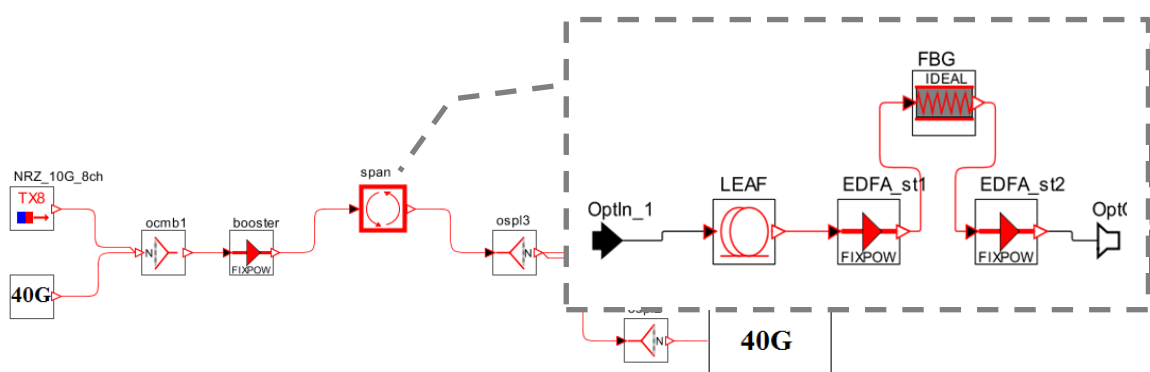
Výsledky simulace systému se 40G P-DPSK kanály oddělenými ochranným pásmem o velikosti 100 GHz a vstupním výkonem 9 dBm do SMF vlákna obsahuje Tab. 10. Naopak sloučení 40G P-DPSK kanálů do jedné skupiny o rozestupu 50 GHz znamenalo, s přihlédnutím k hodnotám z Tab. 6, zhoršení Q-faktoru kvůli přesahu spekter kanálů a vzniku přeslechu [56].

Tab. 10 – Vliv 100 GHz ochranného pásma v P-DPSK

kanál	Q-faktor [dB]	BER [-]
9	19,33	0,11E-18
12	18,42	0,40E-16

4.2.4 Parametry trasy

Použitím jiného přenosového vlákna na trase než doposud uvažovaného vlákna SMF se může změnit chování systému. Systém 8x10G s proloženými 7x40G kanály, na kterém budou provedeny simulace, vychází z topologie na Obr. 24, kdy zůstávají zachovány kanálové rozestupy, pracovní frekvence atd. Změna se týká recirkulační smyčky, která se skládala ze SMF vlákna, dvoufázového zesilovače a kompenzačního DCF vlákna. Zde je SMF vlákno nahrazeno 80 km LEAF (NZ-DSF) vláknem od firmy Corning s parametry (na referenční vlnové délce 1550 nm) uvedenými v Tab. 11 dle [57]. Původní DCF vlákno bylo kvůli nevhodnému sklonu disperzní křivky, který způsoboval nedostatečnou kompenzaci residuální disperze, nahrazeno ideálním FBG kompenzačním modulem, jehož parametry jsou nastaveny tak, aby plně kompenzovaly sklon disperzní křivky a naakumulovanou disperzi podobně jako v kapitole 4.4.2. Je použito 100% post-kompenzace, kdy FBG modul je umístěn za LEAF vlákno, viz Obr. 49. Velikost navazovaného výkonu do FBG je vždy 0 dBm, výstupní výkon druhé fáze zesilovače, tedy vstupní výkon do LEAF vlákna, závisí na použité modulaci 40G kanálů a je také předmětem šetření.



Obr. 49 – Systém s přenosovým vláknem LEAF

Tab. 11 – Parametry vlákna LEAF

Parametr	Hodnota
Délka vlákna [km]	80
Útlum [dB.km ⁻¹]	0,2
Disperze vlákna [ps.nm ⁻¹ .km ⁻¹]	4
Sklon disperzní křivky [ps.nm ⁻² .km ⁻¹]	0,1
Efektivní oblast [μm ²]	72
Koeficient PMD [ps.km ^{-1/2}]	0,1

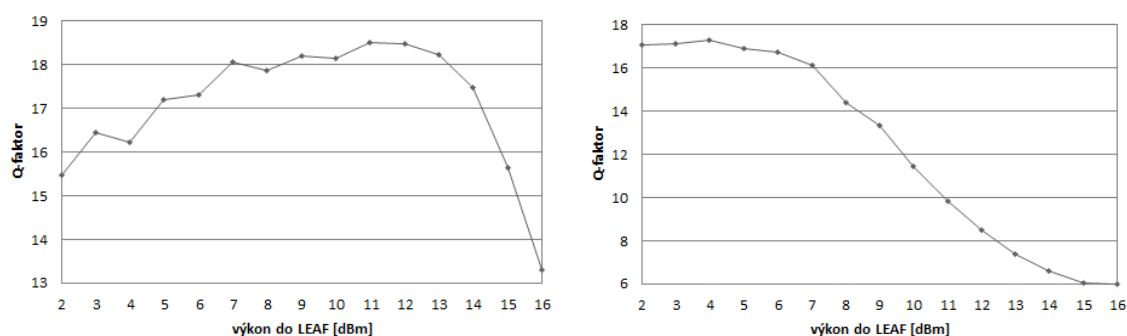
Optimalizací vstupního výkonu do LEAF vlákna na hodnoty 11 dBm, 9 dBm a 4 dBm postupně pro duobinární, P-DPSK a RZ-DQPSK hybridní systémy bylo dosaženo hodnot představených v tabulce Tab. 12.

Tab. 12 – Výsledné hodnoty systému s LEAF vláknem

kanál	Duobinární		P-DPSK		RZ-DQPSK	
	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]	Q-faktor [dB]	BER [-]
2	18,04	0,15E-14	21,29	0,25E-29	16,97	0,88E-12
8	18,50	0,17E-16	21,35	0,15E-30	17,23	0,23E-12
14	18,89	0,16E-16	21,77	0,79E-34	17,00	0,75E-12

Porovnáním hodnot z Tab. 12 s hodnotami z Tab. 7, kde se systém lišil pouze přenosovým SMF vláknem, vyplývá, že zatímco u 40G P-DPSK kanálů došlo k nevýraznému zhoršení, výsledky duobinárních a RZ-DQPSK 40G kanálů na LEAF vlákně se podstatně liší od hodnot známých při použití SMF vlákna a proto budou dále zkoumány.

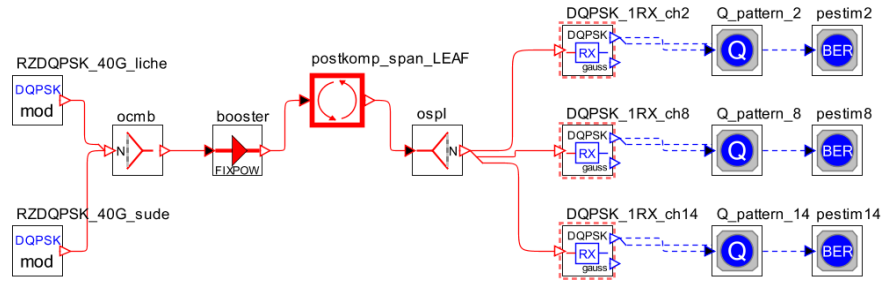
Z předchozího srovnání plyne, že RZ-DQPSK formát dosahuje lepších výsledků na SMF než na LEAF vlákně a naopak duobinární je více přizpůsobená pro přenos na LEAF než na SMF. XPM se mezi 10 Gbps NRZ kanály a 40 Gbps RZ-DQPSK kanály projevuje mnohem více na LEAF vlákně oproti SMF kvůli jeho nízké hodnotě chromatické disperze v porovnání s hodnotou disperze SMF ($4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ proti $16 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) [49]. Omezení XPM jevu, který by zapříčinil navýšení chybovosti BER, pokud by se tak neučinilo, spočívá v omezení navazovaného výkonu do LEAF vláken s porovnáním se SMF vlákny. RZ-DQPSK kanály jsou rušeny skrz XPM projevující se více na LEAF vlákně než na SMF jako fázové chvění generované fluktuacemi intenzity 10G kanálů, kvůli nižší disperzi LEAF vlákna. Na druhou stranu duobinární signály jsou hlavně ovlivněny intra-kanálovým nelineárním rušením, které je na SMF vlákně značně větší než na vlákně LEAF [53].



Obr. 50 – Vývoj Q-faktoru na LEAF pro duobinární (vlevo) a RZ-DQPSK (vpravo) kanál

Průběhy na Obr. 50 reprezentují Q-faktor osmého kanálu jako funkci vstupního výkonu do LEAF vlákna pro duobinární a RZ-DQPSK modulaci. Optimální vstupní výkon do přenosového LEAF vlákna v případě RZ-DQPSK kanálů musel být redukován na 4 dBm s přihlédnutím k případu se SMF vláknem, aby došlo k potlačení nelinearit. U kanálů s duobinárním formátem je tomu naopak. Přestože chybovost BER duobinárních kanálů na LEAF vlákně se přibližuje chybovosti RZ-DQPSK kanálů na SMF vlákně, optimální vstupní výkon je o 5 dB vyšší pro duobinární kanály na vlákně LEAF. To je zapříčiněno horší citlivostí duobinární modulace na OSNR v porovnání s RZ-DQPSK [37].

V [19] je zmíněno, že plný potenciál 40G kanálů s DQPSK modulačním formátem na LEAF vláknech se projeví až výměnou všech 10G kanálů za 40G RZ-DQPSK. Simulace byla provedena pro čistý systém s 14x40G RZ-DQPSK kanály zobrazený na Obr. 51. Konfigurace a nastavení vychází ze systému uvedeném výše na Obr. 49, kromě vysílacího výkonu, který byl zvolen 11 dBm.



Obr. 51 – 14x40G RZ-DQPSK systém

Výsledné Q-faktory včetně chybovostí pro optimální vstupní výkon 11 dBm do LEAF vlákna jsou zaneseny v Tab. 13. Je zřejmé, že tvrzení z [19] je potvrzeno, srovnáme-li hodnoty s výsledky hybridního systému 8x10G 7x40G RZ-DQPSK z Tab. 12.

Tab. 13 – Čistý 40G RZ-DQPSK systém na LEAF

kanál	Q-faktor [dB]	BER [-]
2	22,51	0,39E-39
8	22,79	0,99E-40
14	21,33	0,18E-30

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo studium možností při slučování optických přenosových systémů na jedné fyzické vrstvě. V druhé kapitole byl mimo jiné představen typ systémů CWDM/DWDM. Práce se v dalších kapitolách zaměřuje na mnohem složitější problematiku slučování více DWDM systémů, především na koexistenci systémů 10G DWDM s 40G DWDM. Slučování systémů probíhá nejčastěji směrem k vyšším přenosovým rychlostem, a proto bylo nutné nejprve navrhnout samotný 10G OOK-NRZ DWDM systém, který je v podkapitole 4.2 zabývající se koexistencí DWDM systémů používán jako výchozí systém. Z několika uvažovaných DWDM systémů byly k podrobnějšímu zkoumání koexistence s výchozím 10G systémem vybrány 40G systémy s duobinárním, P-DPSK a RZ-DQPSK modulačním formátem.

Z výsledků simulací hybridních systémů 10G/40G uvedených v podkapitole 4.2 plyne, že ne vždy existuje univerzální řešení, které je možné aplikovat na jakýkoliv hybridní systém. Zatímco 40G kanály s duobinárním modulačním formátem 10G/40G hybridního systému jsou více ovlivněny intra-kanálovými jevy než původním 10G systémem, kanály s fázovým klíčováním jsou rušeny skrz inter-kanálové nelineární jevy (hlavně jevem XPM) pocházející od 10G amplitudově modulovaných kanálů. Porovnáním sledovaných hodnot (Q-faktoru a chybovosti) systémů s „vypnutými“ a „zapnutými“ 10G kanály bylo odhaleno, že 40G kanály RZ-DQPSK jsou 10G kanály ovlivněny XPM jevem více než 40G kanály P-DPSK. Toto chování je vysvětleno tím, že fázový rozdíl mezi symboly je $k\pi/2$ pro RZ-DQPSK, zatímco pro P-DPSK je to $k\pi$. Druhým důvodem je poloviční symbolová rychlost RZ-DQPSK modulace oproti P-DPSK. Naopak 40G kanály s duobinární modulací jsou vůči jevu XPM pocházejícímu z 10G kanálů rezistentní, neboť jejich detekce nezávisí na fázi, ale na intenzitě optického záření.

Na základě simulačních výsledků je potvrzeno, že snížení chybovosti vložených 40G kanálů lze docílit úpravou vysílacích výkonů do SMF a DCF vlákna a úpravou schématu kompenzace disperze, kdy se zavedením RDPS naruší symetrická kompenzace. Dojde tak k potlačení nelineárních jevů, které jsou závislé na disperzi a systém degradují. Zde se ukázala velká výhoda použitých dvoufázových optických zesilovačů, které umožňují navázat do SMF a DCF vláken různé výkonové úrovně a omezit tak vznik nelinearit v DCF vlákne. Tím je s DCF vlákny jako kompenzátory disperze dosaženo podobných výsledků jako s FBG. Přednosti FBG modulů se projeví použitím jednofázového zesilovače.

Zvýšením rozestupu je možné potlačit rušení pocházející od sousedních kanálů, ovšem za cenu snížení spektrální účinnosti systému. V podkapitole 4.2.3 je představeno spektrální oddělení 10G a 40G kanálů s rastrem 50 GHz ochranným pásmem. V takovém případě dosahují RZ-DQPSK kanály díky jejich širce spektra nižší chybovosti než kanály s P-DPSK modulací.

Je-li použito přenosové vlákno LEAF, začne se projevovat kvůli nižší disperzi LEAF vlákna oproti SMF vláknu jev XPM pocházející z 10G kanálů. Tím jsou degradovány kanály RZ-DQPSK a narůstá jejich chybovost. Naopak kanály s duobinární modulací mají

oproti předchozím výsledkům nižší chybovost. Plný potenciál 40G kanálů s RZ-DQPSK modulací na vlákne LEAF se projeví až výměnou veškerých 10G kanálů za RZ-DQPSK.

Jak bylo výše předesláno, při návrhu slučovaných systémů neexistuje jedno univerzální řešení, ale slučování je potřeba provádět na základě parametrů slučovaných systémů. Největším přínosem práce je právě systematizace problematiky v konvergenci optických systémů, která přináší usnadnění rozhodování v případě reorganizace nasazeného systému. Bylo představeno několik modelů koexistence a teoretických úvah, z kterých lze při návrhu hybridních systémů vycházet a proto považují cíle práce za splněné.

Seznam obrázků

Obr. 1 – Zjednodušené schéma WDM systému [2]	9
Obr. 2 – Schéma dvoufázového zesilovače EDFA [27]	10
Obr. 3 – Sloučení dvou systémů do výsledného rastru 50 GHz [4].....	11
Obr. 4 – Princip systému CWDM/DWDM [58].....	13
Obr. 5 – Systém CWDM/DWDM	13
Obr. 6 – Optické spektrum CWDM/DWDM systému.....	14
Obr. 7 – Schéma duobinární modulace: a) vysílač b) konstelační diagram c) přijímač [35]... 15	
Obr. 8 – Schéma DPSK modulace: a) vysílač b) konstelační diagram c) přijímač [35].....	16
Obr. 9 - Schéma DQPSK modulace: a) vysílač b) konstelační diagram c) přijímač [35].....	17
Obr. 10 – Schéma PM-QPSK modulace: a) vysílač b) koherentní přijímač s DSP [35]	18
Obr. 11 – Charakteristika SMF a DCF vlákna – disperzní spektrum [2].....	20
Obr. 12 – Akumulace disperze pro každý kanál, kanál 3 je plně kompenzován [3].....	20
Obr. 13 – Pre-kompenzační a post-kompenzační schéma s předřadným vláknem [48]	21
Obr. 14 – Efekt nelineárních jevů na toleranci disperze [7]	21
Obr. 15 – Příklad disperzní mapy s předřadným DCF vláknem [12]	22
Obr. 16 – FWM v systémech s a) rovnoměrnými rozestupy b) nerovnoměrnými rozestupy mezi kanály [2].....	23
Obr. 17 – Poruchy oka rozhodnutí kvůli různým vlivům: a) bez porušení b) úzkopásmová filtrace c) ASE šum d) CD e) intra-kanálové nelinearity f) inter-kanálové nelinearity [2].....	26
Obr. 18 – Výchozí topologie 15x10G systému.....	27
Obr. 19 – Recirkulační smyčka – a) pre-kompenzace b) post-kompenzace	28
Obr. 20 – a) post-kompenzační schéma b) pre-kompenzační schéma (pro 1550 nm).....	28
Obr. 21 – Q-faktor pro různý vysílací výkon do SMF a DCF (7. kanál).....	29
Obr. 22 – Ukázka zařazení kratšího úseku DCF vlákna za vysílač	30
Obr. 23 – Úprava plánování disperze předřadným DCF	30
Obr. 24 – Schéma hybridního optického systému	31
Obr. 25 – Optické spektrum hybridního systému s modulací: a) duobinární, b) P-DPSK, c) DQPSK, d) RZ-DQPSK, e) PM-QPSK (x-polarizace) f) PM-QPSK (y-polarizace).....	31
Obr. 26 – Diagram oka PM-QPSK před zpracováním koherentním přijímačem	33
Obr. 27 – Změna výkonu v post-kompenzačním schématu.....	34
Obr. 28 – Změna Q-faktoru v závislosti na výkonu do SMF a DCF: a) duobinární b) P-DPSK c) DQPSK d) RZ-DQPSK.....	34
Obr. 29 – Diagram oka – duobinární; vstupní výkony 7 dBm do SMF a 3 dBm do DCF.....	35
Obr. 30 – Diagram oka, porovnání NRZ-DQPSK a RZ-DQPSK (soufázová složka).....	35
Obr. 31 – „Vypnutí“ 10G kanálů	36
Obr. 32 – čistý 40G duobinární systém	36
Obr. 33 – čistý 40G P-DPSK systém	37
Obr. 34 – čistý 40G RZ-DQPSK systém	37
Obr. 35 – Změna výkonových poměrů kanálů.....	37
Obr. 36 – Relativní rozvážení výkonů 10G kanálů.....	38
Obr. 37 – Kompenzační schéma 40G duobinární	38
Obr. 38 – Kompenzační schéma 40G P-DPSK.....	39
Obr. 39 – Kompenzační schéma 40G RZ-DQPSK.....	39
Obr. 40 – Kompenzace pomocí FBG.....	40
Obr. 41 – Změna složení recirkulační smyčky – a) DCF varianta b) FBG varianta.....	41

Obr. 42 – Porovnání kompenzačních modulů - FBG.....	41
Obr. 43 – Porovnání kompenzačních modulů - DCF.....	42
Obr. 44 – Optické spektrum systému s rastrem 100 GHz (vlevo) a 200 GHz (vpravo)	42
Obr. 45 – Ochranné pásmo o velikosti 100 GHz (vlevo) a 200 GHz (vpravo).....	44
Obr. 46 – Vývoj Q-faktoru 9. (vlevo) a 12. (vpravo) kanálu pro ochranné pásmo 100 GHz ..	44
Obr. 47 – Vývoj Q-faktoru 9. (vlevo) a 12. (vpravo) kanálu pro ochranné pásmo 200 GHz ..	44
Obr. 48 – Ochranné 100 GHz pásmo pro P-DPSK.....	45
Obr. 49 – Systém s přenosovým vláknem LEAF.....	46
Obr. 50 – Vývoj Q-faktoru na LEAF pro duobinární (vlevo) a RZ-DQPSK (vpravo) kanál ..	47
Obr. 51 – 14x40G RZ-DQPSK systém.....	48

Seznam Tabulek

Tab. 1 – Výsledné hodnoty CWDM kanálů v systémech CWDM a CWDM/DWDM	14
Tab. 2 – Parametry SMF a DCF vláken.....	28
Tab. 3 – Hodnoty Q-Faktoru zkoumaných kanálů.....	29
Tab. 4 – Hodnoty Q-Faktoru upraveného plánování disperze	30
Tab. 5 – Sloučení 10G systému se 40G kanály.....	32
Tab. 6 – Výsledné hodnoty po úpravě výkonových úrovní	36
Tab. 7 – Výsledky post-kompence FBG modulem	40
Tab. 8 – Srovnání Q-faktoru pro různé rozestupy	43
Tab. 9 – Vliv 100 GHz a 200 GHz ochranných pásem.....	45
Tab. 10 – Vliv 100 GHz ochranného pásma v P-DPSK	45
Tab. 11 – Parametry vlákna LEAF	46
Tab. 12 – Výsledné hodnoty systému s LEAF vláknem.....	47
Tab. 13 – Čistý 40G RZ-DQPSK systém na LEAF.....	48

Seznam použitých zkratek

ADC	Analogo(Analog to Digital Converter)
APD	Lavinová fotodioda (Avalanche Photodiode)
ASE	Zesílená spontánní emise (Amplified Spontaneous Emission)
AWG	Vlnovody uspořádané do mřížky (Arrayed Waveguide Grating)
BER	Bitová chybovost (Bit Error Rate)
CD	Chromatická disperze (Chromatic Dispersion)
CWDM	Hrubý vlnový multiplex (Coarse Wavelength Division Multiplexing)
DB	Duobionární (Duobinary)
DCF	Disperzně kompenzační vlákno (Dispersion Compensation Fiber)
DCM	Disperzně kompenzační modul (Dispersion Compensation Module)
DFB	Distribuovaná zpětná vazba (Distributed Feedback)
DGD	Rozdíl grupové rychlosti (Differential Group Delay)
DPSK	Diferenční fázové klíčování (Differential Phase Shift Keying)
DQPSK	Diferenční kvadrurní fázové klíčování (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
DSF	Vlákna s posunutou disperzí (Dispersion Shifted Fiber)
DSP	Digitální signálový procesor (Digital Signal Processor)
DWDM	Hustý vlnový multiplex (Dense Wavelength Division Multiplexing)
EAM	Elektroabsorpční modulátor (Electro Absorption Modulator)
EDFA	Erbium dotovaný vláknový zesilovač (Erbium Doped Fiber Amplifier)
FBG	Vláknové Braggovské mřížky (Fiber Bragg Gratings)
FWM	Čtyřvlnné směšování (Four-Wave Mixing)
Gbps	Gigabitů za sekundu (Gigabits per second)
ISI	Interference mezi symboly (Inter Symbol Interference)
MZDI	Mach-Zehnderův zpoždovací interferometr (Mach-Zehnder Delay Interferometer)
MZI	Mach-Zehnderův interferometr (Mach-Zehnder Interferometer)
MZM	Mach-Zehnderův modulátor (Mach-Zehnder modulator)
NRZ	Modulace bez návratu k nule (Non Return-to-Zero)
NZ-DSF	Vlákno s nenulovou disperzí (Non Zero Dispersion-Shifted Fiber)
OADM	Optický začleňovací a vydělovací multiplexor (Optical Add/Drop Multiplexer)
OOK	Amplitudové klíčování (On-Off Keying)
OSNR	Odstup optického signálu od šumu (Optical Signal-to-Noise Ratio)
P-DPSK	Částečné diferenční fázové klíčování (Partial Differential Phase Shift Keying)
PIN	Fotodioda p-i-n (p-i-n photodiode)
PMD	Polarizačně vidová disperze (Polarization Mode Dispersion)
PM-QPSK	Kvadrurní fázové klíčování s polarizačním multiplexem (Polarization Multiplexed Quadrature Phase Shift Keying)

PSK	Fázové klíčování (Phase Shift Keying)
RDPS	Reziduální disperze na úsek (Residual Dispersion Per Span)
RZ	Modulace s návratem k nule (Return-to-Zero)
SBS	Stimulovaný Brillouinův rozptyl (Stimulated Brillouin Scattering)
SPM	Vlastní fázová modulace (Self-Phase Modulation)
SRS	Stimulovaný Ramanův rozptyl (Stimulated Raman Scattering)
SSMF	Standardní jednovidové vlákno (Standard Single-Mode Fiber)
TDSS	Dělení kroku v časové doméně (Time Domain Split-Step)
WDM	Vlnový multiplex (Wavelength-Division Multiplexing)
XPM	Křížová fázová modulace (Cross-Phase Modulation)

Literatura

- [1] BOHÁČ L., LUCKI M. *Optické komunikační systémy*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2010.
- [2] HODŽIČ, A. *Investigations of high bit rate optical transmission systems employing a channel data rate of 40 Gb/s*. Dizertační práce. Technischen Universität Berlin. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing Thomas Sikora, Berlín, 2004
- [3] ITU-T G-series Supplement 39: Transmission systems and media, digital systems and networks. ITU, 2012.
- [4] JI, P. *Development of novel fibre optic devices and subsystems for next generation DWDM systems*. New South Dizertační práce. The University of New South Wales. Vedoucí práce Prof. Gang-Ding Peng. Wales, 2010.
- [5] BOHÁČ, L. *Optické přenosové systémy: Fyzikální limity optické přenosové trasy* [online]. ČVUT FEL. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4243>
- [6] ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, ITU, 2012.
- [7] ITU-T Recommendation G.696.1. Longitudinally compatible intra-domain DWDM applications, ITU, 2010.
- [8] DJORDJEVIC, Ivan, William E RYAN a Bane VASIC. *Coding for optical channels*. New York: Springer, 2010.
- [9] ŠIFTA, R. *DWDM v přístupových sítích*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc., Brno, 2011.
- [10] HAVLIŠ, O. *Pasivní optické sítě WDM-PON*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Münster, Brno, 2012.
- [11] PINCEMIN, E. Challenges of 40/100 Gbps deployments in long-haul transport networks on existing fibre and system infrastructure. OFC NFOEC 2010 : MARCH 21 - 25, 2010. *Technical digest* [online]. Washington, DC: Optical Soc. of America, 2010 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5465233>
- [12] WINZER, P.J. a R.-J. ESSIAMBRE. Advanced Optical Modulation Formats. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2006 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1634536>
- [13] WEDDING B., POHLMANN W., GROSS H., THALAU O., 43 Gbit/s transmission over 210 km SMF with a directly modulated laser diode, Proc. Eur. Conf. Optical Communication (ECOC). 2003.
- [14] FAURE J., LAVIGNE B., BRESSON C., BERTRAN-PARDO O., COLOMER A. C., CANTÓ R., "40G and 100G Deployment on 10G Infrastructure: Market Overview and Trends, Coherent Versus Conventional Technology". *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America), paper OThE3, 2010, [cit. 2014-05-10] Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2010-OThE3>

- [15] GROBE, K., 40Gb/s in metro and regional optical networking. [online]. 2006 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:
https://www.terena.org/events/tnc2006/core/getfile99ac.pdf?file_id=707
- [16] ČERVENKA, V. *Návrh a správa WDM systémů pro optické sítě*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vladimír Tejkal. Brno, 2010
- [17] CLARK, N. *Simulation of optical transmission systems in OptSim*. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Michal Lucki, Ph.D., Praha, 2013.
- [18] KAPSE, M.C. a S.S. SRIRAMWAR. Study of development of 40 Gb/s DWDM systems over existing 10 Gb/s DWDM systems. *Journal of Data Mining and Knowledge Discovery*. Indie, 2012.
- [19] LEFRANCOIS, Mathieu, Francois HOUNDONUGBO, Thibaut FAUCONNIER, Gabriel CHARLET a Sebastien BIGO. Cross comparison of the nonlinear impairments caused by 10Gbit/s neighboring channels on a 40Gbit/s channel modulated with various formats, and over various fiber types. *OFC/NFOEC 2007 - 2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference* [online]. IEEE, 2007, [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4348337>
- [20] ZHANG G., MELEDIAN P., SKOLNICK C., ARMIENTO G., "Assessment of Capacity Upgrade Using 40Gbps DPSK Transmission in 10Gbps DWDM ROADM Networks," v *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference OSA Technical Digest (Optical Society of America)*, 2011 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=NFOEC-2011-NThC2>
- [21] WANG Y., LYUBOMIRSKY I., FAUCONNIER T., CHARLET G. a Sebastien BIGO. Impact of DP-QPSK Pulse Shape in Nonlinear 100 G Transmission. *Journal of Lightwave Technology* [online]. IEEE, 2010 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5557740>
- [22] CHANDRASEKHAR S., LIU X., FAUCONNIER T, CHARLET G. a BIGO S., Impact of Channel Plan and Dispersion Map on Hybrid DWDM Transmission of 42.7-Gb/s DQPSK and 10.7-Gb/s OOK on 50-GHz Grid. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. IEEE, 2007 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4367519>
- [23] CHEN Ch. , SUN Y., ZHAO L., PAN J., QIU J., LIANG S., WANG W. a LOU C., Amplified feedback DFB laser for 40Gb/s all-optical clock recovery. *Optics Communications* [online]. IEEE, 2011 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401811009175>
- [24] XU X., LIBOIRON-LADOUCEUR O., PLANT D. V., PAN J., QIU J., LIANG S., WANG W. a LOU C.. XPM penalty mitigation for a 42.7-Gb/s DQPSK channel co-propagating with 10.7-Gb/s OOK channels using SSMF and dispersion map. *LEOS 2008 - 21st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society* [online]. IEEE, 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4688701>

- [25] YI, X., J. WU, W. LI, X. HONG, H. GUO, Y. ZUO a J. LIN. Nonlinear signal-noise interactions in dispersion managed coherent PM-QPSK systems in the presence of PMD. *Opt. Express*. [online]. 2012 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-20-25-27596>
- [26] PARDO O. B., RENAUDIER J., MARDOYAN H., TRAN P., CHARLET G. a BIGO S., Investigation of design options for overlaying 40Gb/s coherent PDM-QPSK channels over a 10Gb/s system infrastructure. *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference* [online]. IEEE, 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4528640>
- [27] ITU-T. Optical fibres, cables and systems. Geneva: International Telecommunication Union, 2009.
- [28] RSOFT DESIGN GROUP, INC. *OptSim User Guide*. 2010.
- [29] LIU X., BERTRAN O., RENAUDIER J., MARDOYAN H., TRAN P., CHARLET G. a BIGO S.. Can 40-gb/s duobinary signals be carried over transparent DWDM systems with 50-GHz channel spacing?. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. IEEE, 2005, [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1432818>
- [30] YUKI M., HOSHIDA T., TANIMURA T., ODA S., NAKAMURA K., VASSILIEVA O., WANG X., NAKASHIMA H., ISHIKAWA G. a RASMUSSEN J., Transmission Characteristics of 43 Gb/s Single-Polarization and Dual-Polarization RZ-DQPSK Signals with Co-propagating 11.1 Gb/s NRZ Channels over NZ-DSF. *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference* [online]. IEEE, 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4528386>
- [31] SIEMENS COMMUNICATION. *40G Transmission in DWDM Long-Haul Networks*. Mnichov, 2005.
- [32] WU, M. a W.I. WAY. Fiber Nonlinearity Limitations in Ultra-Dense WDM Systems. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2004 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1303723>
- [33] PINCEMIN, E. a POIGNANT H., FRANCE TELECOM, Orange Labs. *Paradigms of 40/100 Gbps Deployments on France telecom Long-Haul transport Network*. Francie, 2010
- [34] LIU X., CHANDRASEKHAR S., GNAUCK A. H., JOPSON R. M. a GILES C. R., Impact of WDM Channel Dynamics on Transmission Performance of 42.7-Gb/s DBPSK and DQPSK. [online]. Německo, 2007 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5758555>
- [35] WUTH, T., CHBAT M. W. a KAMALOV V.F. Multi-rate (100G/40G/10G) Transport Over Deployed Optical Networks. *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference* [online]. IEEE, 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4528299>

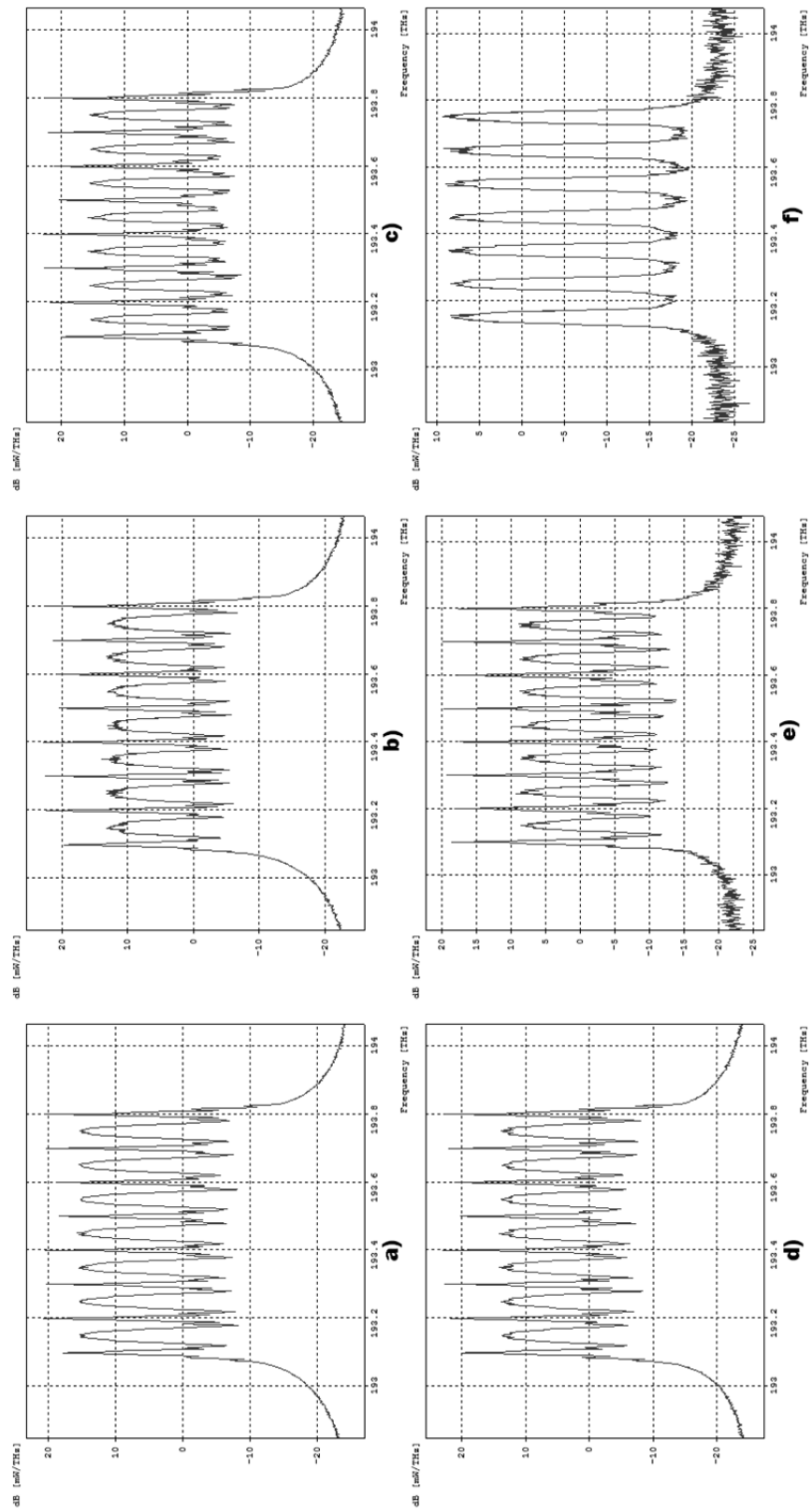
- [36] SCHMIDT T., MALOUIN C., SAUNDERS R., HONG J. a MARCOCCIA R., Mitigating channel impairments in high capacity serial 40G and 100G DWDM transmission systems. *2008 Digest of the IEEE/LEOS Summer Topical Meetings* [online]. IEEE, 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4590529>
- [37] TAN A. a PINCEMIN E., Performance Comparison of Duobinary Formats for 40-Gb/s and Mixed 10/40-Gb/s Long-Haul WDM Transmission on SSMF and LEAF Fibers. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2009 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4785437>
- [38] HEISMANN F. and MAMYSHEV P., "43-Gb/s NRZ-PDPSK WDM Transmission with 50 GHz Channel Spacing in Systems with Cascaded Wavelength-Selective Switches," v *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America) [online]. 2009 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2009-OThC1>
- [39] MIKKELSEN B., RASMUSSEN C., MAMYSHEV P. a LIU F., Partial DPSK with excellent filter tolerance and OSNR sensitivity. *Electronics Letters* [online]. 2006 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_20063003
- [40] MURRAY N. J., OLUBODUN O. A., HARPER P. a DORAN N. J., Performance enhancement of partial-42.7 Gb/s DPSK via an asymmetrical receiver design. *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* [online]. IEEE, 2013 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6602999>
- [41] SHARAN, L. a V. K CHAUBEY., Design and simulation of long-haul 32 × 40 Gb/s Duobinary DWDM link in the presence of non-linearity with under-compensated dispersion. *2012 IEEE 3rd International Conference on Photonics* [online]. IEEE, 2012 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6379838>
- [42] CHANDRASEKHAR, S., X. LIU, D. KILPER, C.R. DOERR, A.H. GNAUCK, E.C. BURROWS a L.L. BUHL. Terabit Transmission at 42.7-Gb/s on 50-GHz Grid Using Hybrid RZ-DQPSK and NRZ-DBPSK Formats Over 16x80 km SSMF Spans and 4 Bandwidth-Managed ROADMs. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4413091>
- [43] LACH, E. a W. IDLER. Modulation formats for 100G and beyond. *Optical Fiber Technology* [online]. 2011 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1068520011001027>
- [44] SAVORY, S. J. Digital filters for coherent optical receivers. *Opt. Express* [online]. 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-16-2-804>

- [45] CHARLET G., RENAUDIER J., BRINDEL P., TRAN P., MARDOYAN H., BERTRAN-PARDO O., SALSI M., BIGO S., "Performance Comparison of DPSK, P-DPSK, RZ-DQPSK and Coherent PDM-QPSK at 40Gb/s over a Terrestrial Link," v *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America) [online]. 2009 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2009-JWA40>
- [46] LEIBRICH, J., Ch. WREE a W. ROSENKRANZ. Phase-Shift-Keying (PSK & DPSK) Techniques for Long-Haul Wavelength-Division-Multiplexing Systems over Standard Single- Mode Fiber. [online]. Německo, 2002 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.tf.uni-kiel.de/etit/NT/download/publications/apoc02.pdf>
- [47] YUKI, M., T. HOSHIDA, T. TANIMURA, S. ODA, K. NAKAMURA, O. VASSILIEVA, X. WANG, H. NAKASHIMA, G. ISHIKAWA a J. C. RASMUSSEN. Transmission Characteristics of 43 Gb/s Single-Polarization and Dual-Polarization RZ-DQPSK Signals with Co-propagating 11.1 Gb/s NRZ Channels over NZ-DSF. *OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference* [online]. IEEE, 2008 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4528386>
- [48] PEUCHERET, C., N. HANIK, R. FREUND, L. MOLLE a P. JEPPESEN. Optimization of pre- and post-dispersion compensation schemes for 10-Gbits/s NRZ links using standard and dispersion compensating fibers. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. IEEE, 2000 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=867985>
- [49] AZCOAGA, A. B. *40 Gb/s optical transmission systems*. Dizertační práce. Technical University of Denmark. Vedoucí práce Prof. Dr. Palle Jeppesen. Německo, 2003 [cit. 2014-05-09] Dostupné z: http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:79158/datastreams/file_3013571/content.
- [50] ELBERS, J. P., A. FARBERT, C. SCHEERER, C. GLINGENER a G. FISCHER. Reduced model to describe SPM-limited fiber transmission in dispersion-managed lightwave systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* [online]. 2000, vol. 6, issue 2, s. 276-281 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=847763>
- [51] FINISAR CORPORATION. *Introduction to EDFA Technology* [online]. Finisar, 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: [http://www.finisar.com/sites/default/files/pdf/Introduction to EDFA technology.pdf](http://www.finisar.com/sites/default/files/pdf/Introduction%20to%20EDFA%20technology.pdf)
- [52] DAIKOKU, M., I. MORITA a H. TANAKA. Study of 40 Gbit/s Modulation Format to Upgrade 10 Gbit/s Long-Haul Transmission Systems with 50 GHz Channel Spacing. *2006 European Conference on Optical Communications* [online]. IEEE, 2006 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4801101>

- [53] TAN, A. a E. PINCEMIN. Performance Comparison of Duobinary and DQPSK Modulation Formats for Mixed 10/40-Gb/s WDM Transmission on SMF and LEAF Fibers. *2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* [online]. IEEE, 2007, [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4452539>
- [54] AGARWAL, A., S. BANERJEE, D.F. GROSZ, A.P. KUNG, D.N. MAYWAR a T.H. WOOD. Ultralong-haul transmission of 40-Gb/s RZ-DPSK in a 10/40 G hybrid system over 2500 km of NZ-DSF. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. 2003 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1253533>
- [55] UDALCOVS, A., P. MONTI, V. BOBROVS, R. SCHATZ, L. WOSINSKA a G. IVANOVS. Spectral and energy efficiency considerations in mixed-line rate WDM networks with signal quality guarantee. *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* [online]. IEEE, 2013 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6602845>
- [56] YU, Ch., L. XU, E. IP, P. N. JI, T. WANG, S. MURAKAMI, Y. YANO a T. TAJIMA. Comparison of Modulation Formats for 40-Gbit/s DWDM Optical Fiber Transmission Systems with 50-GHz Channel Spacing. *2006 IEEE Sarnoff Symposium* [online]. IEEE, 2006 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4534719>
- [57] RSOFT DESIGN GROUP. *OptSim models reference: Volume I Sample Mode, Volume II Block Mode*. 2010.
- [58] THIELE, H. J. a M. NEBELING. *Coarse wavelength division multiplexing: technologies and applications*. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [59] *Optical Fiber Communications Conference (OFC): postconference digest*. Postconference ed. Washington, DC: Optical Society of America. OSA trends in optics and photonics, v. 86. USA, 2003 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1248402>
- [60] ITU-T Recommendation G.695. Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications, ITU, 2010.

WWW stránky:

- [61] LUKÁŠ, M. Laserové diody 2: Typy a struktury laserových diod. [online]. Olomouc, 2001 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>
- [62] ČEPA, L., M. LUCKI a J. HÁJEK. Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u klasického optického jednovidového vlákna. In: [online]. 2010 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020001>
- [63] PACKETLIGHT NETWORKS. DWDM over CWDM network. [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.packetlight.com/technology/dwdm-over-cwdm/>



Obr. B.1 – Optické spektrum hybridního systému s modulací: a) duobinární, b) P-DPSK, c) DQPSK, d) RZ-DQPSK, e) PM-QPSK (x-polarizace) f) PM-QPSK (y-polarizace)