

## Model vysokorychlostnej optickej siete: Návrh 8 kanálového DWDM systému

### High-speed optical network model: Design of an 8-channel DWDM system

*Norbert Zdravecký, Luboš Ovseník, Maroš Lapčák*

*norbert.zdravecky@tuke.sk*

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, TU  
Košice

DOI: -

**Abstract:** DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) is a technology that allows the transmission of multiple signals through the multiplex. Data signals from different sources can share a single optical fiber while maintaining complete separation of data streams. In this article we describe the DWDM system, the phenomenon affecting the transmission of the optical network and the 8-channel DWDM system, which was designed in the Optisystem program. We evaluate the parameters BER (Bit Error Rate) and Q factor for 10 Gbit / s systems with varying spacing between channels. We chose 100 GHz, 50 GHz and 25 GHz. The aim is to determine the effect of changing the spacing on the simplest possible design of a DWDM system in order to exclude other possible effects on the system, which may occur with the complexity of the design.

# Model vysokorýchlostnej optickej siete: Návrh 8 kanálového DWDM systému

Norbert Zdravecký, Ľuboš Ovseník, Maroš Lapčák

Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, TU Košice  
Email: norbert.zdravecky@tuke.sk

**Abstrakt** – DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) je technológia, ktorá umožňuje prenos viacerých signálov prostredníctvom multiplexu. Dátové signály z rôznych zdrojov, môžu zdieľať jedno optické vlákno pri súčasnom zachovaní úplného oddelenia dátových tokov. V článku sa venujeme popisu DWDM systému, javom ovplyvňujúcim prenos optickou sieťou a 8 kanálovému DWDM systému, ktorý bol navrhnutý v programe Optisystem. Vyhodnocujeme parametre BER (Bit Error Rate) a Q faktor pre 10 Gbit/s systémy s meniacimi sa rozstupmi medzi kanálmi. Rozstupy sme volili 100 GHz, 50 GHz a 25 GHz. Cieľom je zistiť vplyv zmeny rozstupov na čo najjednoduchšom návrhu DWDM systému aby sa vylúčili iné možné vplyvy na daný systém, ktoré môžu nastať s komplikovanosťou a komplexnosťou návrhu.

## 1 Úvod

Optické systémy využívajú svetlo ako zdroj pre prenos informácií. Základnými komponentami optických komunikačných systémov sú zdroj svetla, najčastejšie laser, prijímač a optické vlákno. Keďže DWDM systémy vysielať signály z viacerých optických zdrojov cez jediné vlákno, tak tieto systémy musia obsahovať niektoré komponenty na kombináciu prichádzajúcich signálov. Toto sa uskutočňuje pomocou multiplexora, ktorý berie optické vlnové dĺžky z viacerých vlákien a konvertuje ich do jedného lúča [1]. Na prijímajúcom konci musí byť systém schopný oddeliť zložky svetla tak, aby ich bolo možné jednoznačne určiť. Demultiplexory vykonávajú funkciu oddelenia jednotlivých zložiek od prijatého lúča. Demultiplexovanie sa vykonáva pred detegovaním svetla fotodetektorom, pretože fotodetektory sú vo svojej podstate širokopásmové zariadenia, ktoré nedokážu selektívne detegovať jednu vlnovú dĺžku. S DWDM systémami úzko súvisia aj javy ovplyvňujúce prenos v optických systémoch. Tieto javy delíme na lineárne a nelineárne [2]. Schopnosť poskytovať potencionálne neobmedzenú prenosovú kapacitu je zjavnou výhodou technológie DWDM. Investície v optovláknových systémoch môžu byť zachované vďaka optimalizácii súčasných optovláknových systémov. Pôvodne sa používali na kombináciu a oddelenie vlnových dĺžok interferenčné filtre na tenkých vrstvách. Po príchode EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) sa technológia DWDM dostala do popredia [3].

Na zvýšenie spektrálnej účinnosti a energie v systémoch DWDM, sa využíva široká škála techník. Jednou z týchto techník je efektívne riadenie šírky pásma, kde výkon systému DWDM je riadený zvyšovaním alebo znižovaním prenosovej rýchlosti na kanál alebo zvyšovaním alebo znižovaním počtu

kanálov alebo zmenou medzikanálových rozstupov. Ak je kanálový rozstup menší alebo rovný 200 GHz, systém sa nazýva DWDM. Odporúčanie ITU-T G.694.1 definuje 43 kanálov vlnovej dĺžky, od 1530 do 1565 nm s rozstupom 100 GHz. Komerčné systémy súčasnosti pracujú so 8, 16, 32, 64 a 128 kanálmi na vlákno. 32 kanálové systémy využívajú rozstupy 100 GHz zatiaľ čo 64 kanálové systémy majú rozstup kanálov 50 GHz. Súhrnná šírka pásma pre 32 kanálový systém je 400 Gb/s [5]. Vo všeobecnosti je dané, že jednovidové vlákno môže takto prenášať na vzdialenosť 80 km bez zosilnenia. Aj keď sa technológia DWDM stále vyvíja a technologovia a normalizačné orgány sa zaoberajú mnohými problémami, systémy sú už dostupné s niekoľkými desiatkami vlnových dĺžok v tom istom vlákne. V závislosti od topológie a dĺžky vlákna sa nemusí zaradovať optický zosilňovač [6,7]. Potreba zosilnenia a počet zosilňovačov je možné odhadnúť na základe vzdialenosti medzi vysielačom a prijímačom a podľa konštrukčných parametrov systému, ako je počet vlnových dĺžok (kanálov), šírka kanálov, modulačná technika, bitová rýchlosť, typ vlákna a ďalšie vlastnosti optických komponentov [8].

Obsah ďalších častí článku je nasledovný. V kapitole 2 sa venujeme javom ovplyvňujúcim prenos v optickom systéme, v ďalších kapitolách sa venujeme návrhu a analýze 8 kanálového DWDM systému a v závere zhrnutiu dosiahnutých výsledkov.

## 2 Javy ovplyvňujúce prenos v optickom systéme

Straty nelineárnym rozptylom vznikajú najmä pri vyšších hustotách optického výkonu v optickom vlákne. Nelineárne javy spôsobujú prechod optického výkonu z jedného vidu do druhého, ktorý sa šíri rovnakým, alebo opačným smerom. Výkonová závislosť indexu lomu je zodpovedná za Kerrov efekt. Podľa typu vstupu signálu sa Kerrov efekt prejavuje tromi účinkami ako SPM (Self-Phase Modulation) vlastná fázová modulácia, CPM (Cross-Phase Modulation) krížová fázová modulácia a FWM (Four-Wave Mixing) štvorvlnové zmiešavanie. Pri vysokej úrovni výkonu sa prejavuje stimulovaný Brillouin rozptyl SBS (Stimulated Brillouin-Scattering) a stimulovaný Ramanov rozptyl SRS (stimulated Raman-Scattering) [9].

### 2.1 Ramanov rozptyl

Patrí medzi nelineárne javy ovplyvňujúce prenos cez optické vlákno. Klasický opis interakcie žiarenia s vnútrómolekulárnymi pohybmi je založený na zvážení závislosti elektrónovej

polarizovateľnosti molekúl  $\alpha$  na jadrové súradnice. Elektro-novú polarizovateľnosť molekúl môžeme vypočítať pomocou rovnice (1):

$$\alpha(Q) = \alpha_0 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)_0 Q + \dots \quad (1)$$

Indukovaný dipólový moment závisí na súčtovej (anti-Stokes Raman) a rozdielovej (Stokes Raman) frekvencii.  $Q$  je teplotný pohyb v látke čo sa rovná spontánnemu Ramanovému rozptylu (RS- Raman Scattering). Vynucujúca sila môže spôsobiť rezonančné rozkmitanie. Pole žiarenia však tvoria dve vlny - vlna excitujúceho žiarenia a Stokesova vlna. Za takýchto podmienok sa na chaotické vnútrómolekulárne pohyby majúce fluktuatívny charakter, prikladajú vynútené kmity, ktorých fázy v jednotlivých molekulách sú určené fázami zložiek poľa žiarenia (tzv. sfázovanie molekulárnych vibrácií) v makroskopickom objeme vymedzenom svetelným poľom.

Stimulovaný Ramanov rozptyl SRS (Stimulated Raman Scattering) - je prahový jav, ktorý vzniká, ak intenzita svetelnej vlny o frekvencii  $\omega$  dopadajúcej na látkove prostredie prevyšuje prahovú hodnotu  $I \geq I_{thr}$ . Pri splnení tejto podmienky sa Stokesova vlna s frekvenciou  $\omega$  exponenciálne zosilňuje pri šírení prostredím. Predpokladajme jej šírenie v kladnom smere osi  $z$ ,  $g$  označuje koeficient zosilnenia. Exponenciálne zosilnenie vypočítame pomocou rovnice (2):

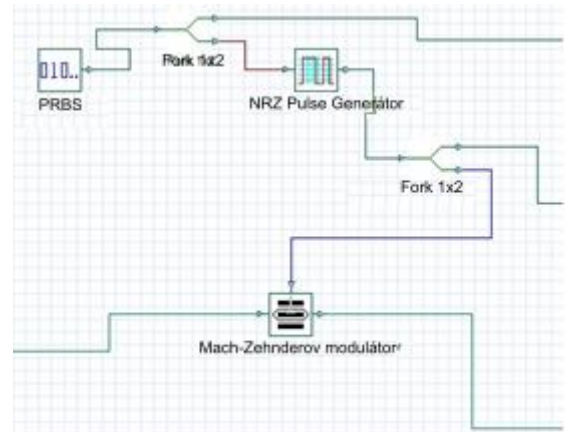
$$I_s = I_{s0} \exp(g I_L z) \quad (2)$$

Stimulovaný Ramanov rozptyl vedie k prenosu energie z dopovanej vlny na zúžené vysokofrekvenčné vlny a vlny s vyššou frekvenciou cez prenos optického fonónu v prenosovom médiu. Koeficienty stimulovaného zosilnenia pre rôzne procesy sú určené vlastnosťami optických fonónov. Prístup, ktorý sa bežne používa na opis Ramanovej interakcie v optických vláknach, spočíva v rozdelení problému na rovnice pre dopované vlny a kaskády Stokesovej vlny [10].

### 3 Návrh 8 kanálového DWDM systému

Program, ktorý sme využili na návrh 8 kanálového DWDM systému je od spoločnosti Optiwave, konkrétne Optisystem. Testovali sme optické kanály s rozstupmi 100 GHz, 50 GHz a 25 GHz. Použili sme NRZ generátor a Mach-Zehnder modulátor. Bitovú rýchlosť sme nastavili na 10 Gbit/s a vzorkovaciu frekvenciu na 256 GHz. Na Obrázku 1 môžeme vidieť podsystém v ktorom sa nachádza pseudonáhodná postupnosť, NRZ impulzný generátor s Gaussovým rozdelením a Mach-Zehnderovým modulátorom.

Optické impulzy sú zabezpečené zdrojom svetla CW (Continuous Wave) laserom. Nastavená frekvencia laserov je 193,1 THz. Rozstupy medzi kanálmi sme volili 100 GHz, 50 GHz a 25 GHz, Na multiplexovanie jednotlivých kanálov využívame WDM multiplex s nastavenou šírkou pásma 10 GHz a Besselovým filtrom.



Obrázok 1: Modulácia ASK- NRZ s Mach-Zehnderovým modulátorom.

Optický signál prechádza slučkou ktorá sa opakuje sedemkrát do jednovidového vlákna (SMF- Single Mode Fiber) v dĺžke 50 km následne EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zosilňovačom so ziskom 10 dB. Vlákno s kompenzáciou disperzie (DCF- Dispersion Compensating Fiber) je v dĺžke 10 km. Druhý EDFA zosilňovač má nastavený zisk 5 dB. V návrhu je zohľadnená aj vlastná fázová modulácia SPM (Self-Phase Modulation) s nelineárnym indexom  $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ .

Využívame WDM demultiplex s nastavenými parametrami ako pri multiplexe, šírka pásma je 10 GHz. Kvôli veľkému množstvu dát hodnotíme iba prvý a stredný prijímaný kanál. Ako optický prijímač sa využíva PIN fotodetektor so ziskom 3 a prúdom za tmy 10 nA. Celkový útlm na trase je 5,15 dB.

Na jednotlivých návrhoch budeme vyhodnocovať Q faktor, BER a diagram oka. Q faktor je funkciou OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) a predstavuje toleranciu systému v dB. BER a Q faktor sú blízke parametre [11]. Rovnica (3) vyjadruje vzorec pre výpočet BER a rovnica (4) vyjadruje vzorec pre výpočet Q faktoru.

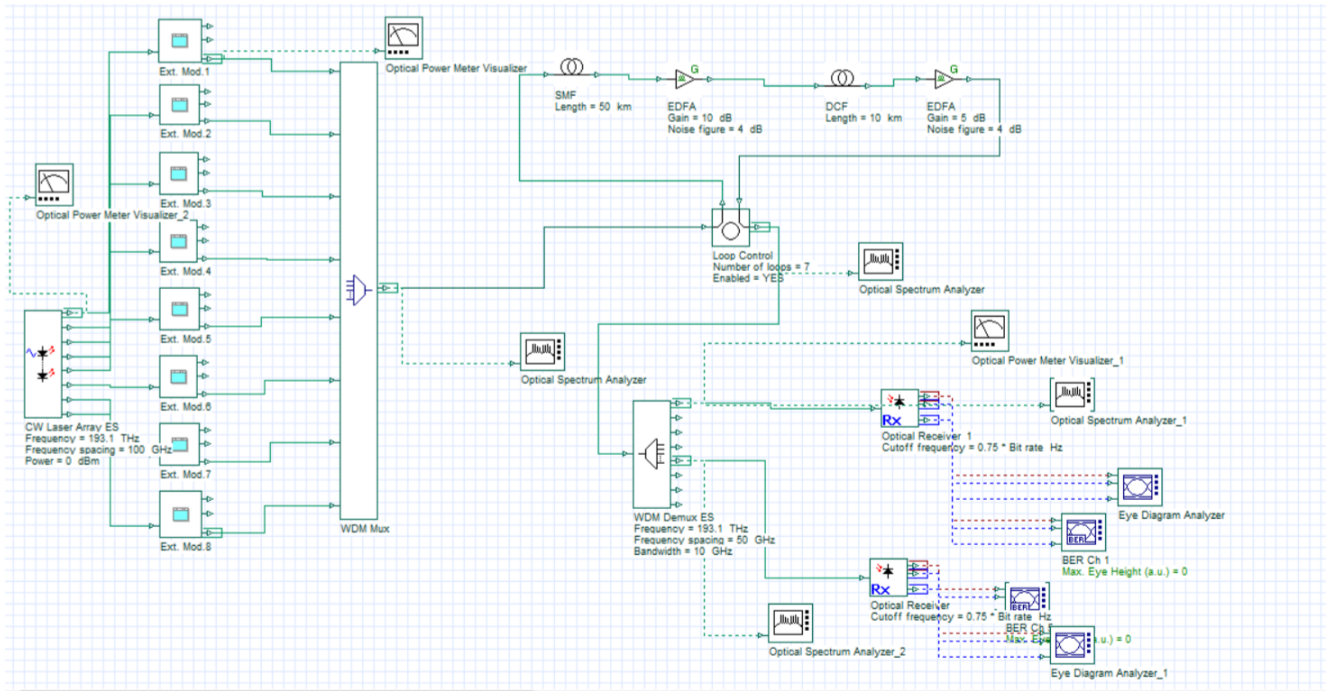
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} \exp \left( -\frac{Q^2}{2} \right) \quad (3)$$

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4)$$

V tomto vzťahu  $I_1$  je stredná hodnota a  $\sigma_1$  je odchýlka impulzu  $I$ ,  $I_0$  je stredná hodnota a  $\sigma_0$  je odchýlka impulzu  $0$ .

### 4 Analýza dosiahnutých výsledkov 8 kanálového 10 Gbit/s DWDM systému

V Tabuľke 1 sú spomenuté dôležité parametre pre návrh daného systému. V nasledujúcich tabuľkách budú uvedené parametre, ktoré sa menili. Obrázok 2 zobrazuje celkovú schému DWDM systému z programu OptiSystem. Pre tento návrh sme vyhodnotili aj spektrá po multiplexe a po demultiplexe (Obrázok 3 a Obrázok 4). Určili sme, že tento model bude referenčný vzhľadom na ďalšie merania.

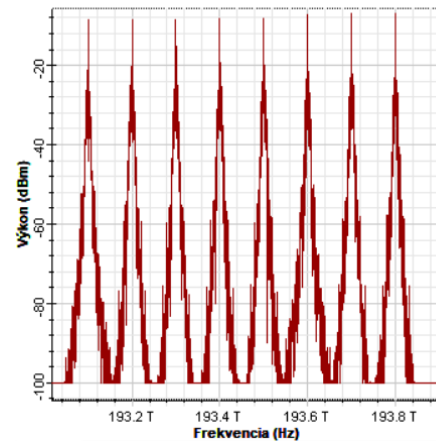


Obrázok 2: Celková schéma 8 kanálového systému z programu OptiSystem.

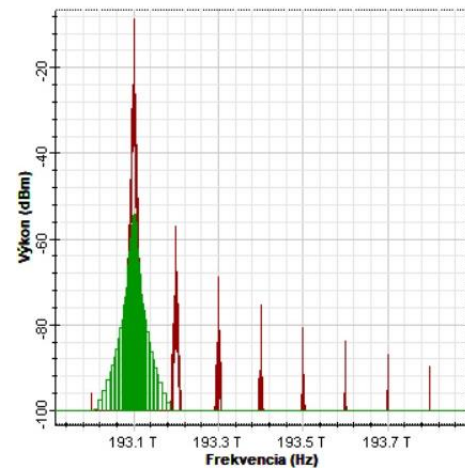
Tabuľka 1: Parametre 8 kanálového 10 Gbit/s DWDM systému s rozstupmi 100 GHz.

Bitová rýchlosť	10 Gbit/s
Typ modulácie	ASK
Vzorkovacia frekvencia	256 GHz
Výstupy lasera	8
Výkon lasera	1 mW
Frekvencia 1	193,1 THz
Frekvenčný rozstup	100 GHz
Vlnová dĺžka	1550 nm
EDFA 1 zosilnenie	10 dB
Výkon EDFA1	10 dBm
EDFA 2 zosilnenie	5 dB
Výkon EDFA 2	10 dBm
Dĺžka vlákna SMF	50 km
Dĺžka vlákna DCF	10 km
Disperzia vlákna SMF	16,75 ps/nm/km

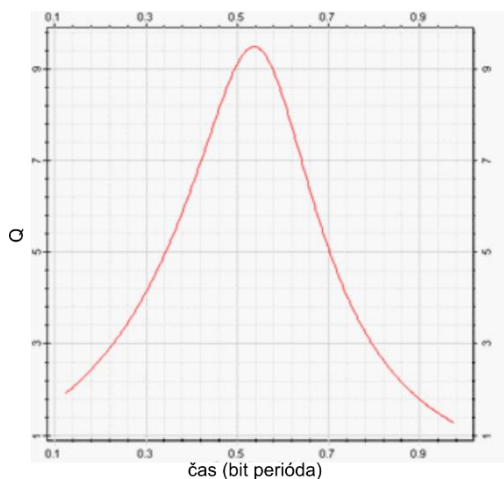
Hodnoty pre prvý simulovaný prípad sú max Q faktor=4,36291, BER=3,97507×10<sup>-6</sup>. Grafické výsledky môžeme vidieť na Obrázku 5 a 6. Otvorenosť oka=0,0001407031. Výsledok môžeme vidieť graficky na Obrázku 7.



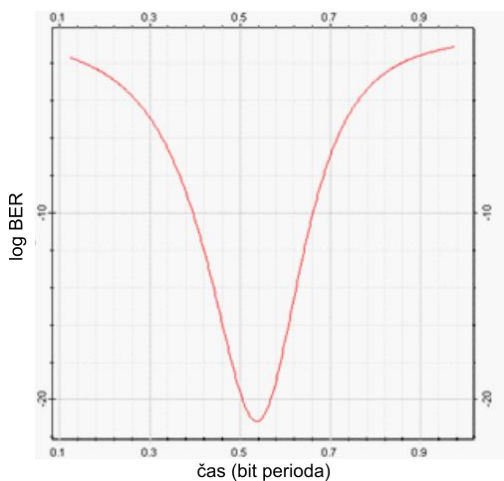
Obrázok 3: Výkonové spektrum 8 kanálového systému s rozstupmi 100 GHz po multiplexe.



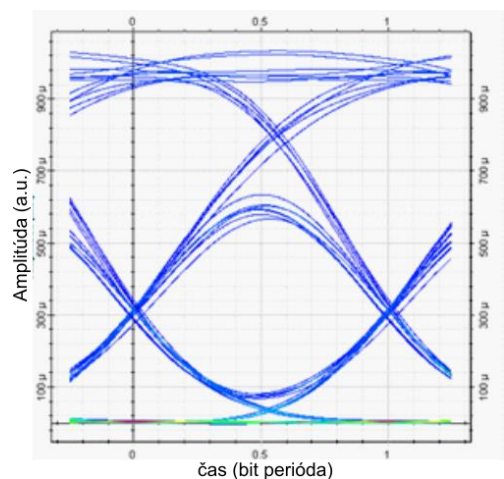
Obrázok 4: Výkonové spektrum 8 kanálového systému s rozstupmi 100 GHz po demultiplexe.



Obrázok 5: Parameter Q faktor prvého kanála 8 kanálového systému s rozostupmi 100 GHz.



Obrázok 6: Parameter BER prvého kanála 8 kanálového systému s rozostupmi 100 GHz.



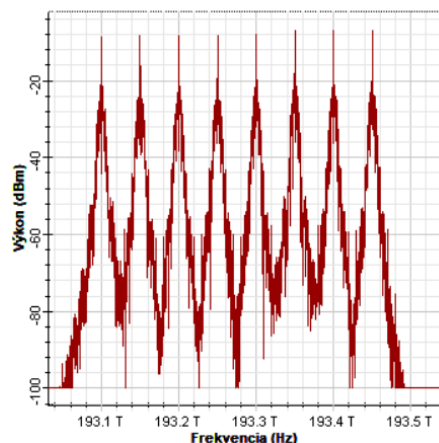
Obrázok 7: Diagram oka pre prvý prijatý kanál 8 kanálového systému s rozostupmi 100 GHz.

V návrhu kde sme zmenili medzery medzi vlnovými dĺžkami na 50 GHz a zachovali prenosovú rýchlosť vyššie hodnoty max Q faktor=4,29258, BER=5,53156x10<sup>-6</sup>. Otvorenosť

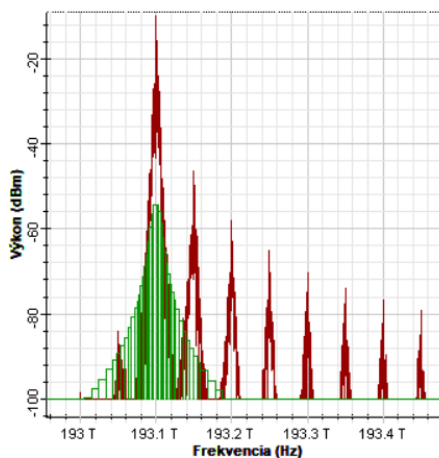
oka=0,000227152. Spektrum po multiplexe a po demultiplexe pre tento simulovaný prípad je znázornené na Obrázku 8 a na Obrázku 9. Výsledky pre Q faktor a BER môžeme vidieť graficky na Obrázku 10 a na Obrázku 11. Diagram oka pre tento prípad je znázornený na Obrázku 12. V Tabuľke 2 sú spomenuté dôležité parametre pre návrh daného systému. Frekvenčný rozostup sa zmenil na 50 GHz.

Tabuľka 2: Parametre 8 kanálového 10 Gbit/s DWDM systému s rozostupmi 50 GHz.

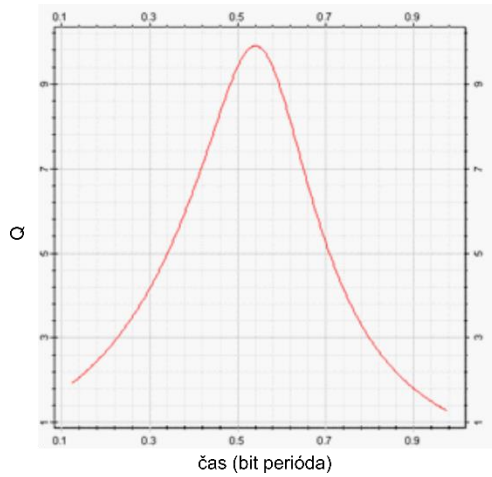
Bitová rýchlosť	10 Gbit/s
Typ modulácie	ASK
Vzorkovacia frekvencia	256 GHz
Výstupy lasera	8
Výkon lasera	1 mW
Frekvencia 1	193,1 THz
Frekvenčný rozostup	50 GHz



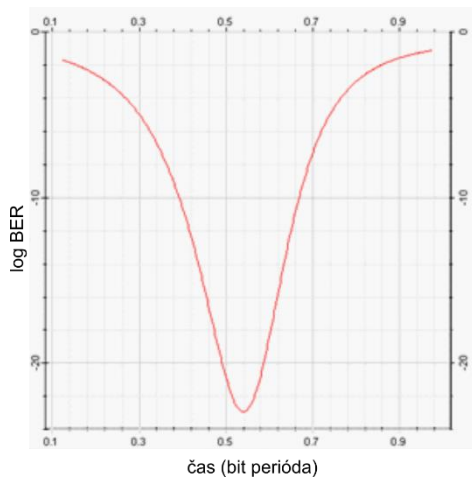
Obrázok 8: Výkonové spektrum 8 kanálového systému s rozostupmi 50 GHz po multiplexe.



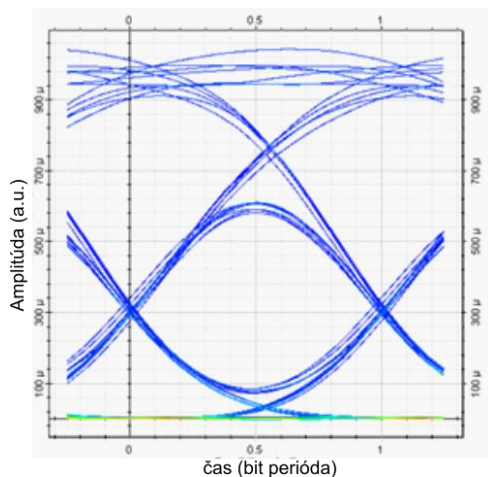
Obrázok 9: Výkonové spektrum 8 kanálového systému s rozostupmi 50 GHz po demultiplexe.



Obrázok 10: Parameter Q faktor prvého kanála 8 kanálového systému s rozstupmi 50 GHz.



Obrázok 11: Parameter BER prvého kanála 8 kanálového systému s rozstupmi 50 GHz.



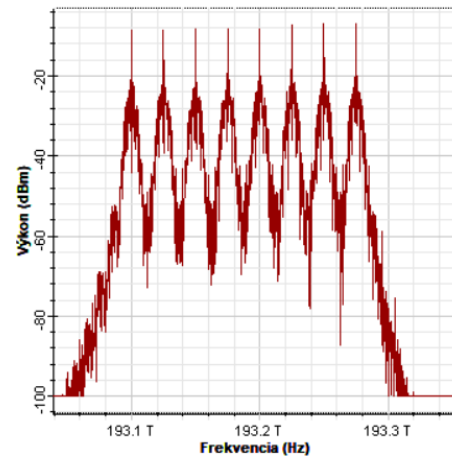
Obrázok 12: Diagram oka pre prvý prijatý kanál 8 kanálového systému s rozstupmi 50 GHz.

V návrhu kde sme zmenili medzery medzi vlnovými dĺžkami na 25 GHz a zachovali prenosovú rýchlosť vyššie hodnoty max  $Q$  faktor=4,75331,  $BER=6,50521 \times 10^{-7}$ . Otvorenosť

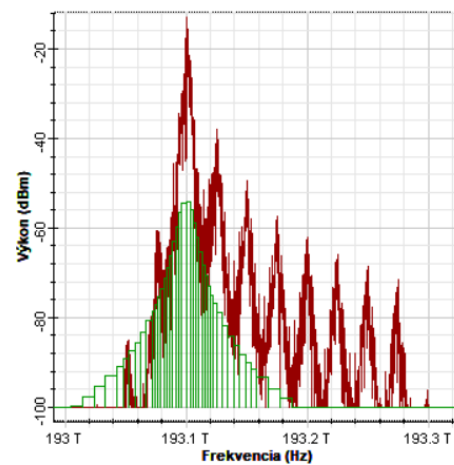
oka=0,000250643. Spektrum po multiplexe a po demultiplexe je znázornené na Obrázku 13 a 14. Výsledky môžeme vidieť graficky na Obrázku 15 a 16 a diagram oka na Obrázku 17. V Tabuľke 3 sú spomenuté dôležité parametre pre návrh daného systému.

Tabuľka 3: Parametre 8 kanálového 10 Gbit/s DWDM systému s rozstupmi 25 GHz.

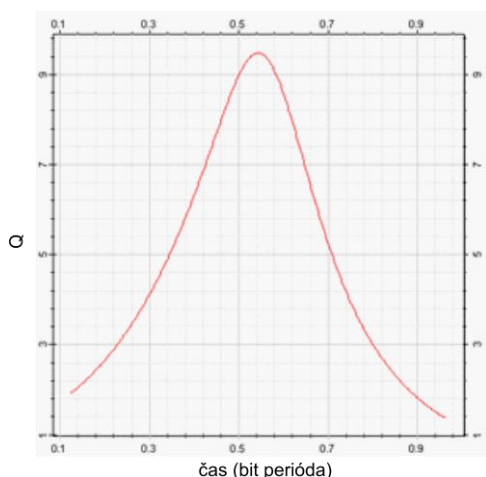
Bitová rýchlosť	10 Gbit/s
Typ modulácie	ASK
Vzorkovacia frekvencia	256 GHz
Výstupy lasera	8
Výkon lasera	1 mW
Frekvencia 1	193,1 THz
Frekvenčný rozstup	25 GHz



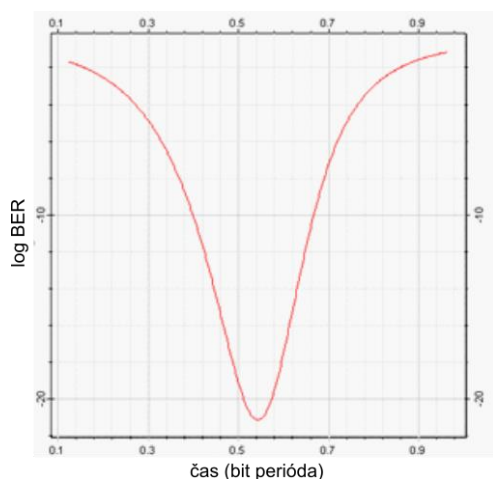
Obrázok 13: Výkonové spektrum 8 kanálového systému s rozstupmi 25 GHz po multiplexe.



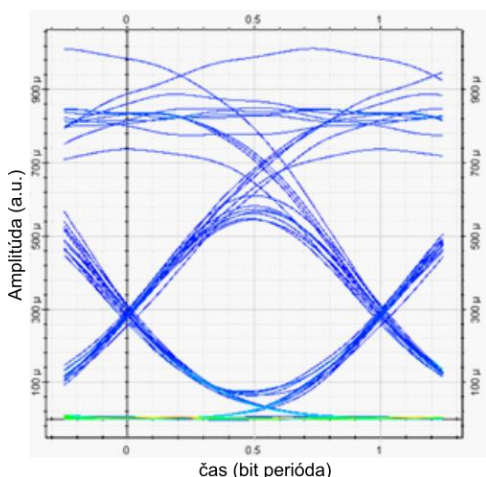
Obrázok 14: Výkonové spektrum 8 kanálového systému s rozstupmi 25 GHz po demultiplexe.



Obrázok 15: Parameter Q faktor prvého kanála 8 kanálového systému s rozostupmi 25 GHz.



Obrázok 16: Parameter BER faktor prvého kanála 8 kanálového systému s rozostupmi 25 GHz.



Obrázok 17: Diagram oka pre prvý prijatý kanál 8 kanálového systému s rozostupmi 25 GHz.

V Tabuľke 4 sú prehľadne zobrazené všetky výsledky, ktoré sme dosiahli v simulácii pre 8 kanálový 10 Gbit/s DWDM systém s moduláciou NRZ ASK.

Tabuľka 4: Výsledky DWDM systému s bitovou rýchlosťou 10 Gbit/s.

Výsledky 8 kanálového 10 Gbit/s DWDM systému s rozostupmi 100 GHz (NRZ ASK)	
Q faktor	4,36291
Min BER	$3,97507 \times 10^{-6}$
Otvorenosť oka	0,000240385
Výsledky 8 kanálového 10 Gbit/s DWDM systému s rozostupmi 50 GHz	
Q faktor	4,29258
Min BER	$5,53156 \times 10^{-6}$
Otvorenosť oka	0,000227152
Výsledky 8 kanálového 10 Gbit/s DWDM systému s rozostupmi 25 GHz	
Q faktor	4,75331
Min BER	$6,50521 \times 10^{-7}$
Otvorenosť oka	0,000250643

## 5 Záver

V tomto článku sme sa venovali opisu optických sietí, technológii DWDM. Pre DWDM sa využívajú prevažne jednovlňové vlákna. Testovali sme jeden modulátor (Mach-Zehnderov). Najjednoduchšiu moduláciu ASK sme testovali na nízkej prenosovej rýchlosti a to 10 Gbit/s, kde prijímač zachytil požadovanú úroveň vysielaného signálu. So znižujúcimi sa rozostupmi medzi vlnovými dĺžkami bez zmeny iných parametrov v danom systéme boli výsledné hodnoty, minimal BER horšie ako z referenčného merania. Najmenšia hodnota otvorenosti oka bola pri simulácii s 50 GHz rozostupmi a najvyššia v simulácii s 25 GHz rozostupmi.

## Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná nasledujúcimi výskumnými projektami: APVV-17-0208 – Odolné mobilné siete na doručovanie obsahu a VEGA 1/0584/20 - UWB senzorové systémy monitorovania osôb pracujúce v reálnych podmienkach.

## Literatúra

- [1] WINZER, Peter J. Energy-Efficient Optical Transport Capacity Scaling Through Spatial Multiplexing. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2011, **23**(13), 851 - 853. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/LPT.2011.2140103
- [2] HUSZANÍK, Tomáš, Ján TURÁN a Ľuboš OVSENÍK. On the Impact of Fiber Nonlinear Effects on the CP-DQPSK Modulated Ultra-DWDM System. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2019, **19**(4), 21-28. ISSN 1335-8243. Dostupné z: doi:10.15546/aei-2019-0026

- [3] GUENTHER, Robert D. *Modern Optics Simplified*. Oxford: Oxford University Press, 2019. ISBN 978-0-19884-286-6.
- [4] JAWLA, Shashi. Different Modulation Formats Used In Optical Communication System. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*. 2013, **8**(4), 15-18. ISSN 2278-8735. Dostupné z: doi:10.9790/2834-0841518
- [5] *G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. ITU-T, 2020. Dostupné tiež z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>
- [6] SEIMETZ, Matthias. *High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. ISBN 978-3-54093-770-8.
- [7] DONG, Po. a kol. Silicon In-Phase/Quadrature Modulator With On-Chip Optical Equalizer. *Journal of Lightwave Technology*. 2015, **33**(6), 1191-1196. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.2015.2396039
- [8] SABELLA, Roberto a Paolo LUIGLI. *High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission*. Dordrecht: Springer US, 1999. ISBN 978-0-412-80220-1.
- [9] SENIOR, John M. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. 3rd Edition. London: Pearson, 2008. ISBN 978-0-13032-681-2.
- [10] AGRAWAL, Govind P. *Optical Fiber Communications: Optics and Photonics*. 5th Edition. Cambridge: Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12397-023-7.
- [11] KIAEE, Marzieh S. a Faramarz E. SERAJI. Design of a 32×5 Gb/s DWDM Optical Network over a Distance of 1000 km. *International Journal of Optics and Applications*. 2016, **6**(2), 31-36. ISSN 2168-5053. Dostupné z: doi:10.5923/j.optics.20160602.02