



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA
ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Martin Mokrň

Autoreferát dizertačnej práce

Analýza efektívnosti využitia prenosovej kapacity optického vlákna použitím rôznych techník WDM

na získanie akademického titulu („doktor“ („philosophiaedoctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe: Telekomunikácie

v študijnom odbore: Informatika

Forma štúdia: Externá

Miesto a dátum: Bratislava, 31.05.2021

Dizertačná práca bola vypracovaná na

Ústave multimediálnych informačných a komunikačných technológií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Martin Mokráň

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav multimediálnych informačných a komunikačných technológií

Školiteľ:

doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav multimediálnych informačných a komunikačných technológií

Oponenti:

prof. Ing. Milan Dado, PhD.

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Katedra multimédií a informačno-komunikačných technológií
Fakulta elektrotechniky a informačných technológií

doc. Ing. Peter Drahoš, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav automobilovej mechatroniky

Autoreferát bol rozoslaný:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa.....o.....h.
na: STU FEI Ústave multimediálnych informačných a komunikačných technológií

.....
Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty

Obsah

1. Úvod	2
2. Súčasný stav riešenej problematiky	3
2.1 Multiplexovanie s vlnovodízkovým delením	3
2.2 Simulácia systémov WDM	3
3. Ciele dizertačnej práce	4
4. Metodika práce a metódy skúmania a výsledky práce	5
4.1 Zvýšenie rýchlosti behu simulácie	5
4.2 Analýza, simulácia a výsledky systému CWDM	6
4.2.1 Demultiplexor CWDM	8
4.2.2 Výsledky simulácie 4-kanálového CWDM systému	9
4.3 Analýza, simulácia a výsledky systému DWDM	13
4.3.1 Výsledky simulácie 15-kanálového DWDM systému	17
4.4 Záver	22
5. Pôvodné vedecké prínosy	23

1. Úvod

Optické vlákno predstavuje prostredie, ktoré je vhodné na prenos informácií na veľké vzdialenosti pomocou optického žiarenia. Keďže narastá potreba zvyšovania prenosových rýchlostí, je potrebné hľadať metódy, ktoré umožňujú efektívne využitie prenosového pásma, ktoré ponúka optické prenosové médium. Jednou z týchto metód je multiplexovanie s vlnovodízkovým delením WDM, ktoré umožňuje súčasný prenos viacerých informačných kanálov pomocou jednej optickej prenosovej cesty. Pre úspešné pochopenie prenosu WDM v optických sieťach je potrebné oboznámiť sa s vlastnosťami optického prenosového prostredia, ktoré negatívne ovplyvňuje prenášaný signál.

Práca sa venuje stručnému opisu rôznych multiplexných techník, ktoré sa využívajú na optickom prenosovom vlákne a detailne sa zameriava na multiplexovanie s vlnovodízkovým delením. Ďalej sa venuje rozdeleniu techník WDM podľa počtu prenášaných kanálov resp. kanálovému odstupu. V predposlednej časti sa práca venuje konkrétnej simulácii 4 kanálového systému CWDM a 15 kanálového DWDM systému, ktoré boli implementované do existujúceho modelu optickej prenosovej cesty a zobrazeniu výsledkov simulácie v spektre a pomocou diagramov oka.

2. Súčasný stav riešenej problematiky

Multiplexné techniky umožňujú prenos viacerých informačných signálov (napr. od viacerých používateľov) súčasne cez jedno prenosové médium – jednomódové optické vlákno. Tieto techniky sú v dnešnej dobe široko rozšírené v oblasti prenosových systémov, keďže umožňujú zvýšenie prenosovej kapacity optických prenosových médií a zníženiu systémových nákladov.

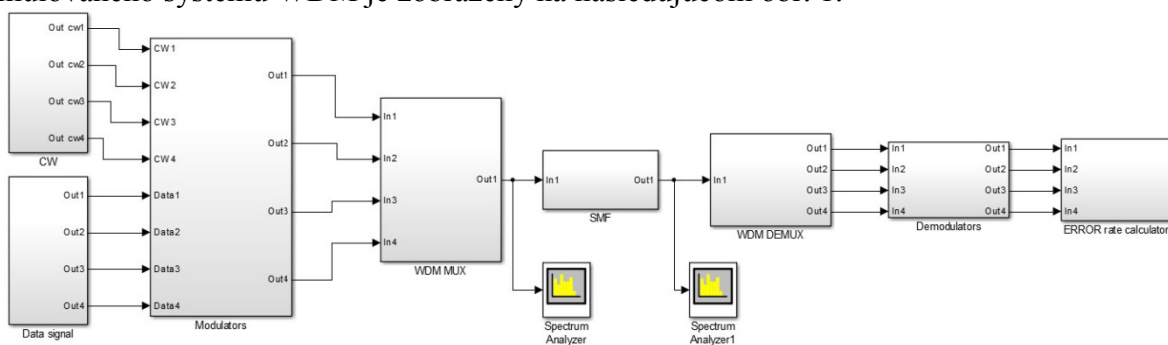
2.1 Multiplexovanie s vlnovodľzkovým delením

Kapacita WDM systému je závislá od počtu prenášaných kanálov v dostupnom pásme, a tým pádom aj od ich vzájomnej vzdialenosti v spektre – tzv. kanálovom odstupe. Čím je odstup medzi jednotlivými kanálmi menší, tým viac kanálov je možné v prenášanom pásme preniesť, t.j. tým väčšia bude kapacita. Najčastejšie sa môžeme stretnúť s typmi WDM, ktoré sa podľa kanálového odstupe rozdeľujú na:

- multiplexovanie s riedkym vlnovodľzkovým delením CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing),
- multiplexovanie s hustým vlnovodľzkovým delením DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

2.2 Simulácia systémov WDM

Simulácie prebiehali v simulačnom prostredí MATLAB Simulink 2019b s knižnicami Communications System Toolbox a DSP System Toolbox a pozostávali z implementácie techník WDM do existujúceho modelu optického prenosového systému [13-16]. Základný model simulovaného systému WDM je zobrazený na nasledujúcom obr. 1.



Obr.1. Simulačný model WDM systému

Tento model pozostáva z nasledujúcich blokov:

- Zdroje dátových signálov
- Zdroje optických signálov CW
- Blok modulátorov MZM
- WDM multiplexor
- Model optickej prenosovej cesty
- WDM demultiplexor
- Blok demodulátorov
- Blok výpočtu bitovej chybovosti BER

3. Ciele dizertačnej práce

Cieľom práce je analyzovať efektívnosť využitia prenosovej kapacity optického vlákna v konvergovanej infraštruktúre NGN, navrhnúť riešenia pre jej zvyšovanie použitím rôznych techník WDM, špecifikovať efektívne prepojenie a spoluprácu technológií v optokomunikačných sieťach a podporiť poskytovanie nových širokopásmových multimediálnych služieb a aplikácií pre koncových účastníkov.

1. Rozšírenie simulačného modelu pre optické prenosové médium a implementácia ďalších používaných zariadení, definovanie matematickej reprezentácie a návrh vhodnej formy multiplexnej techniky pre jej kompletné implementovanie v optických prenosových systémoch.
2. Optimalizácia simulačných metód multiplexných techník v prostredí Simulink s cieľom zlepšenia presnosti simulačného modelu.
3. Na základe výsledkov simulácie posúdenie možností praktickej realizácie navrhovanej vhodnej formy multiplexnej techniky v reálnych optokomunikačných sieťach.

4. Metodika práce a metódy skúmania a výsledky práce

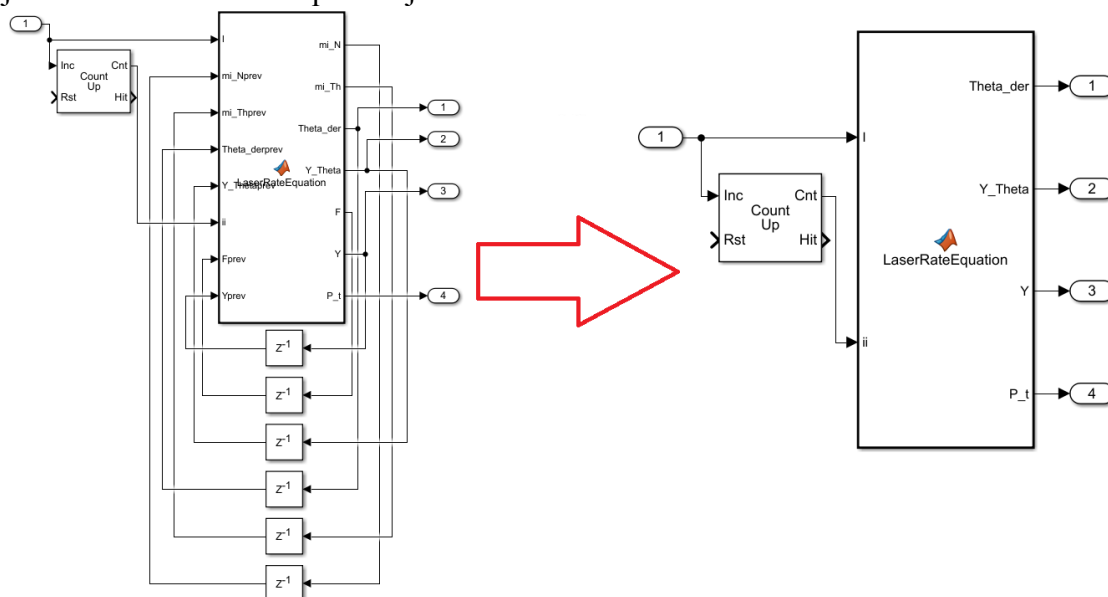
Cieľom dizertačnej práce je rozšírenie simulačného modelu pre optické prenosové médium a implementácia ďalších používaných zariadení, optimalizácia simulačných metód a návrh vhodnej formy multiplexnej techniky pre implementovanie v optických prenosových systémoch. Prvým krokom bolo vytvorenie blokov vlnovodíkových multiplexorov a demultiplexorov ktoré som zapojil do modelu optického prenosového systému, ktorý je naprogramovaný v prostredí Matlab Simulink 2019b. Keďže je model optického prenosového systému dizajnovaný na prenos signálu na jednej vlnovej dĺžke bolo potrebné prispôbiť blok zdroja optického signálu, modulátor a model optickej prenosovej cesty. Aby bola zabezpečená vyššia presnosť nameraných výsledkov je v simulovaných WDM systémoch použitých viac modelov optických prenosových ciest pre rôzne vlnové dĺžky – pre CWDM systém 4 a pre DWDM systém 3, toto zapojenie bolo však náročné na výpočtový výkon, preto som vykonal analýzu a úpravy simulačného programu, ktoré umožnili zvýšenie rýchlosti behu simulácie. Na záver som vyjadril hodnoty faktora kvality (Q-faktor) a bitovej chybovosti pre prenášané kanály WDM systémov a určil najvhodnejšiu kombináciu prenášaných DWDM kanálov na optickom prenosovom médiu s danými parametrami.

4.1 Zvýšenie rýchlosti behu simulácie

Po analýze simulačného programu som identifikoval nasledujúce bloky simulačného programu, ktoré výrazne spomaľovali priebeh simulácie:

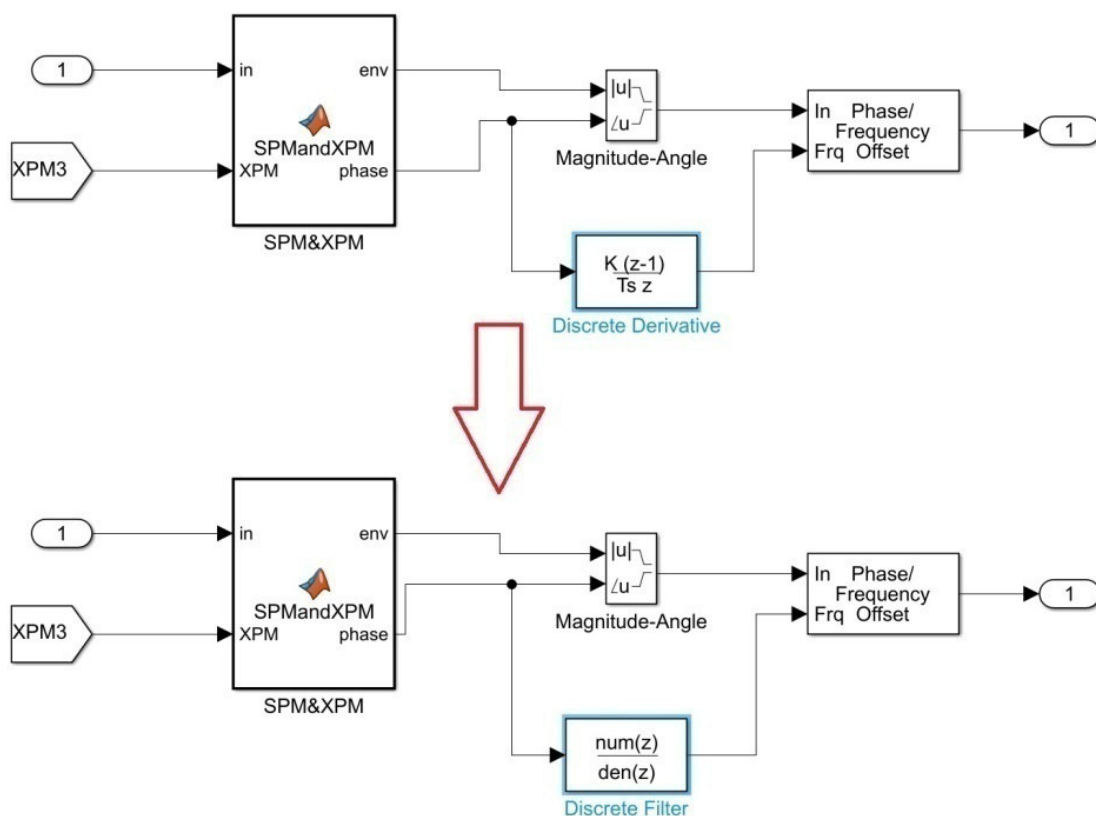
- Blok LaserRateEquation, ktorý je súčasťou bloku Rungekutta laser a je publikovaný v [20]
- Blok DiscreteDerivator v bloku SPM & XPM, ktorý je súčasťou bloku SMF a je publikovaný v [13, 15, 16]

V bloku LaserRateEquation je pri výpočtoch použitá spätná väzba (na výpočet výstupných hodnôt sa používajú vzorky z predošlého behu výpočtu). Pôvodné zapojenie bloku nebolo optimalizované, keďže na realizáciu spätnej väzby sa používali oneskorovacie bloky ktorých výsledok vstupoval späť do bloku LaserRateEquation. Oneskorovacie bloky simuláciu spomaľovali a komplikovali prípadné zmeny vzorkovacej frekvencie (resp. vzorkovacieho času). Toto zapojenie som zmenil tak, aby sa vzorky ukládali do pamäti (Matlab workspace), pri ďalšom behu sa čítali a po použití vo výpočtoch aktualizovali. Táto zmena si vyžadovala aj zmenu programového kódu v bloku, do mechanizmu výpočtu som však nezasahoval. Zmena zapojenia bloku LaserRateEquation je znázornená na obr.2.



Obr.2. Zmena zapojenia bloku LaserRateEquation

Blok DiscreteDerivate, ktorý bol súčasťou bloku SPM & XPM som nahradil diskretným filtrom ktorý je odporúčaný v dokumentácii Matlabu [30] ako vhodná alternatíva diskretného derivátora. Zmena je zapojenia je znázornená obr.3



Obr.3. Nahradenie bloku DiscreteDerivator

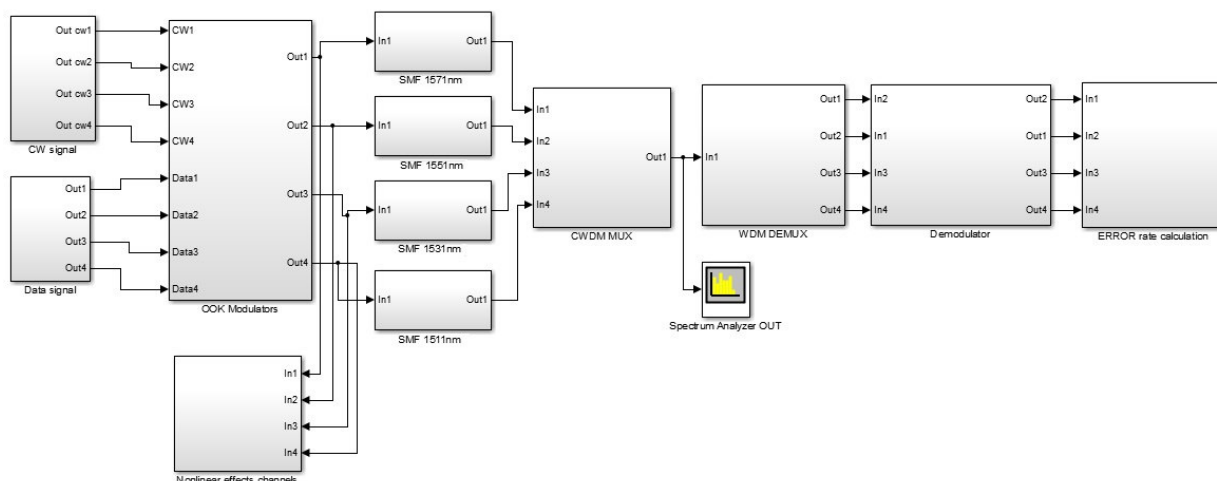
Po zapracovaní vyššie spomínaných zmien v programe bol výpočet v základnom modeli (t.j. jeden prenášaný kanál s jedným blokom prenosovej cesty) zrýchlený približne 10 násobne.

4.2 Analýza, simulácia a výsledkysystému CWDM

Pre simuláciu systému CWDM boli zvolené nasledovné parametre, ktoré zodpovedajú vyššie uvedenému kanálovému odstupu 20 nm [19]:

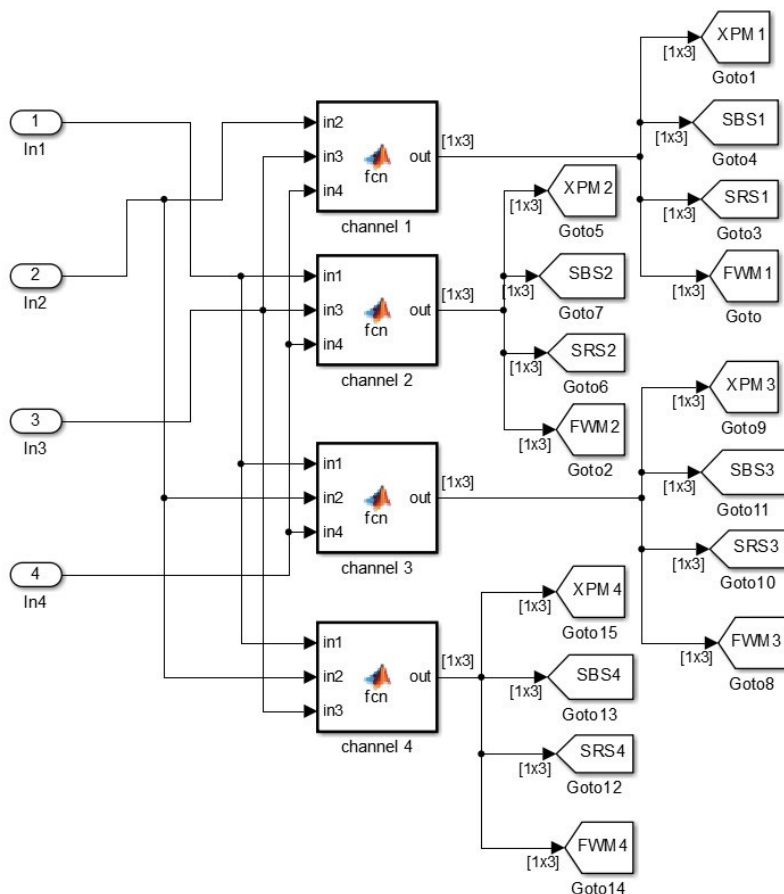
1. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1571$ nm $\Rightarrow f=190,83$ THz
2. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1551$ nm $\Rightarrow f=193,29$ THz
3. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1531$ nm $\Rightarrow f=195,81$ THz
4. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1511$ nm $\Rightarrow f=198,41$ THz

Pri simulácii bola pre všetky kanály použitá rovnaká modulačná technika OOK pri rovnakej prenosovej rýchlosti každého z kanálov 10 Gbit/s. Zapojenie 4-kanálového systému CWDM v simulačnom prostredí je na obr.4.



Obr.4. Zapojenie 4-kanálového systému CWDM

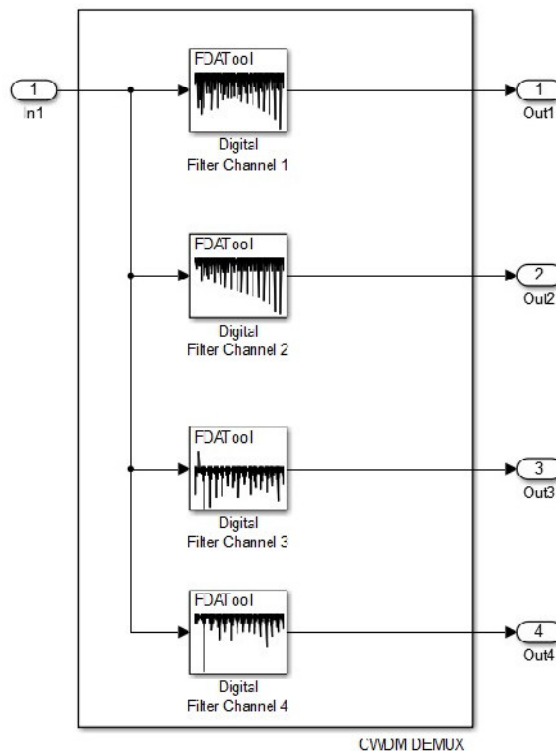
Aby bolo možné dosiahnuť vyššiu presnosť efektov ovplyvňujúcich kvalitu prenosu signálov CWDM, bol model optickej prenosovej cesty rozdelený na 4 časti tak, že každý kanál prenášaného signálu mal vlastný model optickej prenosovej cesty. Tieto modely boli prepojené tak, aby sa jednotlivé prenášané kanály navzájom ovplyvňovali (t.j. 1. kanál je ovplyvňovaný 2., 3. a 4. kanálom, 2. kanál je ovplyvňovaný 1., 3. a 4. kanálom, atď.). Každý z modelov prenosových ciest obsahuje bloky nelineárnych efektov, ktoré potrebujú pre správnu funkciu signál zo združených susediacich prenášaných kanálov. Preto sa v simulovanom systéme CWDM nachádza pomocný blok ktorý vykonáva túto funkciu. Vnútné zapojenie tohto pomocného bloku je na obr.5. Keďže vplyv prenosovej cesty je simulovaný jednotlivo na každom kanále, bol blok multiplexora CWDM zapojený v simulačnom programe až za blok SMF.



Obr. 5. Zapojenie 4-kanálového systému CWDM

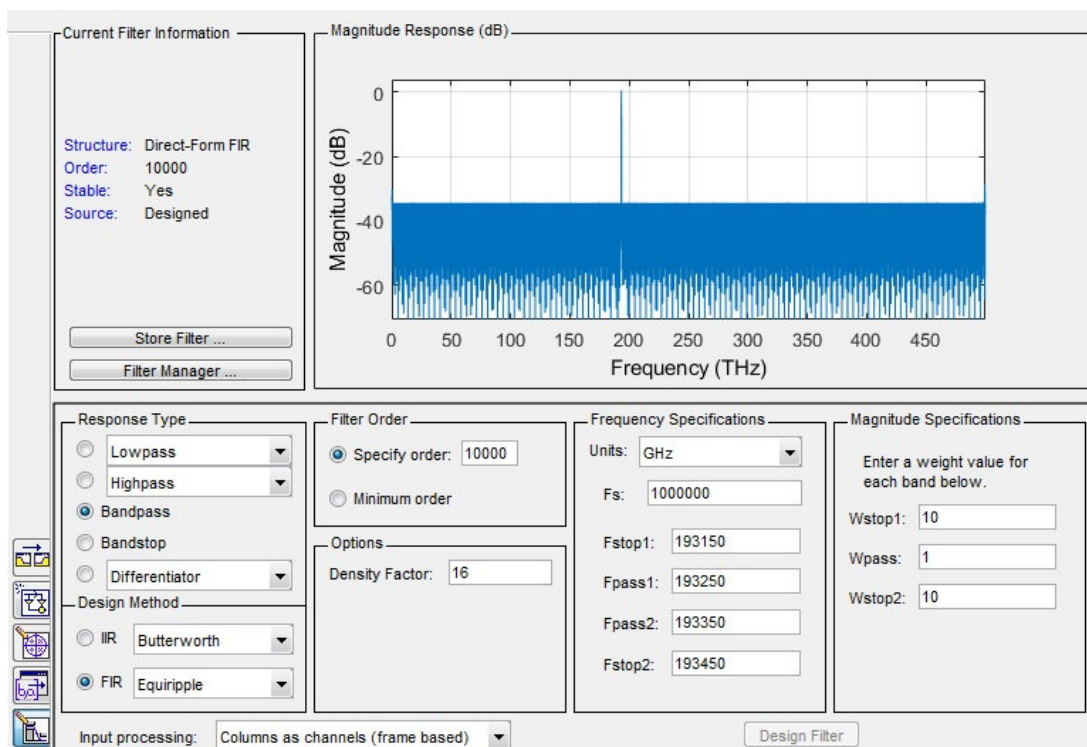
4.2.1 Demultiplexor CWDM

Vnútročné zapojenie demultiplexora CWDM je zobrazené na obr. 6. Ako už bolo spomenuté, pozostáva zo sady filtrov, z ktorej každý prepúšťa len jeden kanál.



Obr. 6. Demultiplexor WDM

Nastavenie filtra pre 2. kanál je zobrazené na obr. 7. Ostatné filtre v demultiplexore sú nastavené podobne, len s rozdielnym pásmom prepúšťania (t.j. líšia sa len v hodnotách Fstop1, Fpass1, Fpass2 a Fstop2).



Obr. 7. Nastavenie filtra CWDM pre 2. kanál

4.2.2 Výsledky simulácie 4-kanálového CWDM systému

Ako už bolo spomenuté, simulácia bola vykonaná v prostredí MatlabSimulink 2019b a pozostávala z implementácie 4-kanálového systému CWDM do existujúceho modelu optického vlákna, ktoré je opísané v prácach [13 - 16]. V simulácii boli použité nasledujúce parametre optického vlákna charakteristické pre vlnovú dĺžku 2. kanála,

$\lambda_2 = 1551$ nm :

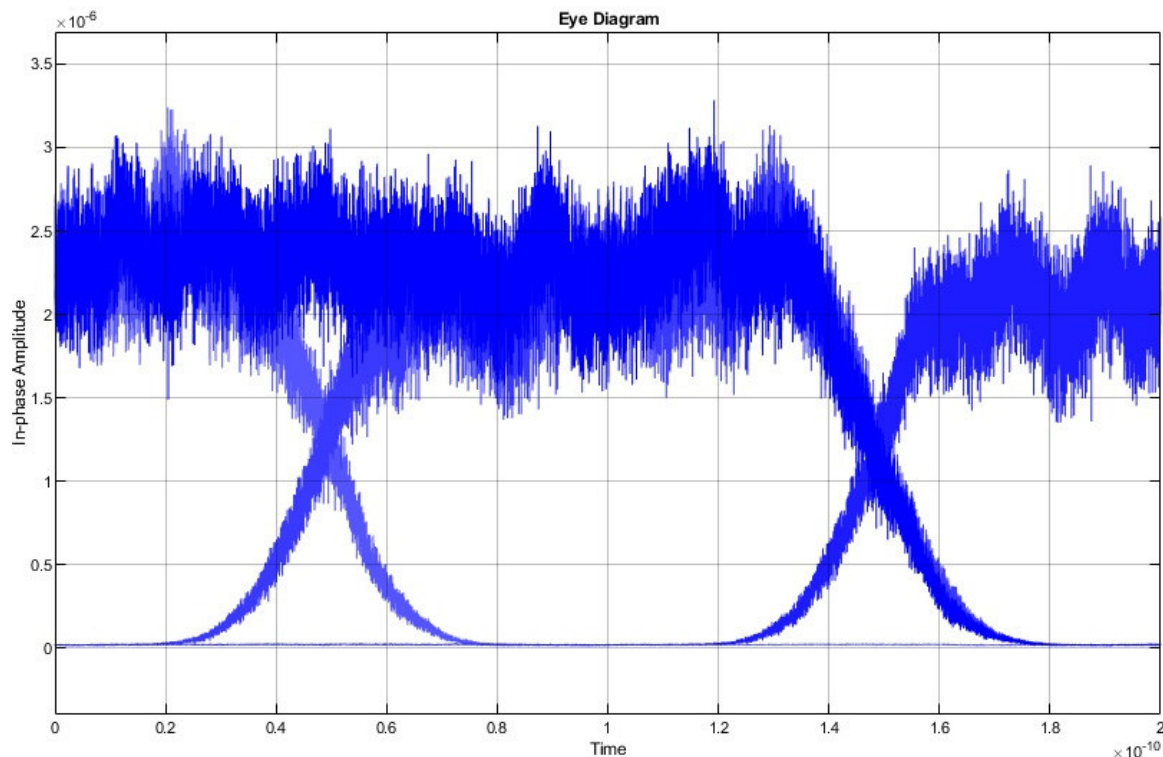
- dĺžka vlákna $L = 80$ km,
- prenosová rýchlosť 10 Gbit/s na kanál,
- použitá modulačná technika OOK.

Keďže tlmenie optického vlákna je závislé od vlnovej dĺžky, sú pre rôzne vlnové dĺžky nastavené rôzne parametre tlmenia [26, 27]. Hodnoty parametra alfa v závislosti od vlnovej dĺžky a celkové tlmenie pre zvolenú dĺžku sú v nasledujúcej tabuľke 1.

Tab 1 – Hodnoty parametra alfa v závislosti od vlnovej dĺžky a celkové tlmenie pre zvolenú dĺžku

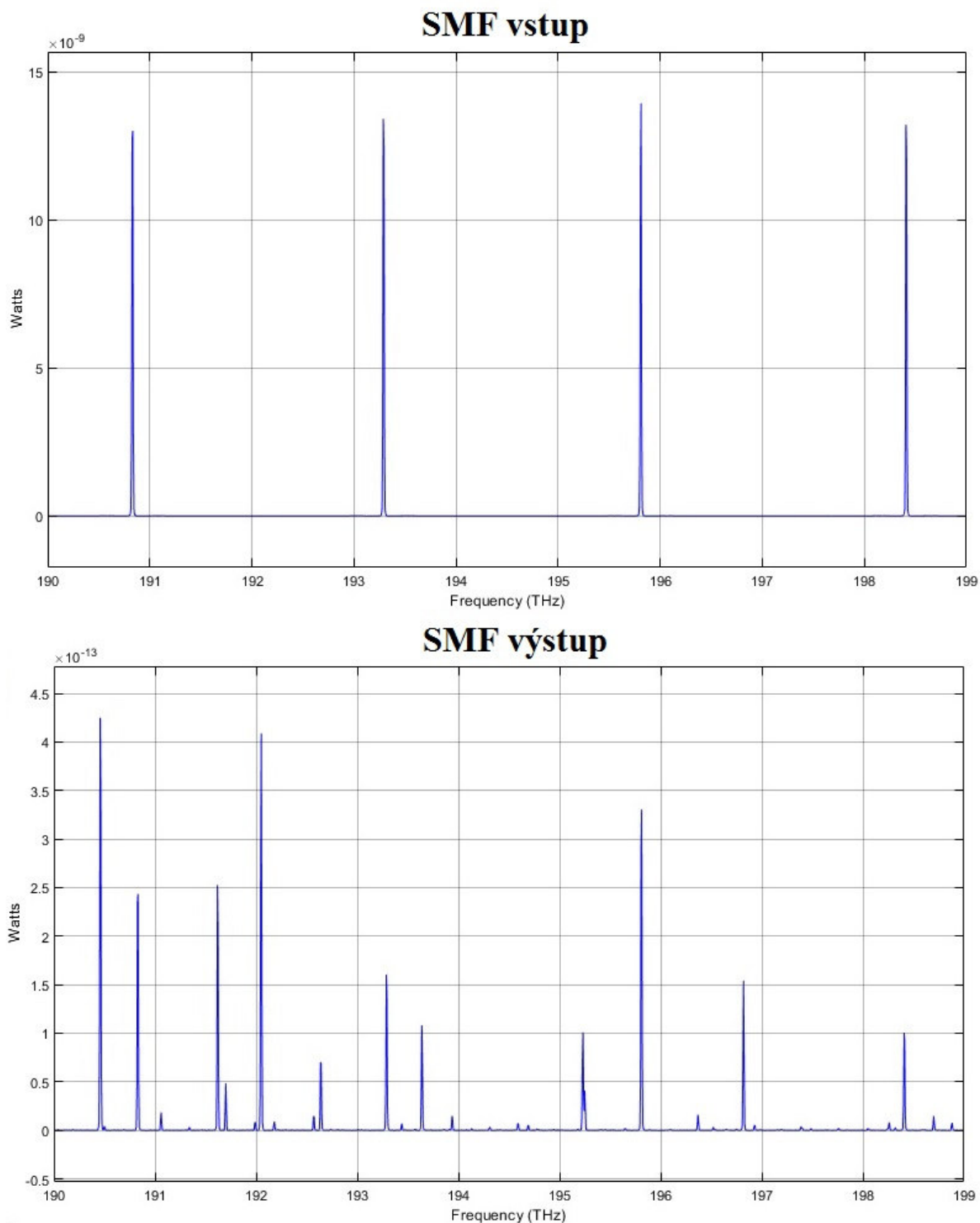
λ [nm]	α_{spec} [dB/km]	α_{celk} [dB]
1511	0,21375	17,1
1531	0,2	16
1551	0,21	16,8
1571	0,21375	17,1

Simulačný program obsahuje diagram oka, vďaka ktorému je možné pozorovať vzdialenosť medzi logickými úrovňami prenášaného signálu (t.j. log.0 a log.1). Diagram oka pre 2. prenášaný kanál je zobrazený na obr. 8.



Obr. 8. Diagram oka pre 2. kanál CWDM signálu

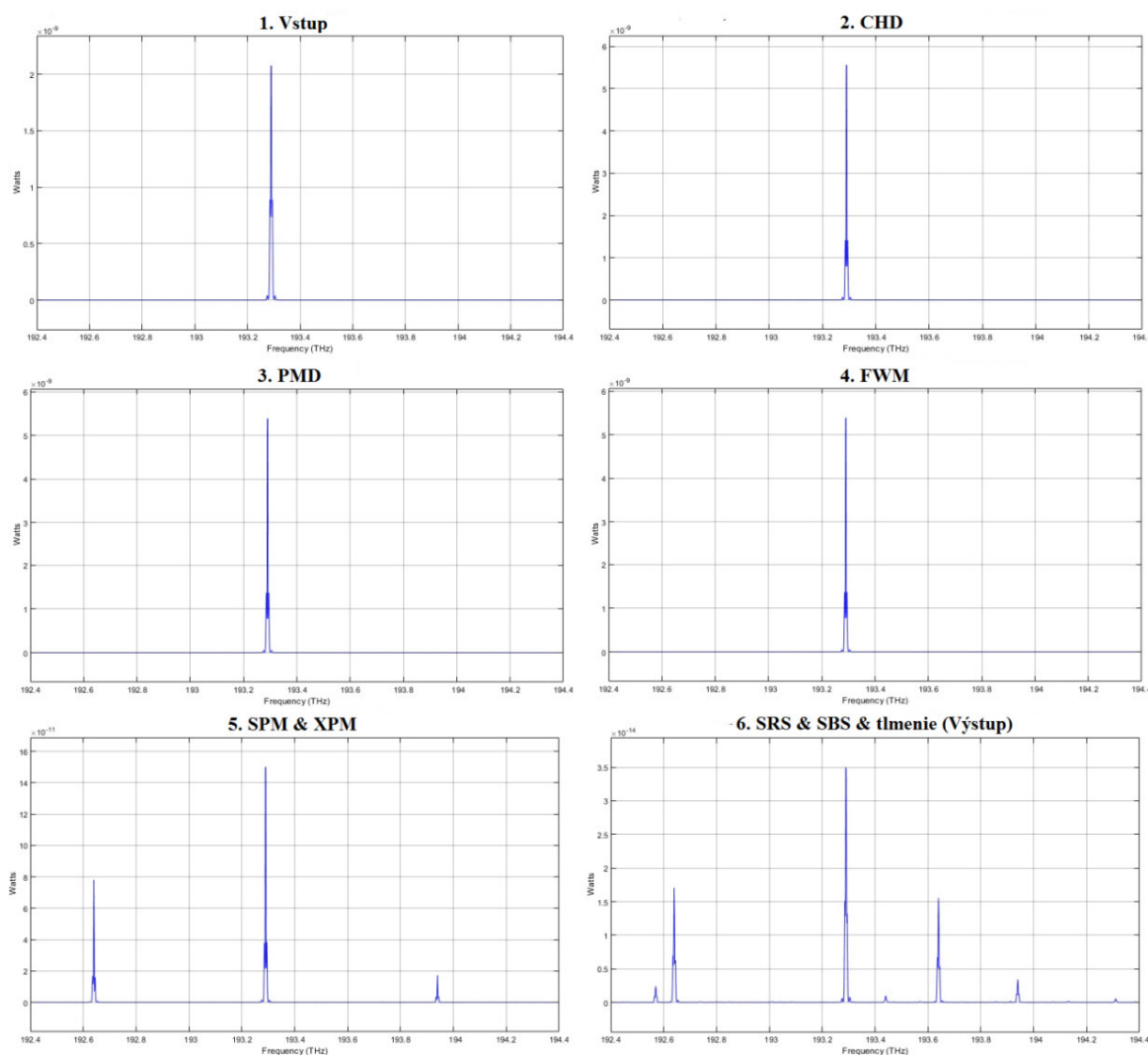
Ďalej simulačný program umožňuje pozorovanie vplyvu prenosovej cesty na prenášaný signál CWDM. Na nasledujúcom obr. 9 je zobrazené spektrum CWDM pre všetky 4 simulované kanály. Obrázok je rozdelený na dve časti, „Vstup“ predstavuje spektrum signálu CWDM vstupujúceho do modelu optickej prenosovej cesty (t.j. do bloku SMF) a „Výstup“ predstavuje spektrum signálu CWDM vystupujúceho z modelu optickej prenosovej cesty.



Obr. 9. Frekvenčné spektrum 4 kanálov CWDM

Simulačný program umožňuje pozorovanie vplyvu prenosovej cesty na spektrum po jednotlivých efektoch obsiahnutých v modeli prenosovej cesty. Na nasledujúcom obr. 10 je zobrazené spektrum pre 2. kanál CWDM ($\lambda_2 = 1551$ nm), na ktorom je vidieť vplyv vlastností optického vlákna, ktoré znehodnocujú prenos signálu [13 - 16], [19]. Zobrazené efekty zahŕňajú:

- chromatickú disperziu CD,
- polarizačnú módovú disperziu PMD,
- štvorvlnové zmiešavanie FWM,
- vlastnú fázovú moduláciu SPM a krížovú fázovú moduláciu XPM,
- stimulovaný Ramanov SRS a Brillouinov SBS rozptyl a tlmenie.



Obr. 10. Frekvenčné spektrum 2. kanála CWDM ($\lambda_2 = 1551$ nm)

Na výpočet bitovej chybovosti zvoleného 2.kanálu CWDM boli použité namerané hodnoty dvoch párov prenesených symbolov ($2x \log. 0 + 2x \log. 1$) a vzorce 1 a 2

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1)$$

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (2)$$

Hodnoty boli merané s krokom 0,01 ns, t.j. 10 vzoriek na symbol. Smerodajná odchylka σ_0 a σ_1 bola vypočítaná pomocou excel funkcie STDEV.

Vypočítané hodnoty 2. kanálu CWDM:

$$\sigma_0 = 3,0991 \cdot 10^{-9}$$

$$\sigma_1 = 3,0981 \cdot 10^{-7}$$

$$I_0 = 1,8010 \cdot 10^{-8}$$

$$I_1 = 2,7420 \cdot 10^{-6}$$

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = 8,7053$$

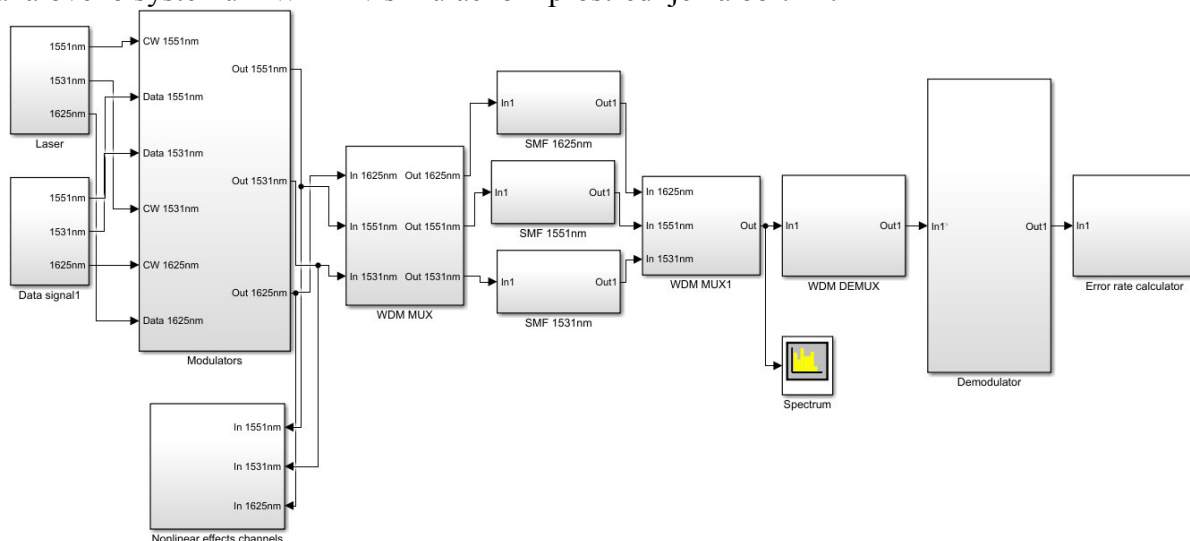
$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-Q^2}{2}} \approx 1,6037 \cdot 10^{-18}$$

4.3 Analýza, simulácia a výsledky systému DWDM

Pre simuláciu systému DWDM boli zvolené nasledujúce parametre pre prenášané parametre podľa ITU-T G.694.1[12]:

1. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1530.3341$ nm $\Rightarrow f=195.90$ THz
2. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1530.7248$ nm $\Rightarrow f=195.85$ THz
3. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1531.1157$ nm $\Rightarrow f=195.80$ THz
4. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1531.5068$ nm $\Rightarrow f=195.75$ THz
5. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1531.8981$ nm $\Rightarrow f=195.70$ THz
6. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1551.7208$ nm $\Rightarrow f=193.20$ THz
7. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1552.1225$ nm $\Rightarrow f=193.15$ THz
8. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1552.5244$ nm $\Rightarrow f=193.10$ THz
9. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1552.9265$ nm $\Rightarrow f=193.05$ THz
10. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1552.9265$ nm $\Rightarrow f=193.00$ THz
11. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1622.6926$ nm $\Rightarrow f=184.75$ THz
12. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1623.1319$ nm $\Rightarrow f=184.70$ THz
13. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1623.5714$ nm $\Rightarrow f=184.65$ THz
14. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1624.0111$ nm $\Rightarrow f=184.60$ THz
15. kanál: vlnová dĺžka $\lambda=1624.4511$ nm $\Rightarrow f=184.55$ THz

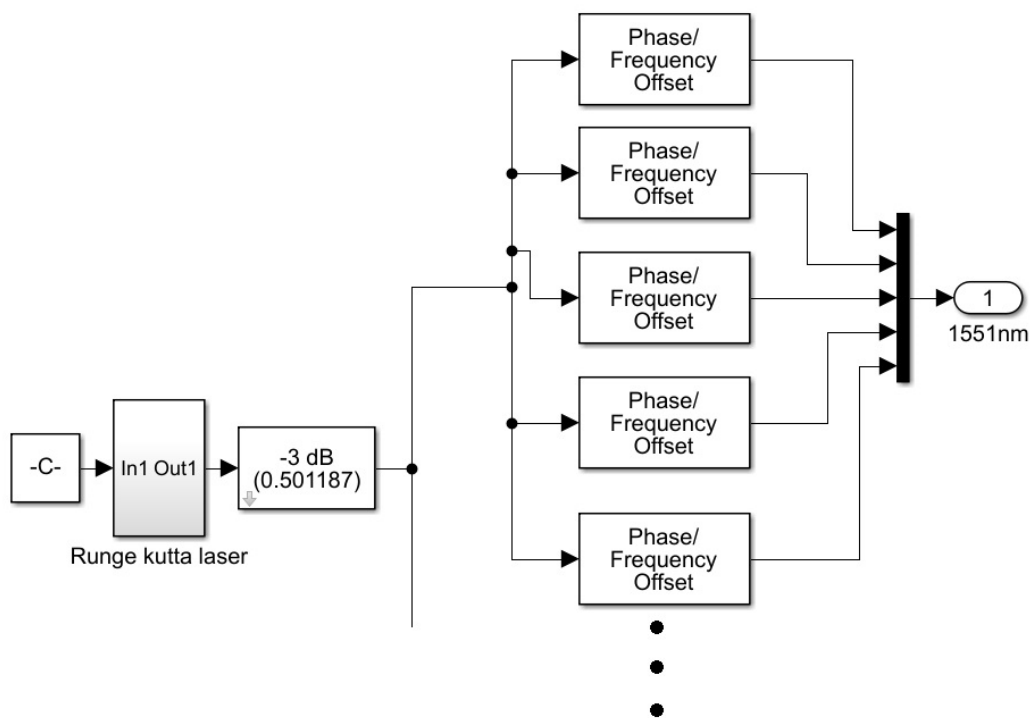
Vlnové dĺžky prenášaných kanálov boli zvolené s ohľadom na zložitosť zapojenia v simulačnom programe tak, aby boli v simulácii zahrnuté signály v pásmach, ktoré sa najčastejšie používajú na prenos signálov DWDM. Pri simulácii bola pre všetky kanály použitá rovnaká modulačná technika OOK pri rovnakej prenosovej rýchlosti každého z kanálov 10 Gbit/s. Zapojenie 15-kanálového systému DWDM v simulačnom prostredí je na obr. 11.



Obr. 11. Zapojenie 15-kanálového systému DWDM

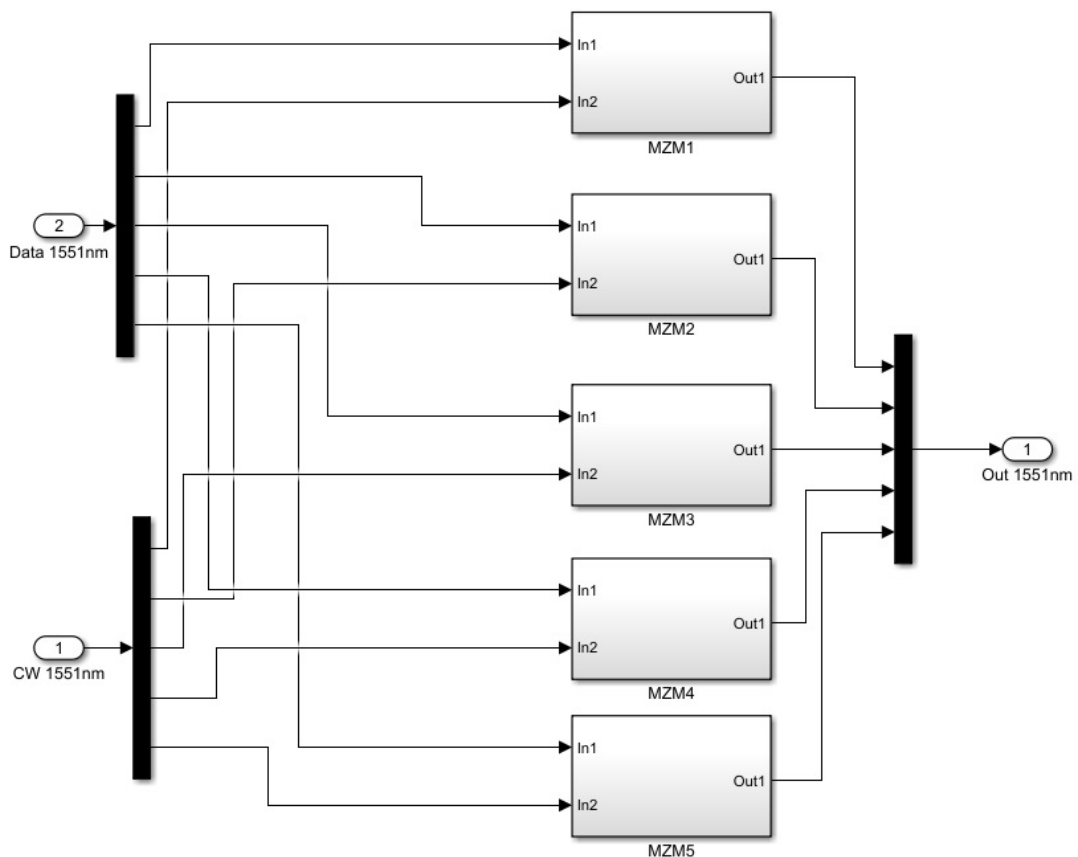
Zapojenie prenosovej cesty v systéme DWDM je založené na totožnom princípe ako bolo popísané pri simulácii systému CWDM s tým rozdielom, že prenášané kanály sú najprv kvôli zjednodušeniu multiplexované do troch skupín (1625 nm, 1551 nm a 1531 nm) s tým, že sa rozdiely v parametroch pre prenášané vlnové dĺžky zanedbávajú. Potom sú prenášané cez modely prenosových ciest (1625 nm, 1551 nm a 1531 nm) a na koniec sú opäť multiplexované do jedného združeného signálu.

Uvedený systém DWDM prenáša viac kanálov ako v práci prezentovaný systém CWDM, preto je zapojenie simulačného modelu mierne odlišné od zapojenia CWDM systému. Na nasledujúcom obrázku je znázornená časť vnútorného zapojenia zdroja optického žiarenia.



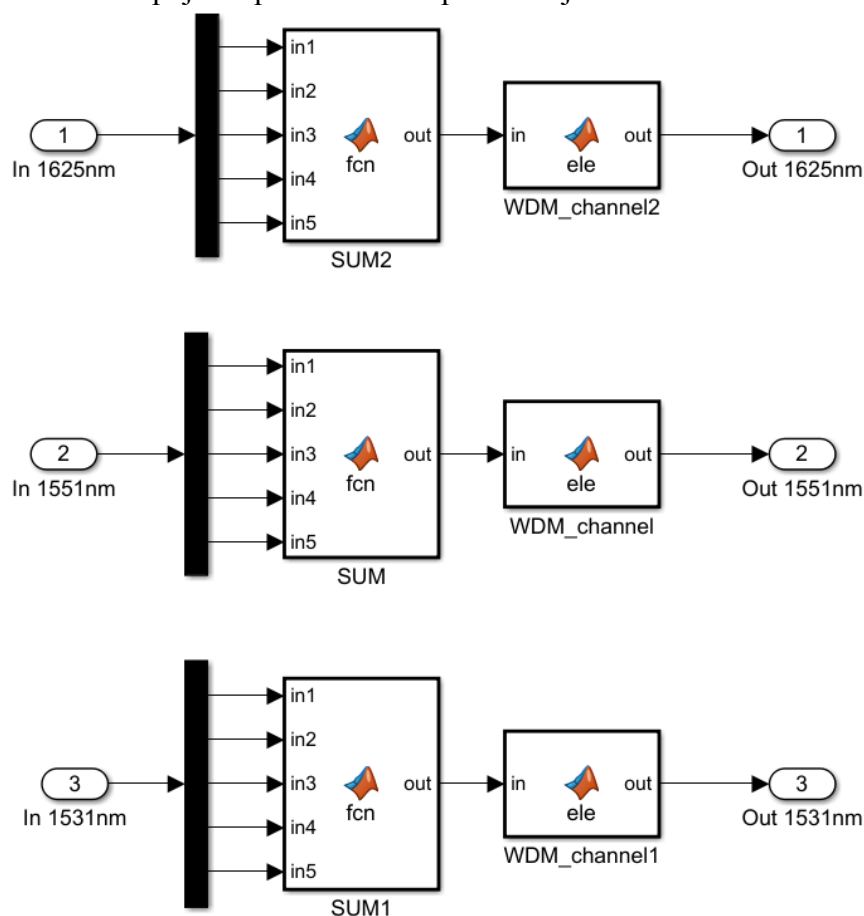
Obr. 12. Časť vnútorného zapojenia zdroja opt. žiarenia pre DWDM systém

Aby sa uskutočnil prenos informácií cez optické prenosové médium, je potrebné ho namodulovať, vnútorné zapojenie modulátorov pre vlnové dĺžky okolo 1551 nm je na obr.13. V simulačnom programe je každý prenášaný kanál modulovaný jednotlivo MZM OOK modulátorom.



Obr. 13. Zapojenie modulátorov v systéme DWDM

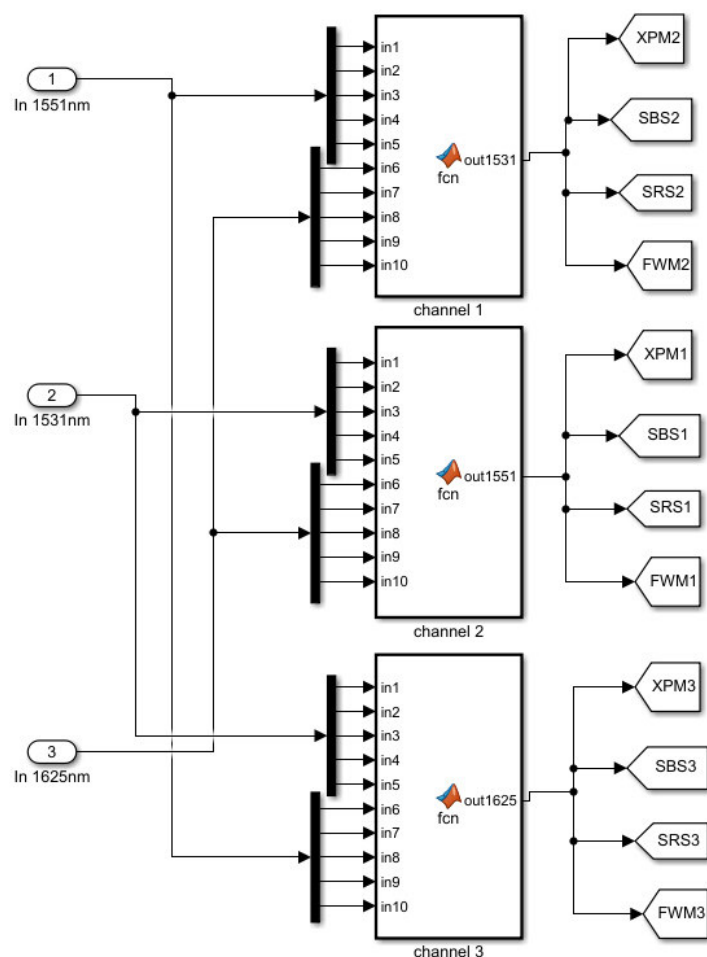
Ako už bolo spomínané v úvode tejto kapitoly, v zapojení systému DWDM sú použité dva multiplexory. Vnútorne zapojenie prvého z multiplexorov je na obr.14.



Obr. 14. Skupinový multiplexor

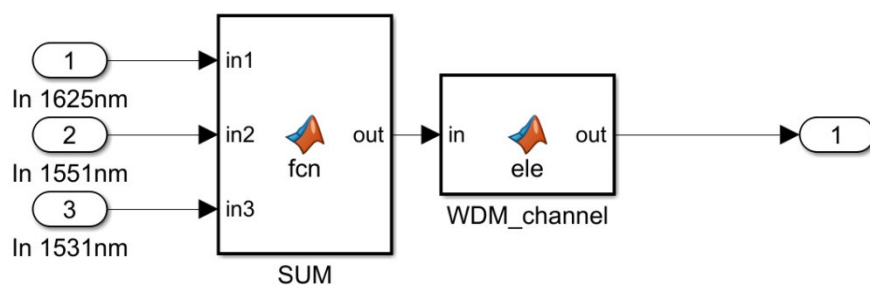
Signály z jednotlivých kanálov sú multiplexované pomocou prvého multiplexoru do skupín, ktoré sú prenášané cez modely optických prenosových ciest (každej zo skupín zodpovedajú iné parametre optickej prenosovej cesty, keďže sú závislé od vlnovej dĺžky).

Aby sa navzájom ovplyvňovali prenášané signály jednotlivých skupín signálov, je potrebné použiť pomocný blok, ktorý pripravuje signály pre modely prenosových ciest. Vnútorne zapojenie tohto pomocného bloku je na obr. 15.



Obr. 15. Vnútorné zapojenie pomocného bloku pre 15-kanálový systém DWDM

Po prvom multiplexovaní a prechode cez prenosové cesty združené signály vstupujú do druhého multiplexora, ktorý združuje signály do jedného spoločného signálu. Vnútorné zapojenie druhého multiplexora je zobrazené na obr.16.



Obr. 16. Pásmový multiplexor

4.3.1 Výsledky simulácie 15-kanálového DWDM systému

Nastavenie parametrov modelov prenosových ciest vychádza z nastavení pre CWDM systém opísaných v kapitole 4.2 s tým rozdielom, že sa v simulácii používajú 3 modely prenosových ciest pre vlnové dĺžky 1625 nm, 1551 nm a 1531 nm. Čiže:

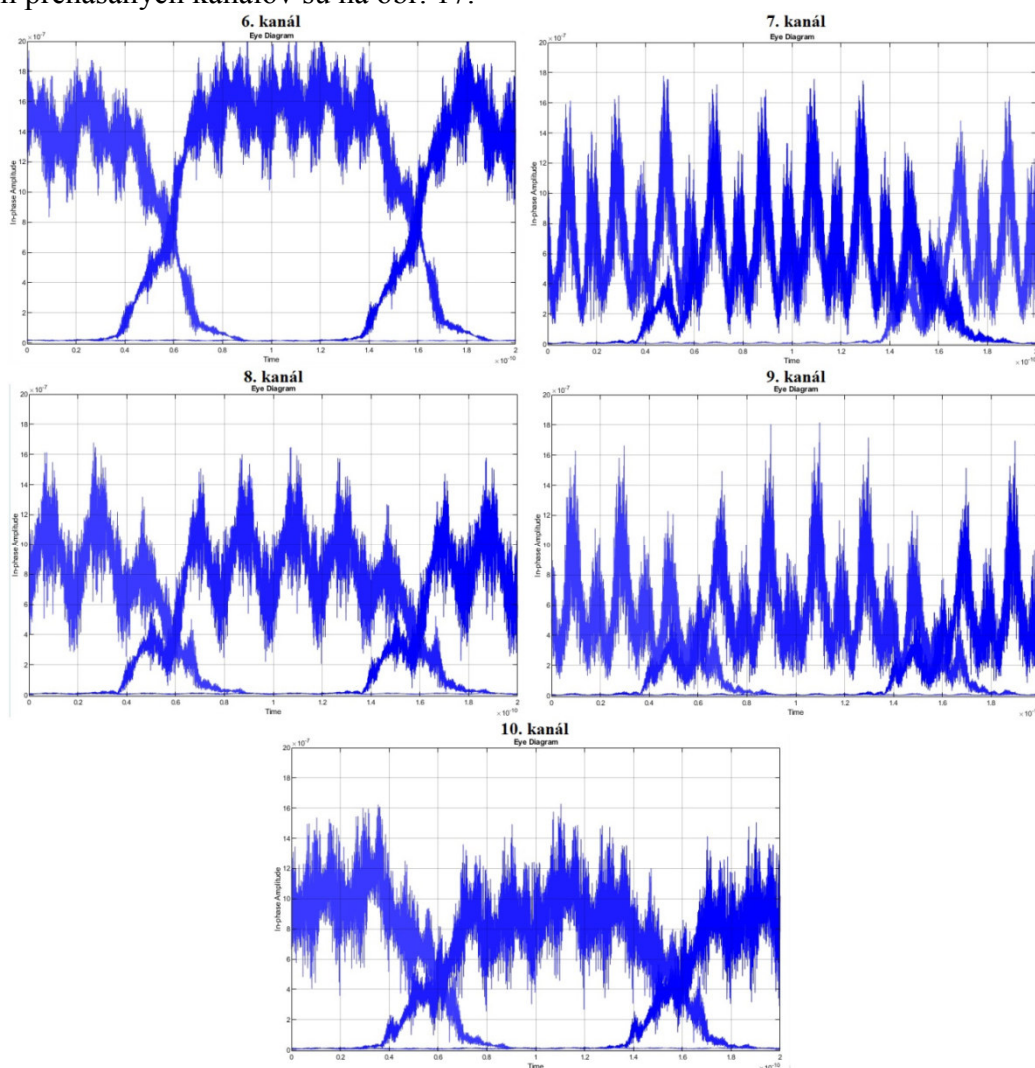
- dĺžka vlákna $L = 80$ km,
- prenosová rýchlosť 10 Gbit/s na kanál,
- použitá modulačná technika OOK.

Tlmenie v závislosti od vlnovej dĺžky pre simuláciu DWDM systému je v tabuľke 2.

Tab 2 – Hodnoty parametra alfa v závislosti od vlnovej dĺžky a celkové tlmenie pre zvolenú dĺžku

λ [nm]	α_{spec} [dB/km]	α_{celk} [dB]
1531	0,2	16
1551	0,21	16,8
1625	0,24	19,2

Simulačný program obsahuje diagram oka, vďaka ktorému je možné pozorovať vzdialenosť medzi logickými úrovňami prenášaného signálu (t.j. log.0 a log.1). Diagramy oka pre skupinu 1551 nm prenášaných kanálov sú na obr. 17.



Obr. 17. Diagramy oka pre skupinu DWDM signálov 1551 nm

Na výpočet bitovej chybovosti zvolených kanálov DWDM bol použitý rovnaký postup ako pri výpočte bitovej chybovosti 2. kanála CWDM signálu opísaného v kapitole 4.2.2. V tabuľke 3 sú uvedené vypočítané hodnoty Q faktoru a bitovej chybovosti pre kanály zo skupiny 1551 nm DWDM.

Tab 3 – Hodnoty Q-faktora a bitovej chybovosti skupiny 1551 nm DWDM signálov

Kanál	Q faktor	BER
6	7,5826	1,7226E-14
7	5,0391	2,4251E-07
8	4,8979	5,0299E-07
9	5,1126	1,6452E-07
10	6,0836	6,0254E-10

Keďže v množstve prenosových systémov sa považuje bitová chybovosť 1.10^{-9} za maximálnu prípustnú hodnotu [31], javia sa kanály 7, 8 a 9 ako nedostatočné na použitie v prenosovom systéme. Preto boli v ďalšej časti simulácií a meraní hodnôt potrebných pre výpočet Q faktora a bitovej chybovosti boli vypínané jednotlivo prenosové kanály 8, 7 a 9.

Podľa vypočítaných hodnôt bitovej chybovosti bol najprv vylúčený z prenosu kanál kde bola vypočítaná najvyššia bitová chybovosť - 8. kanál DWDM signálu.

Tab 4 – Hodnoty Q-faktora a bitovej chybovosti skupiny 1551 nm DWDM signálov po vypnutí 8 kanálu

Kanál	Q faktor	BER
6	5,0026	2,9328E-07
7	7,6401	1,1037E-14
9	6,2444	2,1786E-10
10	3,0448	1,2714E-03

Podľa vypočítaných hodnôt bitovej chybovosti sa javia kanály 6 a 10 ako nedostatočné na použitie v prenosovom systéme ak predpokladáme maximálnu prípustnú bitovú chybovosť 1.10^{-9} [31].

Ďalšie meranie a výpočet Q faktorov prebehlo s vypnutým 9. kanálom DWDM signálu.

Tab 5 – Hodnoty Q-faktora a bitovej chybovosti skupiny 1551 nm DWDM signálov po vypnutí 9 kanálu

Kanál	Q faktor	BER
6	6,3807	9,0227E-11
7	4,2910	9,3352E-06
8	5,3145	5,5258E-08
10	6,5190	3,6177E-11

Podľa vypočítaných hodnôt bitovej chybovosti sa javia kanály 7 a 8 ako nedostatočné na použitie v prenosovom systéme ak predpokladáme maximálnu prípustnú bitovú chybovosť 1.10^{-9} [31].

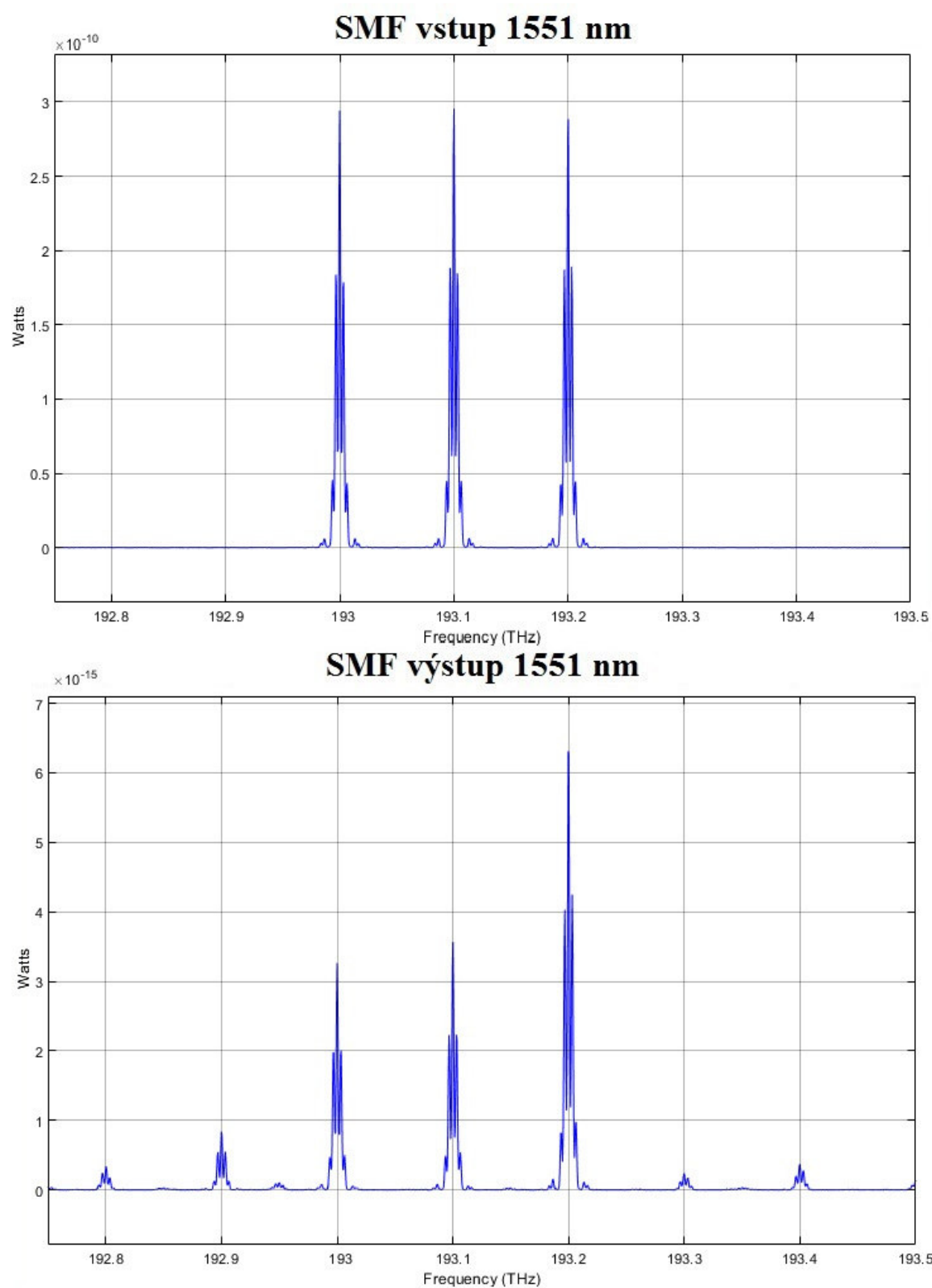
Nasledujúce meranie a výpočet Q faktorov prebehlo s vypnutým 7. kanálom DWDM signálu.

Tab 6 – Hodnoty Q-faktora a bitovej chybovosti skupiny 1551 nm DWDM signálov po vypnutí 7. kanálu

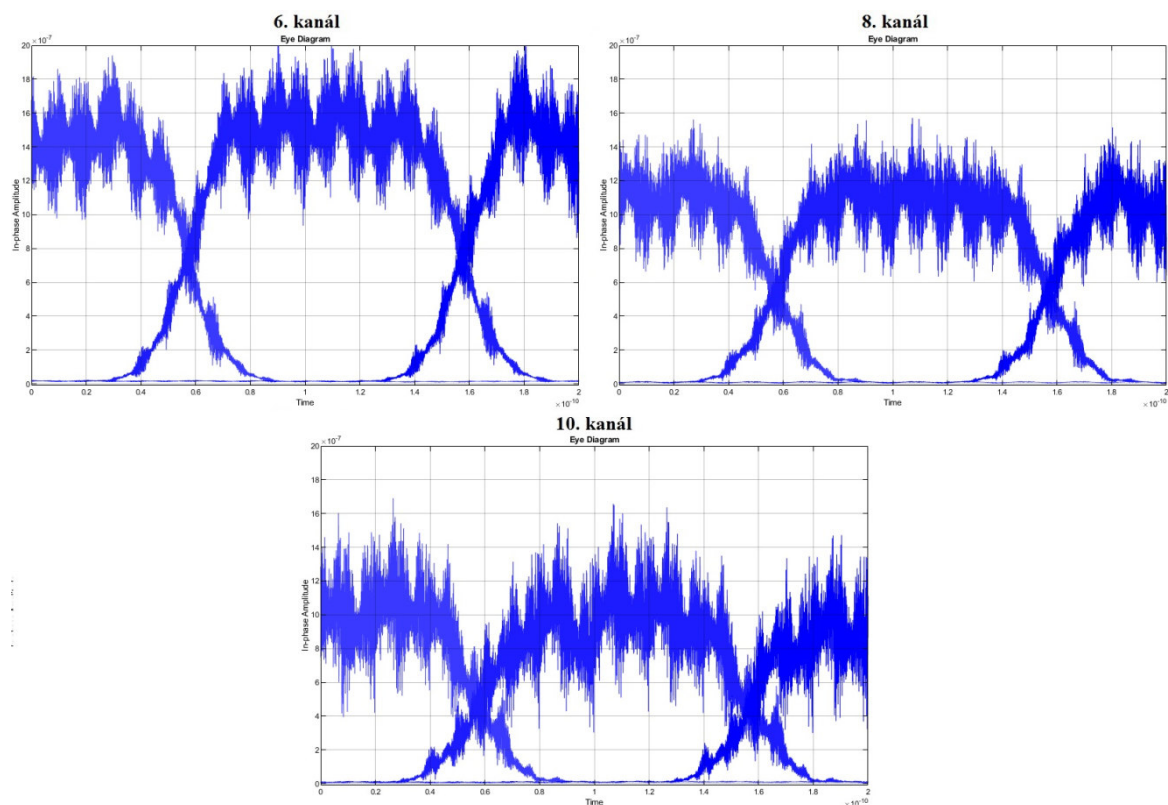
Kanál	Q faktor	BER
6	6,6607	1,3919E-11
8	7,0692	7,9393E-13
9	3,2279	6,7514E-04
10	5,2265	8,9339E-08

Podľa vypočítaných hodnôt bitovej chybovosti sa javia kanály 9 a 10 ako nedostatočné na použitie v prenosovom systéme ak predpokladáme maximálnu prípustnú bitovú chybovosť $1 \cdot 10^{-9}$ [31].

Posledné meranie a výpočet Q faktorov prebehlo s vypnutým 7. a 9. kanálom DWDM signálu. Spektrum skupiny signálov 1551 nm po vypnutí 7. a 9. kanálu je na obr. 18 a diagramy oka sú zobrazené na obr. 19.



Obr. 18. Spektrum skupiny 1551 nm DWDM s vypnutým 7. a 9. kanálem



Obr. 19. Diagramy oka 1551 nm DWDM s vypnutým 7. a 9. kanálom

Tab 7 – Hodnoty Q-faktora a bitovej chybovosti skupiny 1551 nm DWDM signálov po vypnutí 7. a 9. kanálu

Kanál	Q faktor	BER
6	8,0441	4,4082E-16
8	7,6182	1,3079E-14
10	7,5163	2,8665E-14

Porovnanie všetkých vypočítaných výsledkov je uvedené v tab. 7, hodnoty pre kanály, ktoré sú vhodné na použitie v prenosovom systéme sú zvýraznené žltou farbou.

Tab 7 – Porovnanie simulácií skupiny 1551 nm DWDM signálov

Kan.	6		7		8		9		10	
Vyp.	Q faktor	BER	Q faktor	BER	Q faktor	BER	Q faktor	BER	Q faktor	BER
-	7,5826	1,7226E-14	5,0391	2,4251E-07	4,8979	5,0299E-07	5,1126	1,6452E-07	6,0836	6,0254E-10
7	6,6607	1,3919E-11	-	-	7,0692	7,9393E-13	3,2279	6,7514E-04	5,2265	8,9339E-08
8	5,0026	2,9328E-07	7,6401	1,1037E-14	-	-	6,2444	2,1786E-10	3,0448	1,2714E-03
9	6,3807	9,0227E-11	4,2910	9,3352E-06	5,3145	5,5258E-08	-	-	6,5190	3,6177E-11
7,9	8,0441	4,4082E-16	-	-	7,6182	1,3079E-14	-	-	7,5163	2,8665E-14

Z hodnôt uvedených v tab. 7 vyplýva, že na prenos DWDM signálov v zvolenej skupine 1551 nm je najvhodnejšie použiť na prenos DWDM signálov kanály 6, 8 a 10 a vylúčiť kanály 7 a 9, (t.j. zvýšiť kanálový odstup z 50 GHz na 100 GHz). Pri použití všetkých piatich prenosových kanálov zo skupiny resp. pri vypnutí jedného z kanálov zo skupiny majú postačujúcu bitovú chybovosť vždy len 2 prenosové kanály. Ak budú z prenosu vylúčené kanály 7 a 9 bude možné prenášať súčasne 3 prenosové kanály s postačujúcou bitovou chybovosťou.

4.4 Záver

V teoretickej časti sa dizertačná práca zaoberá stručným popisom najčastejšie používaných multiplexných techník v optických prenosových systémoch. Ďalej sa dizertačná práca zaoberá detailným popisom multiplexovania s vlnovodízkovým delením WDM v optickom prenosovom systéme so zameraním na multiplexovanie s riedkym vlnovodízkovým delením CWDM a multiplexovanie s hustým vlnovodízkovým delením DWDM.

V praktickej časti sa dizertačná práca zaoberá simuláciami systémov WDM v simulačnom prostredí Matlab Simulink. Simulačný program popísaný v práci predstavuje užitočný nástroj, ktorý umožňuje výber vhodných vlnových dĺžok použitých v optických prenosových systémoch s multiplexovaním s vlnovodízkovým delením.

Praktická časť dizertačnej práce pozostáva z 3 hlavných častí – podrobného popisu funkčných blokov simulačného programu ktoré sú spoločné pre CWDM a pre DWDM, simulácie a výsledkov realizovaného 4 kanálového CWDM systému a simulácie a výsledkov realizovaného 15 kanálového DWDM systému.

V kapitole dizertačnej práce 6.2 výsledky simulácie 4-kanálového CWDM systému bola prezentovaná simulácia 4-kanálového CWDM systému, frekvenčné spektrum 4-kanálového CWDM signálu a výpočet hodnoty Q-faktora a bitovej chybovosti pre druhý prenášaný CWDM kanál. Vzhľadom na pomerne veľký kanálový odstup 20 nm (v porovnaní s DWDM) medzi CWDM kanálmi je predpoklad, že všetky vlnové dĺžky použité v CWDM systéme sú vhodné na prenos v postačujúcej kvalite a nepredpokladá sa potreba výberu vhodných vlnových dĺžok resp. vypínanie kanálov CWDM systému čo potvrdzuje aj frekvenčné spektrum SMF výstup v dizertačnej práci na obr. 34.

V kapitole dizertačnej práce 7.1 výsledky simulácie 15-kanálového DWDM systému bola pomocou simulácií, vypočítaných hodnôt Q-faktora a bitovej chybovosti určená najvhodnejšia kombinácia prenášaných kanálov v skupine 1551 nm. Podľa nameraných výsledkov je zo skupiny 1551 nm prenášaných DWDM kanálov použitých v simulácií možné pri daných parametroch optického vlákna súčasne prenášať v postačujúcej kvalite maximálne 3 z 5 kanálov, preto je potrebné vybrať na prenos len vhodné vlnové dĺžky DWDM signálu. Podľa simulácií a vypočítaných výsledkov teda vyplýva, že je pri parametroch optického vlákna použitých v simulácií najvhodnejšie použiť minimálny kanálový odstup 100GHz. Medzi iné možnosti ako znížiť bitovú chybovosť pri dodržaní kanálového odstupu 50GHz patria zníženie bitovej rýchlosti (v popísaných simuláciách bola použitá bitová rýchlosť 10 Gbit/s na kanál) a/alebo skrátenie prenosovej trasy (v popísaných simuláciách bola použitá dĺžka optického vlákna 80 km).

Ako možné rozšírenia resp. zmeny simulačného programu do budúcnosti navrhujem preprogramovať blok prenosovej cesty ako frekvenčne závislú prenosovú funkciu, tak aby nemuselo byť použitých viac blokov prenosových ciest pri viacerých prenášaných vlnových dĺžkach. Táto zmena by mohla priniesť menšiu záťaž na výpočtové zdroje a tým urýchliť beh simulácií keďže by sa v simulácií používal len jeden blok prenosovej cesty. Navrhovaná zmena prenosovej cesty by tiež priniesla presnejšie výsledky simulácií, najmä pri simulácií DWDM systémov, keďže v tejto práci boli prenášané kanály spájané do 3 skupín (1531nm, 1551nm a 1625nm) a rozdiely vo vlastnostiach optického vlákna boli medzi jednotlivými kanálmi v skupine zanedbané. Ďalšia zmena simulačného programu ktorú navrhujem je úprava WDM filtrov v demodulátore. Aby sa výsledky simulácií viac priblížili k reálnym hodnotám bolo by vhodné naprogramovať v simulačnom programe v bloku demodulátorov reálne optické filtre napr. Braggove mriežky.

5. Pôvodné vedecké prínosy

Cieľom dizertačnej práce bolo rozšírenie simulačného modelu pre optické prenosové médium a implementácia ďalších používaných zariadení, optimalizácia simulačných metód, definovanie matematickej reprezentácie a návrh vhodnej formy multiplexnej techniky pre implementovanie v optických prenosových systémoch. V simulačnom programe som vytvoril 4-kanálový CWDM systém a 15-kanálový optický prenosový DWDM systém, ktorý slúži ako nástroj na určenie najvhodnejšej kombinácie prenášaných WDM kanálov na modeli optického vlákna.

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

1. Prezentácia matematickej analýzy potrebnej na určenie kvality prenosu (Q-faktor) a prezentácia vzťahu medzi Q-faktorom a bitovou chybovosťou
2. Vytvorenie 4-kanálového CWDM multiplexora a demultiplexora a rozšírenie základného simulačného modelu pre optické prenosové médium na 4-kanálový CWDM systém
3. Vytvorenie 15-kanálového DWDM multiplexora a demultiplexora a rozšírenie základného simulačného modelu pre optické prenosové médium na 15-kanálový DWDM systém
4. Prepojenie modelov prenosových ciest umožňujúce simuláciu prenosu viacerých vlnových dĺžok súčasne
5. Zvýšenie rýchlosti behu simulácie
6. Analýza a výber vhodných vlnových dĺžok DWDM signálu na prenos informácií zo zvolenej skupiny DWDM signálov

Resumé

The aim of dissertation was to extend the simulation model for optical transmission media with additional devices used in optical transmission systems, optimization of simulation methods, definition of mathematical representation and design of suitable method of multiplexing technique for implementation in optical transmission systems. I created a 4-channel CWDM optical transmission system and a 15-channel DWDM optical transmission system in the simulation program, which is designed to select the most suitable combinations of transmitted WDM channels in the optical fibre model.

The initial benefits of the dissertation based on the studied literature and the results obtained are listed as follows:

1. Presentation of the mathematical analysis needed to determine the quality of transmission (Q-factor) and presentation of the relationship between Q-factor and bit error rate
2. Creation of a 4-channel CWDM multiplexer and demultiplexer and extension of the basic simulation model for optical transmission to a 4-channel CWDM system
3. Creation of a 15-channel DWDM multiplexer and demultiplexer and extension of the basic simulation model for optical transmission to a 15-channel DWDM system
4. Interconnection of transmission path models enabling simulation of transmission of several wavelengths simultaneously
5. Improvement of simulation performance
6. Analysis and selection of suitable DWDM signal wavelengths for the transmission of information from a selected group of DWDM signals

Zoznam použitej literatúry

- [1] Vikrant Sharma, Dr. Dalveer Kaur: REVIEW ON MULTIPLEXING TECHNIQUES IN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS, European Scientific Journal /SPECIAL/ edition Vol.2, ISSN: 1857 – 7881, 2015.
- [2] Ghafour Amouzad Mahdiraji, Ahmad Fauzi Abas: Advanced Modulation Formats and Multiplexing Techniques for Optical Telecommunication Systems, Trends in Telecommunications Technologies, ISBN: 978-953-307-072-8, 2010.
- [3] X. Steve Yao, L.-S. Yan, B. Zhang, A. E. Willner, Junfeng Jiang: All-optic scheme for automatic polarization division demultiplexing, OPTICS EXPRESS, Vol. 15, No. 12, 2007.
- [4] RongqingHui, Benyuan Zhu, Renxiang Huang, Christopher T. Allen, Kenneth R. Demarest, Douglas Richards: Subcarrier Multiplexing for High-Speed Optical Transmission, IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 20, NO. 3, 2002.
- [5] Yuanyuan Zhang, Maurice O'Sullivan, RongqingHui: Digital subcarrier multiplexing for flexible spectral allocation in optical transport network, OPTICS EXPRESS, Vol. 19, No. 22, 2011.
- [6] W. Shieh, H. Bao, Y. Tang: Coherent optical OFDM: theory and design, OPTICS EXPRESS, Vol. 16, No. 2, 2008.
- [7] HongchunBao, William Shieh: Transmission simulation of coherent optical OFDM signals in WDM systems, OPTICS EXPRESS, Vol. 15, No. 8, 2007.
- [8] SafuraaMohdBasir, GhafourAmouzadMahdiraji, Amin Malekmohammadi, Noor HisyamIbrahim, Ahmad FauziAbas, Mohamad Khazani Abdullah: Proof-of-Concept Experiment of Duty Cycle Division Multiplexing with Bit Error Rate Analysis, The Open Electrical & Electronic Engineering Journal, 2012, Volume 6.
- [9] M. N. DERAHMAN, A. MALEKMOHAMMADI, G. GNANAGURUNATHAN, M. K. ABDULLAH, K. DIMYATI, K. A. NOORDIN: Performance Improvement of Duty-Cycle Division Multiplexing System Utilizing Symbol Coding Customization, WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS, Volume 14, ISSN: 1109-2742, 2015.
- [10] AvizitBasak, Md. ZargisTalukder& Md. Rakibul Islam: Performance Analysis and Comparison between Coarse WDM and Dense WDM, Global Journal of Researches in Engineering Electrical and Electronics Engineering, Vol. 13 Issue 6, ISSN: 0975-5861, 2013.
- [11] ITU-T Recommendation G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid, 2003.
- [12] ITU-T Recommendation G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, 2003.
- [13] RÓKA, R. - ČERTÍK, F.: Modeling of Environmental Influences at the signal transmission in the optical transmission medium, International Journal of Communication Networks and Information Security, vol. 4, No. 3, S146- 162, 2012. ISSN 2073-607X.
- [14] RÓKA, R.: Fixed Transmission Media. In: Technology and Engineering Applications of Simulink, InTech, Rijeka (Croatia), May 2012, ISBN 978-953-51-0635-7.
- [15] RÓKA, R. - ČERTÍK, F.: Simulation Tools for Broadband Passive Optical Networks. In Simulation Technologies in Networking and Communications : Selecting the Best Tool for the Test. 1. ed. New York : CRC Press, Taylor and Francis Group, 2015, S. 337-364. ISBN 978-1-4822-2549-5.
- [16] RÓKA, R. - ČERTÍK, F.: Simulation and analysis of the signal transmission in the optical transmission medium. In Simultech 2015, Colmar, France. 21-23 July, 2015. Setúbal :Scitepress, 2015, CD-ROM, S. 219-226. ISBN 978-989-758-120-5.

- [17] RÓKA, R -ČERTÍK, F. - MOKRÁŇ, M.: Analysis of possible utilization of phase shift keying modulations for long-haul optical transmission systems. APCOM 2015, ISBN 978-80-227-4373-0.
- [18] RÓKA, R -MOKRÁŇ, M.: Modeling of the PSK Utilization at the Signal Transmission in the Optical Transmission Medium. International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), Vol. 7, No. 3, December 2015. ISSN: 2076-0930.
- [19] RÓKA, R. - MOKRÁŇ, M. - ŠALÍK, P.: Simulation of Negative Influences on the CWDM Signal Transmission in the Optical Transmission Media, In: International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing – IJCSP, Vol.11, 2017, pp. 75-80, Online ISSN 1998-4464.
- [20] RÓKA, R. – ŠALÍK, P.: Analysis and simulation of dynamic properties for the DFB laser, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 7/2018.
- [21] G. Deshmukh, S. Jagtap, “Four Wave Mixing in DWDM Optical System”, International Journal of Computational Engineering Research, vol. 3, issue 6, 2013.
- [22] R. Kibria, M. W. Austin, “All Optical Signal-Processing Techniques Utilizing Four Wave Mixing”, Photonics 2, pp. 200-213, 2015, doi:10.3390/photonics2010200.
- [23] MOKRÁŇ M.: MODULAČNÉ TECHNIKY V OPTICKOM PRENOSOVOM MÉDIU, Bakalárska práca, FEI STU, 2013, Evidenčné číslo: FEI-5408-64645.
- [24] Vanya A.: Detekcia a spracovanie optických signálov v optickom prenosovom médiu, Bakalárska práca, FEI STU, 2019, Evidenčné číslo: FEI-5408-86905.
- [25] Tomáš. G. M.: Detekcia a spracovanie optických signálov v optickom prenosovom médiu, Bakalárska práca, FEI STU, 2018, Evidenčné číslo: FEI-5408-80117.
- [26] Filipová L.: Optické zosilňovače v optickom prenosovom médiu, Diplomová práca, FEI STU, 2019, Evidenčné číslo: FEI-183415-74927.
- [27] Švončinár A.: Optické zosilňovače v optickom prenosovom médiu, Diplomová práca, FEI STU, 2018, Evidenčné číslo: FEI-5410-73042.
- [28] TEJKAL V., FILKA M., REICHERT P., ŠPORIK J.: DVOUSTAVOVÉ MODULAČNÍ FORMÁTY V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH, ADVANCES IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, 2010, VOL.: 8, N.R.: 4
- [29] Knipp D., Chakma T.: Optical Signal to Noise Ratio (OSNR), International University Bremen, Spring, 2005.
- [30] Dokumentácia programu Matlab Simulink: Discrete-Time Derivative of Floating-Point Input, ktorá je dostupná na internetovej stránke:
<https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/discrete-time-derivative-of-floating-point-input.html>
- [31] Walsh D., Moodie D., Mauchline I., Conner S., Johnstone W., Culshaw B. : Practical Bit Error Rate Measurements on Fibre Optic Communications Links in Student Teaching Laboratories dostupné na internetovej stránke: https://spie.org/etop/ETOP2005_021.pdf

Zoznam publikácií autora

Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

- ADM01 RÓKA, Rastislav - MOKRÁŇ, Martin. Modeling of the PSK utilization at the signal transmission in the optical transmission medium. In *International Journal of Communication Networks and Information Security*. Vol. 7, No. 3 (2015), s. 187-196. ISSN 2073-607X (2015: 0.383 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS.
- ADM02 RÓKA, Rastislav - MOKRÁŇ, Martin - ŠALÍK, Pavol. Simulation of negative influences on the CWDM signal transmission in the optical transmission media. In *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. Vol. 11, (2017), s. 75-80. ISSN 19984464 (2017: 0.131 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85029037975.
- ADM03 RÓKA, Rastislav - MOKRÁŇ, Martin. Effect of the FWM influence on the CWDM signal transmission in the optical transmission media. In *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. Vol. 12, (2018), s. 42-47. ISSN 1998-4464 (2018: 0.149 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85041555608.
- ADM04 RÓKA, Rastislav - MOKRÁŇ, Martin. Simulation platform for analyzing environmental effects in multi-wavelength transmission systems in Matlab Simulink. In *Przegląd elektrotechniczny*. Vol. 95, Iss. 6 (2019), s. 9-14. ISSN 0033-2097 (2019: 0.213 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: WOS: 000469370900003.
- ADM05 MOKRÁŇ, M., RÓKA, R.: Wavelength Selection Analysis in optical DWDM systems, Journal: Applied Sciences (IF = 2.474) (<https://www.mdpi.com/journal/applsci/>), Special Issue Title: Novel Advances and Applications of Signal Processing Techniques for Optical Communications, v procese revízie

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 MOKRÁŇ, Martin - RÓKA, Rastislav. Fázové modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2013 (elektronický zdroj) : Zborník vybraných prác*. 1. vyd. Bratislava : FEI STU, 2013, s.CD ROM, s. 390-395. ISBN 978-80-227-3909-2.
- AFD02 MOKRÁŇ, Martin - RÓKA, Rastislav. Fázové kľúčovanie PSK pre optické prenosové médium. In *ŠVOČ 2014 (elektronický zdroj) : Zborník vybraných prác [elektronický zdroj]*. 1.vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, CD-ROM, s. 342-346. ISBN 978-80-227-5154-5.
- AFD03 MOKRÁŇ, Martin - ČERTÍK, Filip - RÓKA, Rastislav. Analysis of possible utilization of phase shift keying modulations for long-haul optical transmission systems. In *APCOM 2015 : Proceedings of 21st international conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 24-26, 2015*. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2015, S. 299-303. ISBN 978-80-227-4373-0.

Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

BDF01 MOKRÁŇ, Martin - RÓKA, Rastislav. Fázové klúčovanie v optickom prenosovom médiu. In *Posterus [elektronický zdroj]*. Roč. 6, č. 11 (2013), s.online [12] s. ISSN 1338-0087.

Riešené výskumné úlohy

1. VEGA 1/0462/17 - Modeling of qualitative parameters in IMS networks, zodpovedný riešiteľ prof. Ing. Ivan Baroňák, PhD.

2. KEGA 034STU-4/2021 - Utilization of Web-based Training and Learning Systems at the Development of New Educational Programs in the Area of Optical Wireless Technologies, zodpovedný riešiteľ doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.

