



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

Ing. Pavol Šalík

Autoreferát dizertačnej práce
Pokročilé techniky optického spracovania signálov v optickom prenosovom médiu

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

v doktorandskom študijnom programe: Telekomunikácie

v študijnom odbore: 5.2.12 Telekomunikácie

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Bratislava, 31.05 2018

Dizertačná práca bola vypracovaná na

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

Predkladateľ:

Ing. Pavol Šalík

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav multimediálnych komunikačných a informačných technológií
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav multimediálnych komunikačných a informačných technológií
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

doc. Ing. Dan Komosný, PhD.

Vysoké učení technické v Brne
Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
Ústav telekomunikácií
Technická 12, 616 00 Brno

Ing. Stanislav Dlháň, PhD.

Accenture s.r.o
Plynárenská 7/C, 821 09 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa24.8 2018..... **o**h.

naSTU FEI Ústave multimediálnych informačných a komunikačných technológií

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

Obsah

1.	ÚVOD.....	1
1.	SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	1
1.1	<i>EFEKTÍVNE VYUŽITIE PRENOSOVEJ ŠÍRKY PÁSMO.....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>VIACSTAVOVÉ MODULAČNÉ FORMÁTY</i>	<i>1</i>
2.	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	2
3.	METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA A VÝSLEDKY PRÁCE ...	3
3.1.1	Výsledky modelu lasera DFB	3
3.1.2	Výsledky modelu zosilňovača EDFA	6
3.2	<i>SIMULAČNÁ PLATFORMA OPTICKÉHO PRENOSOVÉHO MÉDIA</i>	<i>7</i>
3.2.1	Prenosový systém s kľúčovaním OOK NRZ.....	8
3.3	<i>PRENOSOVÝ SYSTÉM S KĽÚČOVANÍM BPSK.....</i>	<i>11</i>
3.4	<i>PRENOSOVÝ SYSTÉM S KĽÚČOVANÍM DPSK</i>	<i>12</i>
3.5	<i>PRENOSOVÝ SYSTÉM S KĽÚČOVANÍM QPSK</i>	<i>12</i>
3.6	<i>PRENOSOVÝ SYSTÉM S KĽÚČOVANÍM DQPSK.....</i>	<i>14</i>
4.	VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANIA	15
5.	NÁVRH KĽÚČOVANIA PM 16QAM A POSÚDENIE JEHO IMPLEMENTÁCIE DO REÁLNYCH OPTICKÝCH PRENOSOVÝCH SYSTÉMOV	16
6.	PÔVODNÉ VEDECKÉ PRÍNOSY.....	20

1. Úvod

V dôsledku zvyšujúcich sa nárokov na objem dát v digitálnych komunikáciách začali byť metalické prenosové médiá nedostačujúce na prenos signálov z hľadiska ich charakteristických vlastností, preto bola navrhnutá možnosť prenášať informácie pomocou svetelnej vlny cez sklenené vlákna. Prvé vlákno, cez ktoré sa dala prenášať informácia bolo zostrojené v roku 1966. Jeho prenosové vlastnosti neboli výrazne lepšie oproti zavedeným metalickým prenosovým médiám. Po odstránení a minimalizácii nežiadúcich vplyvov sa ukázalo, že prenos cez optické vlákna je omnoho výhodnejší ako prenos cez metalické linky po všetkých stránkach prenosu a koncom 70tych rokov začali telekomunikačné spoločnosti masívnu prestavbu svojich chrbticových sietí. Optické prenosové systémy sa najskôr používali iba na prenos cez diaľkové a chrbticové siete ale postupne sa začali optický prenos používať aj v prístupových sieťach. Napriek tomu, že optické vlákna zaznamenali veľký pokrok v technológii výroby vlákna, kompletná inovácia optických sietí novým vlnovodmi by nemohla byť realizovaná z dôvodu finančnej náročnosti, stavebných povolení, geografických polôh linky a ďalších faktorov. Z toho dôvodu sú používané už existujúce optické siete. Tie linky vykazujú pri nízkych rýchlostiach vykazujú len nízku degradáciu signálu, ktorá však rapídne narastá pri väčších prenosových rýchlostiach. Jedným z vhodných možností odstránenia nepriaznivých vplyvov prenosu cez existujúce siete je použitie modulácií. Rozličné typy modulačných techník sú schopné potlačiť vplyv šumu optického prenosového systému, znížiť nároky na optické prijímače a znížiť spektrum prenášaného signálu, alebo zvýšiť prenosovú rýchlosť pri zachovaní prenášaného spektra.

Vzhľadom na to, že testovanie takýchto prenosových systémov v priamej prevádzke by bolo finančne neefektívne vzniká potreba vytvoriť simulačnú platformu, ktorá by verne simulovala správanie optického prenosového systému. Jednotlivé zariadenia optického prenosového systému by mali byť modelované na základe nameraných parametrov z reálnych optických zariadení, aby bolo možné dosiahnuť presnú interpretáciu úpravy signálu a zachovanie šumových pomerov na výstupe týchto zariadení. Takto navrhnutá simulačná platforma umožňuje získať hranice hranične prenosové rýchlosti pre jednotlivé modulačné formáty, odhadnúť chybovosť prenosu, alebo otestovať dosah prenosu signálu a jednotlivé výsledky porovnať pred laboratórnymi testami, ktoré budú predchádzať nasadeniu do reálnej prevádzky.

1. Súčasný stav riešenej problematiky

Od prenosu 400 Mb/s signálu na vlnovej dĺžke 1300 nm cez 50 km dlhé jednomodové vlákno sa prudko zvýšil rozvoj výskumu v oblasti optických komunikácií. Pre zvýšenie dosahu optokomunikačných sietí sa prešlo na vlnovú dĺžku 1550 nm, kde sa podarilo znížiť koeficient tlmenia pod 0,2 dB/km. V dnešnej dobe sa vplyvom multimediálnych služieb neustále zvyšujú požiadavky na kapacitu prenosu a prenosové rýchlosti. [JIA12],[ROH14].

1.1 Efektívne využitie prenosovej šírky pásma

Zvýšenie efektivity využitia prenosovej šírky pásma spočíva v použití multiplexnej techniky, ktorá umožní viacnásobne využiť prenosové médium.

Všetky diaľkové systémy používajú technológiu DWDM s kanálovými rozstupmi 50GHz. Táto optická mriežka bola štandardizovaná medzinárodnou optickou úniou ITU a rozdeľuje optické pásmo 1530-1565nm (nazývané prenosové pásmo C) na 50GHz široké frekvenčné pásma. Bitová rýchlosť v diaľkových sieťach dosahuje 100Gbit/s na jednu vlnovú dĺžku za použitia polarizačne multiplexovanej QPSK (PMD-QPSK)[BENN14]. Pre prenos v 50 GHz optickej mriežke sú modulácie pre prenosové rýchlosti nad 100Gb/s na jeden kanál nevyhovujúce. Použitie optických modulácií s väčšou spektrálnou účinnosťou by zase výrazne znížilo dosah takéhoto prenosového systému. Riešením problému by sa mohlo ukázať použitie superkanálov, kedy predpokladáme redukciu medzery medzi kanálmi na medzeru blízku Nygiustovej šírky pásma [MAZU18] . Riešením sa z pohľadu zvyšovania kapacity ukázal lepší manažment rozdelenia optickej prenosovej mriežky [GERST12]. Takýto manažment optickej mriežky je založený na flexibilita pridelenia širok frekvenčných prenosových okien podľa potreby komunikácie. S takouto technológiou je potom dosiahnuteľné rozdelenie mriežky na 12.5 Ghz, alebo až 6.25 GHz okná, čo predstavuje 4- 8 väčší počet prenosových kanálov v pásme C ako pri 50 GHz mriežke [SHEN18]

1.2 Viacstavové modulačné formáty

Ďalším riešením je použitie viacstavových kľúčovacích techník, ktoré by ponúkali lepšiu spektrálnu účinnosť a vyššiu prenosovú rýchlosť na jeden kanál (100Gb/s). Využitím viacstavových formátov (16 QAM, QPSK, 8PSK,...) v kombinácii s polarizačným multiplexom je možné dosiahnuť prenosové rýchlosti až 100 Gb/s na jeden kanál [BENN14]. Viacstavové kľúčovacie techniky sú ľahšie ovplyvniteľné šumovými pomermi na optickej prenosovej trase, čo znižuje dosah ich prenosu, a to konkrétne amplitúdovým šumom, fázovým šumom vysielacieho lasera a lasera v lokálnom oscilátore. Generovanie signálu s viacerými nosnými môže byť vykonané v optickom alebo elektrickom spektre a ortogonálne namultiplexované (OFDM) Pre OFDM signály môžeme modulovať subnosné pomocou BPSK,QPSK alebo viacstavovými elektrickými signálmi. Takto vyhotovené vysielacie bývajú technologicky zložitejšie od čoho sa odvíja aj ich vysoká cena [AGRE16].

Ďalšou výzvou je prekonanie hranice 400GB/s. Tieto rýchlosti sú dosiahnuteľné dvoma spôsobmi. Prvým spôsobom je použitie formátov nižších rádov (PM 16QAM) [JAIN17]. Takéto systémy okupujú široké frekvenčné pásmo (až 200GHz pri 1Tb/s). Druhou možnosťou je použitie viacstavových modulačných formátov s polarizačným multiplexom PM-mQAM (kde m= 64, 128, 256). Takéto systémy spĺňajú rozmiestneniu kanálov 50GHz, no vyžadujú rozsiahle digitálne spracovanie signálu v prijímači [TEMP16], [MAZU18].

2. Ciele dizertačnej práce

V súčasnosti zaznamenávame čoraz väčšie nároky na optické siete, či z hľadiska zvyšovania rýchlosti kapacity a dosahu pri chrbticových sieťach alebo úsporu šírky pásma pre vysielanie jednotlivých signálov v prístupových sieťach. Nasadenie nových zariadení alebo budovanie nových optických sietí je cenovo veľmi náročné alebo technicky nerealizovateľné. Preto musíme hľadať spôsoby akým dokážeme týmto nárokom vyhovieť. Jedným z vhodných riešení sa ukázalo nasadenie viac stavových modulácií. Takéto riešenie zvýši prenosové rýchlosti, a dosiahnuteľné vzdialenosti na už vybudovaných optických sieťach. V dizertačnej práci sa zameriavam na jednotlivé typy modulácií a optických zariadení používaných v jednomódových vláknach. Hlavným cieľom dizertačnej práce bude nájsť optimálne spojenie daných zariadení a použitých modulačných technikách z hľadiska dĺžky vlákna a prenosovej rýchlosti (40 Gbit/s, 100 Gbit/s, ...) Na základe poznatkov získaných v danej problematike sú ciele dizertačnej práce formulované nasledovne:

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

3. Metodika práce a metody skúmania a výsledky práce

Cieľom dizertačnej práce je rozšírenie simulačného modelu pre optické prenosové médium o modely používaných zariadení, optimalizácia simulačných metód a následne návrh vhodnej úpravy modulačnej techniky a jej implementáciu v optickom prenosovom médiu. Prvým krokom je vytvorenie simulačnej platformy, ktorá bude pripojená na model optického prenosového vlákna za účelom merania kvality vybraných modulačných techník. Z existujúceho simulačného modelu som použil model jednomódového optického vlákna. Všetky ostatné bloky som navrhol na základe naštudovanej teórie a odvodených matematických modeloch. V prvej časti priblížim hodnotenie prenosu signálov, následne opíšem metodiku, ktorú som použil na vytváranie modulov optických prvkov v simulačnom prostredí Matlab Simulink a na záver zhodnotím vybrané modulačné techniky. Prvé opíšem moduly, ktoré sú rovnaké pre každý typ modulácie (laser DFB, optický zosilňovač EDFA) a následne budem opisovať bloky rozdelené podľa jednotlivých modulačných techník.

3.1.1 Výsledky modelu lasera DFB

Vytvorený model lasera DFB umožňuje simuláciu dynamických parametrov ľubovoľného polovodičového lasera s distribuovanou spätnou väzbou. Podmienkou je extrakcia parametrov, ktoré sú základom pre sústavu kinetických rovníc (1)-(3).

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I_{in}(t)}{q} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g \frac{N(t) - N_0}{1 + \varepsilon S(t)} S(t) + F_N(t) \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = g \frac{N(t) - N_0}{1 + \varepsilon S(t)} S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\beta N(t)}{\tau_n} + F_S(t) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{\alpha_f}{2} g (N(t) - N_{avg}) + F_\theta(t) \quad (3)$$

kde $I_{in}(t)$ je budiaci prúd, ktorým laser napájame, q je elementárny elektrický náboj, $N(t)$ je populácia elektrónov v aktívnom pásme lasera, N_0 je populácia elektrónov v aktívnom pásme pred pripojením budiaceho prúdu, $S(t)$ je populácia fotónov v aktívnom médiu, τ_n je životný cyklus elektrónov, τ_p je životný cyklus fotónov, ε je koeficient kompresie zosilnenia, g je koeficient sklonu zisku, β je podiel spontánnej emisie vo výstupnom žiarení, θ_m je optická fáza, α_f faktor rozšírenia pracovnej šírky pásma výsledného žiarenia a F_N, F_S, F_θ sú šумы v aktívnom pásme lasera DFB vyjadrené ako langevinove šумы s Gaussovyým rozdelením s nulovou strednou hodnotou.

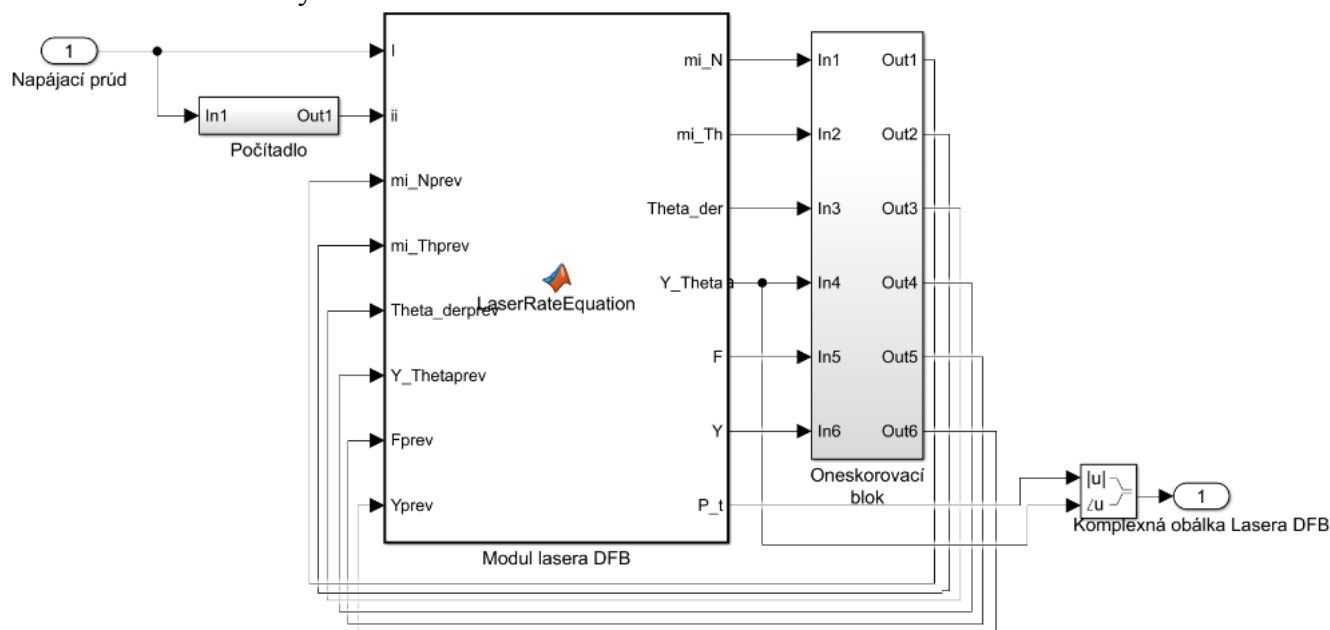
Tab. 1. Zoznam extrahovaných parametrov pre kinetické rovnice DFB lasera

Parameter	Extrahovaná hodnota	Parameter	Extrahovaná hodnota
τ_n [ns]	0,33	β	$3,54 \times 10^{-5}$
τ_p [ps]	7,15	N_0	$8,2 \times 10^6$
g [s^{-1}]	$1,13 \times 10^4$	η_d	0,21
ε	$4,58 \times 10^{-8}$	α_f	1,55

Pre riešenie rovníc (1) – (3) bola použitá metóda Runge - Kutta štvrtého rádu. Táto metóda využíva krátky časový okamih pre dostatočnú aproximáciu výstupných charakteristík lasera $\Delta t = 10$ ms. Časový krok môže byť zmenšený v prípade potreby presnejšej aproximácie výstupných kriviek no tým pádom rapídne narastá čas potrebný na simuláciu. Parametre použité v mojej simulačnej platforme boli extrahované v práci [FATA06] a sú zobrazené v tab. 1.

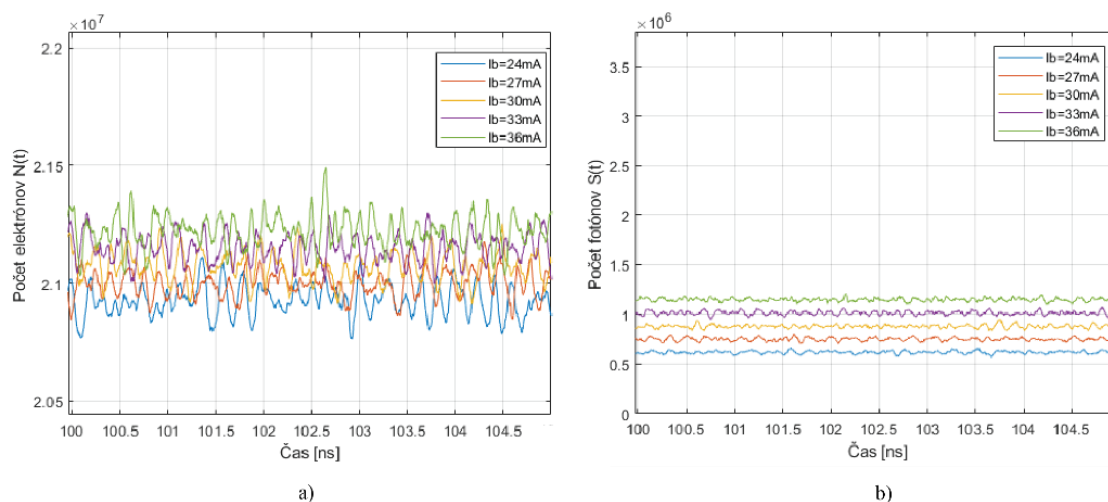
Svetelná vlna je v simulačnej platforme reprezentovaná ako vysokofrekvenčná elektrická vlna. Centrálna vlnová dĺžka DFB lasera je nastavená na 1550 nm čomu vo frekvenčnom spektre

odpovedá frekvencia 193.1 THz. Optická vlna je reprezentovaná komplexnou obálkou z dôvodu vysokej centrálnej frekvencie vlny, čo by zaťažilo výpočtový výkon. Výpočtový výkon je zaťažený z toho dôvodu, že výpočet populácie elektrónov, fotónov, optickej fázy a šumových zdrojov je závislý od hodnoty predošlej iterácie ako je zobrazené na obr. 1. Oneskorovací blok musí byť pridaný do simulačnej platformy aby nevznikla algebraická slučka, s ktorou si nevie Simulink logicky poradiť. Čas oneskorovacieho kroku je zadávaný jednotne pre všetky konštanty, ktoré potrebujú hodnoty predošlej iterácie na výpočet aktuálnej hodnoty. Čím kratší časový interval je zvolený tým presnejšie sú aproximované výstupné dynamické charakteristiky DFB lasera avšak za cenu zvýšenia simulačného času.



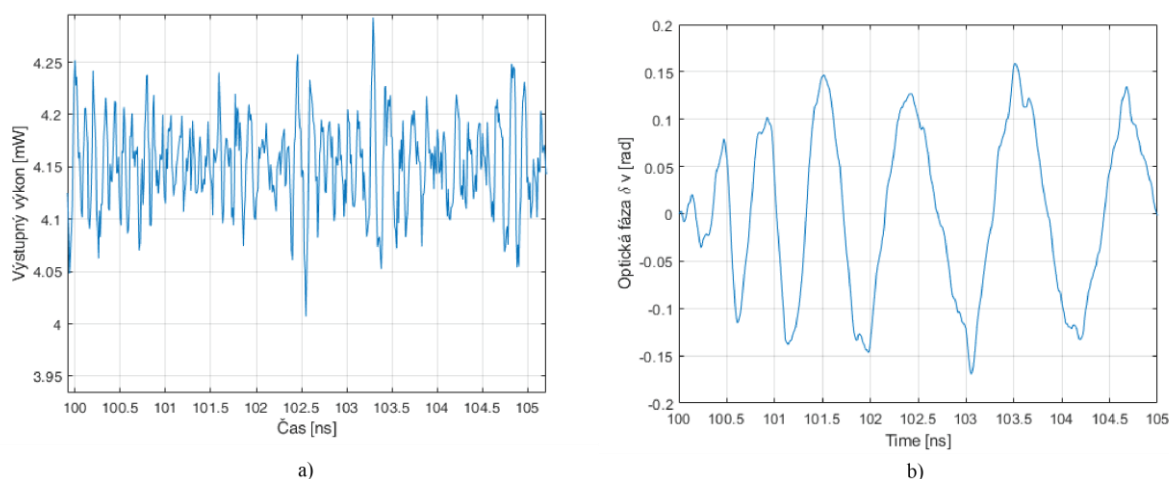
Obr. 1. Model DFB laser

Pre parametre uvedené v tab.1 je hodnota prahového napájacieho prúdu určená je 9,903 mA. Nad touto hranicou pracuje zvolený laser v režime stimulovanej emisie. Režim stimulovanej emisie sa skladá z dvoch stavov. Prvým stavom je prechodový stav kedy vplyvom budiaceho prúdu prudko narastie počet elektrónov v aktívnom pásme DFB lasera, ktoré rekombinujú s dierami a emitujú veľké množstvo fotónov, čím dosiahne populácia fotónov maximum. Druhým stavom je ustálený stav, kedy sa populácie elektrónov a fotónov ustália a laser produkuje ustálený výkon. Pre bližšie zobrazenie vplyvu šumu na výstupné dynamické charakteristiky DFB lasera potrebujeme sledovať činnosť tohto lasera v ustálenom stave. V simulácii toho je možné dosiahnuť vytvorením priemerných hodnôt počtu elektrónov a fotónov v aktívnom médiu pri určitom napájacom prúde a potom použiť túto hodnotu ako východziu pri riešení rovníc (1) – (3) metódou Runge - Kutta. Na obr. 2 je zobrazený časový priebeh výstupných charakteristík v ustálenom stave DFB lasera.



Obr. 2. Časová závislosť a) počtu elektrónov b) počtu fotónov s pridanými šumovými zdrojmi v ustálenom stave DFB lasera

Najdôležitejšími parametrami pre posudzovanie kvality lasera je výstupný výkon a fluktuácia optickej fázy. Tieto dva parametre najviac vplývajú na chybovosť celého optického systému, keďže sú lasery používané vo vysielacích moduloch ale aj ako lokálne oscilátory v koherentných detektoroch. Na obr. 3 je zobrazená závislosť výstupného výkonu a fluktuácia optickej fázy.



Obr. 3. Časová závislosť a) optického výkonu b) fluktuácie fázy v ustálenom stave DFB lasera

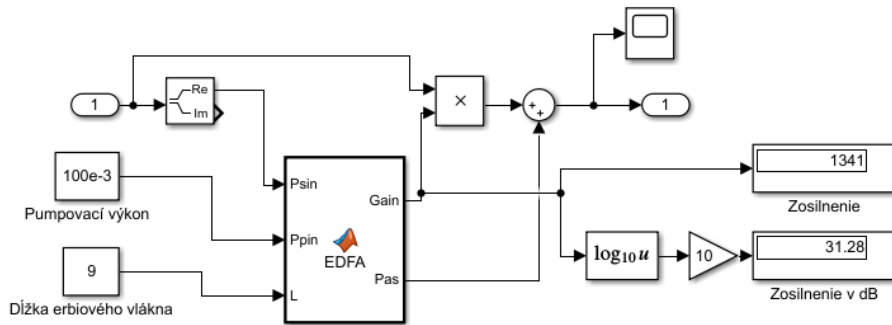
Pri tejto simulácii bola použitá vlnová dĺžka 1550nm a napájací prúd 35 mA. Stredná hodnota výkonu je 4.15 mW a výkon šumu je 0.1mW čo je vzhľadom na strednú hodnotu výkonu významný šumový príspevok. Výstupný výkon je závislý od napájacieho prúdu a vlnovej dĺžky. Model lasera je naprogramovaný ako vložená Matlab funkcia do prostredia simulačného softvéru Simulink a funguje nasledovne. Najprv sú počítané počty fotónov a elektrónov v aktívnom médiu lasera, ich interakcie a ich šumové zdroje, ktoré reprezentujú fluktuácie v amplitúde a fáze týchto nosičov. Potom je na základe počtu týchto častíc v aktívnom médiu vypočítaný optický výkon. Optická fáza je získaná numerickou integráciou kde sa od aktuálnej hodnoty v cykle odčítava priemerná hodnota optickej fázy. Následne je optický výkon a optická fáza spojená do komplexnej obálky, ktorá je frekvenčne posunutá na potrebnú frekvenciu, ktorá zodpovedá vlnovej dĺžke laserov používaných v reálnych prenosových sieťach.

3.1.2 Výsledky modelu zosilňovača EDFA

Model zosilňovača EDFA je taktiež vytvorený v simulačnom prostredí Simulink ako vložená Matlab funkcia. Tento blok vypočíta na základe amplitúdy prijatého signálu pumpovacieho výkonu, operačnej vlnovej dĺžky, a dĺžky použitého vlákna dopovaného erbiom zosilnenie signálu a šumový príspevok samotného zosilňovača, ktorý je potom pripočítaný k zosilnenému signálu. Výpočet výstupného výkonu na základe prijatého signálu je možné vidieť (4). Výstupné charakteristiky sú počítané na základe extrahovaných parametrov uvedených v tab. 2. Hodnoty extrahovaných parametrov boli extrahované v [BINH15].

$$P_{Sout} = P_{Sin} e^{\frac{\Gamma_s(\sigma_{1-2} + \sigma_{2-1})}{A}} \left(\frac{W_{1-2} \frac{\Gamma_s \lambda \sigma_{1-2} P_{ase} + W_{1-3}}{hcA}}{W_{1-2} + W_{2-1} + \frac{\Gamma_s \lambda}{hcA} (\sigma_{1-2} + \sigma_{2-1}) P_{ASE} + W_{1-3} + \frac{1}{\tau}} N \right) - \Gamma_s \sigma_{1-2} \rho L \quad (4)$$

kde Γ_s faktor prekrývania EDFA na vlnovej dĺžke, λ je vlnová dĺžka signálu, σ_{1-2} je Absorpčný faktor optického signálu σ_{2-1} je emisný faktor optického signálu, σ_{1-3} je absorpčný faktor pumpovacieho signálu, σ_{3-1} je Emisný faktor pumpovacieho signálu, W sú miery prechody medzi stavmi, τ je florescenčná životnosť iónov, h je Planckova konštanta, P_{ASE} je výkon šumu zosilňovača, L je dĺžka erbiom dopovaného vlákna, c je rýchlosť svetla, je aktívna plocha erbiom dopovaného vlákna a P_{sin} je výkon vstupného signálu.



Obr. 4. Model EDFA zosilňovača

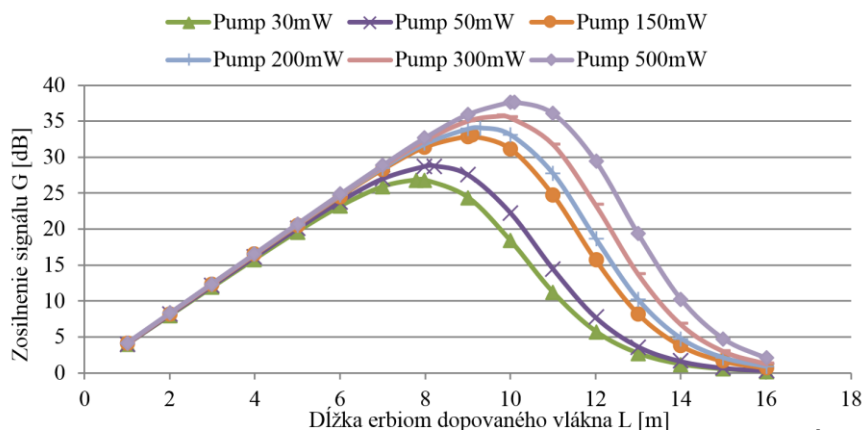
Tab. 7. Zoznam extrahovaných parametrov pre simulačné rovnice EDFA

Symbol	Extrahovaná hodnota	Symbol	Extrahovaná hodnota
$r [\mu m]$	1.4	σ_{2-1}	$3,8 \times 10^{-25}$
$\Gamma_{p(980)}$	0,64	$\sigma_{1-3(980)}$	$2,7 \times 10^{-25}$
$\Gamma_{p(1480)}$	0,43	$\sigma_{1-3(1480)}$	$1,5 \times 10^{-25}$
Γ_s	0,4	$\lambda_s [nm]$	1550
ρ	$6,3 \times 10^{24}$	$\lambda_{p1} [nm]$	980
$\tau_{er} [ms]$	10	$\lambda_{p2} [nm]$	1480
σ_{1-2}	$2,4 \times 10^{-25}$		

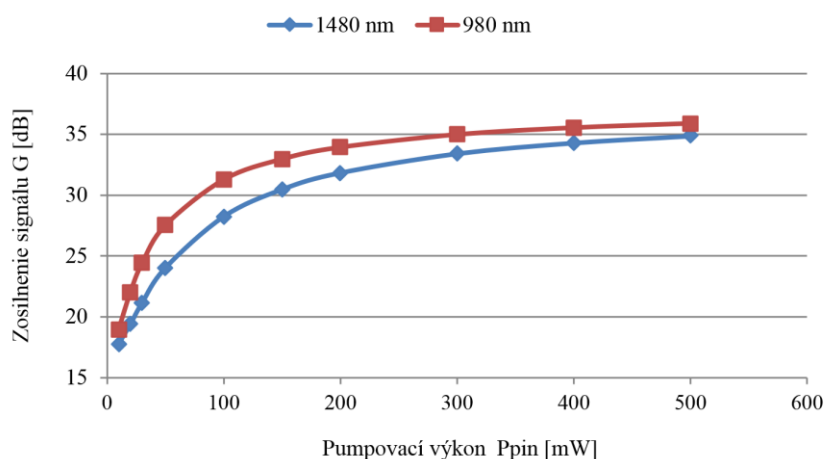
Výpočtový model pre výpočet výsledného zosilnenia pracuje nasledovne Najskôr sú vypočítané prechodové pomery medzi jednotlivými úrovňami modelu EDFA. Ďalej je vypočítaný počet erbioých iónov v metastabilnom stave a na základe počtu erbioých iónov v systéme sú dopočítané počty na ostatných úrovniach. Na základe týchto výsledkov je vypočítaný šumový príspevok EDFA a znova prepočítaná populácia erbioých iónov v metastabilnom stave, ktoré sú schopné produkovať vyhovujúce fotóny pri prechode optického signálu. Následne je Gaussov biely šum prenasobený konštantou výkonu šumu EDFA a pripočítaný k zosilnenému signálu.

Zmenu zisku EDFA je možné meniť zmenou dĺžky erbiového vlákna, zmenou pumpovacieho výkonu a zmenou pumpovacej vlnovej dĺžky.

Z obr.5 je možné vidieť, že zosilnenie rastie s rastúcou dĺžkou iba do určitej hodnoty dĺžky vlákna. Potom vplyvom šumového mechanizmu začne zosilnenie signálu klesať až pri hodnote 16m dosiahne zosilnenie 0dB. Z uvedeného grafu vidíme, že maximálna zosilnenie dosahuje EDFA pumpovaná na vlnovej dĺžke 980 nm pri dĺžkach erbiom dopovaného vlákna 7,2 – 10,1 m.



Obr. 5. Závislosť zosilnenia EDFA od pumpovacieho výkonu pri dĺžke E_r 9m



Obr. 6. Závislosť zosilnenia EDFA od pumpovacieho výkonu pri dĺžke E_r 9m

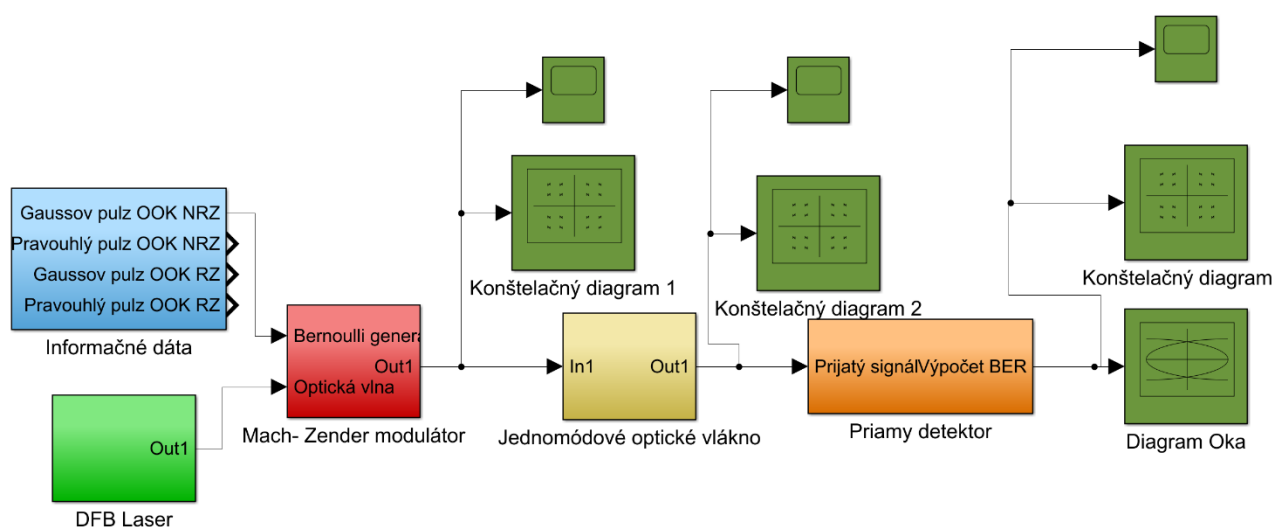
Na obr. 6 je znázornená závislosť zisku EDFA od pumpovacieho výkonu pre rôzne vlnové dĺžky pumpy. Rozdiel medzi ziskom pri pumpovanom výkone 150mW a ziskom pri pumpovanom výkone 500mW je 2,58 dB. Ďalej môžeme vidieť, že pri vlnovej dĺžke 980 nm dosahujeme v priemere o 3,185 dB lepší zisk oproti 1480 nm pri dĺžke E_r vlákna 9m. Priemer zosilnenia pri všetkých dĺžkach E_r vlákna je pri vlnovej dĺžke 980 nm o 2,63 dB lepší ako pri vlnovej dĺžke 1480 nm. Z uvedených údajov som nastavil EDFA zosilňovač do simulačnej platformy nasledovne. Dĺžku E_r vlákna som zvolil na 9m, vlnovú dĺžku pumpovacieho zdroja som použil 980 nm, a pumpovací výkon používam v rozsahu 100 - 200 mW. Rozsah zosilnenia pre jeden kanál potom dosahuje hodnoty 31,28 - 33.95 dB, čo je bežne dosahované zosilnenie pre jednokanálové EDFA zosilňovače v reálne prevádzke.

3.2 Simulačná platforma optického prenosového média

Realizácia celého projektu bola vytvorená v simulačnom prostredí Matlab Simulink R2017A. Na obr. 7. je zobrazená bloková schéma optickej simulačnej platformy. Blok Bernoulliho generátora (modrá) predstavuje informačný tok elektrických impulzov, ktorý je použitý na ovládanie ramien

Mach Zenderoveho modulátora. DFB laser (zelená) predstavuje model lasera s distribuovanou spätnou väzbou na ktorý je pomocou modelu Mach Zenderoveho modulátora (červená) namodulovaná informačná postupnosť. Model jednomódového optického vlákna (žltá) reprezentuje nepriaznivé vplyvy, ktoré degradujú signál pri prechode týmto médium. Optický prijímač (oranžová) predstavuje elektro optický konvertor, ktorý prijíma optickú vysokofrekvenčnú vlnu premieňa ju na naspäť na elektrický signál. Meracie bloky (tmavo zelená) sú použité na vyhodnotenie prenosu signálu v jednotlivých častiach prenosového systému.

Všetky moduly predstavené v optickej platforme (Bernoulliho generátor, laser DFB, Mach - Zender modulátor, zosilňovač EDFA Optický prijímač) som vytvoril na základe matematických modelov prezentovaných v mojej dizertačnej práci. Bloky (Bernoulliho generátora, lasera DFB a optického zosilňovača EDFA) sú rovnaké pre každý z prezentovaných kľúčovacích formátov. Bloky MZM a optických detektorov som vytvoril zvlášť pre každý kľúčovací formát. Bloky optických zariadení, ktoré som vytvoril, som prepojal s existujúcim modelom jednomódového optického vlákna vytvoreného kolegami v predchádzajúcom období. Tento model pozostáva zo simulácie nepriaznivých vplyvov optického prenosového vlákna na prenášaný signál. Model prenosovej cesty je priblížený v [ROKA14].

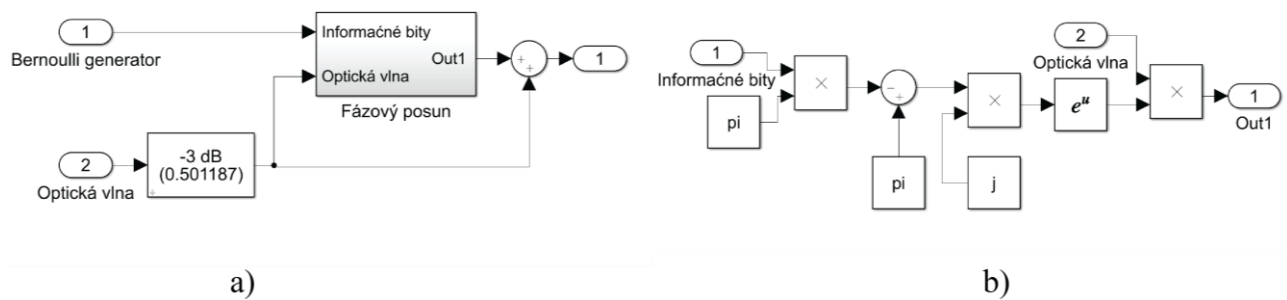


Obr. 7. Schematické znázornenie optickej simulačnej platformy

3.2.1 Prenosový systém s kľúčovaním OOK NRZ

Informačné dáta sú použité na riadenie jedného ramena Mach Zenderoveho modulátora, ktorý moduluje tieto dáta na optickú vlnu generovanú blokom DFB laser. Na obr. 8a je zobrazená bloková schéma MZM.

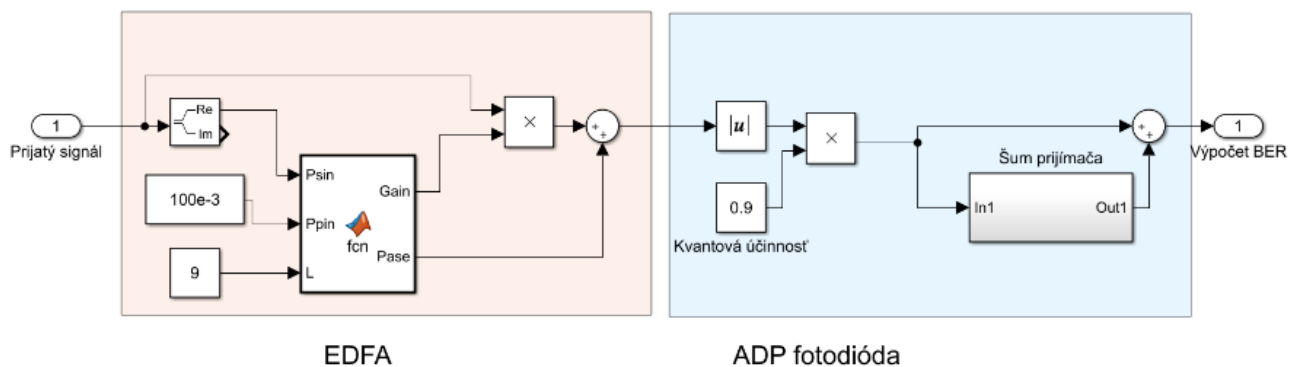
Vstupná optická vlna je rozdelená na dve rovnaké časti, pričom každá má polovicu výkonu pôvodnej optickej vlny. Následne je v jednom ramene aplikovaný fázový posun na základe zmeny informačných dát a na konci sú obe vlny spojené dohromady, čím je vytvorená optická modulácia. Logická operácia fázového posunu je zobrazená na obr. 8b.



Obr. 8. a) MZM pre kľúčovanie OOK b) vnútorná logika MZM

Informačné bity sú vynásobené hodnotou π , čo ich konvertuje na hodnoty v radiánoch konkrétne π pre log „1“ a nula pre log. „0“. MZM generuje fázový posun 180° v jednom ramene ak je na výstupe MZM vyžadovaný nulový výkon (deštruktívna vlna). Ak je na výstupe vyžadovaná výkon zodpovedajúci log. „1“ MZM generuje v hornom ramene fázový posun 0° (konštruktívna vlna). Rozsah hodnôt v radiánoch sa teda odčíta od fázového posunu π . To spôsobí generovanie nulového fázového posunu pre log. „1“ ($\pi - \pi = 0$) a fázový posun 180° ($0 - \pi = \pi$). Potom je signál premenený do komplexného tvaru a vynásobený s optickou vlnou. Takto posunutý signál je spočítaný s optickou vlnou a podľa informačného bitu vytvorí konštruktívnu alebo deštruktívnu vlnu na výstup MZM.

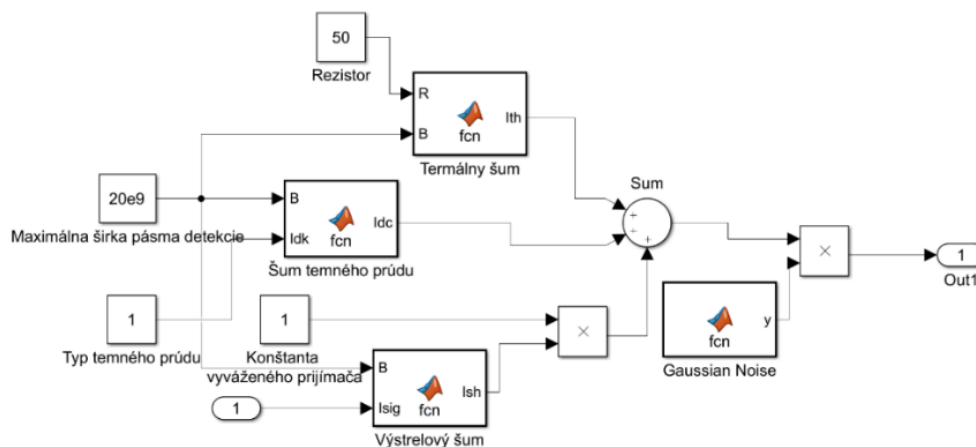
Zmodulovaný signál je po prechode optickým vláknom privedený do bloku priameho detektoru. Tento detektor sa skladá z predzosilňovača EDFA a bloku fotodiódy ako je zobrazené na obr. 9. Za blokom fotodiódy sa k detegovanému prúdu pripočíta šum optického prijímača.



Obr. 9. Bloková schéma optického prijímača pre OOK

Fotodióda pozostáva len z absolútnej hodnoty, ktorá reprezentuje konverziu na elektrický prúd a vynásobenie kvantovej účinnosti fotodiódy. Pre účely simulačnej platformy som vybral diódu ADP s parametrami, ktoré sú zobrazené v tab. 3.

Na obr. 10 je zobrazená výpočtová logika šumových príspevkov optického prijímača. Tieto šumy sú počítané na základe použitej konštelácie prijímača použitej fotodiódy. Keďže vo formáte s kľúčovaním OOK je použitá priama detekcia nie je potrebné zapájať vyvážený prijímač preto je premenná nastavená na hodnotu 1.



Obr. 10. Bloková schéma šumových príspevkov optického prijímača

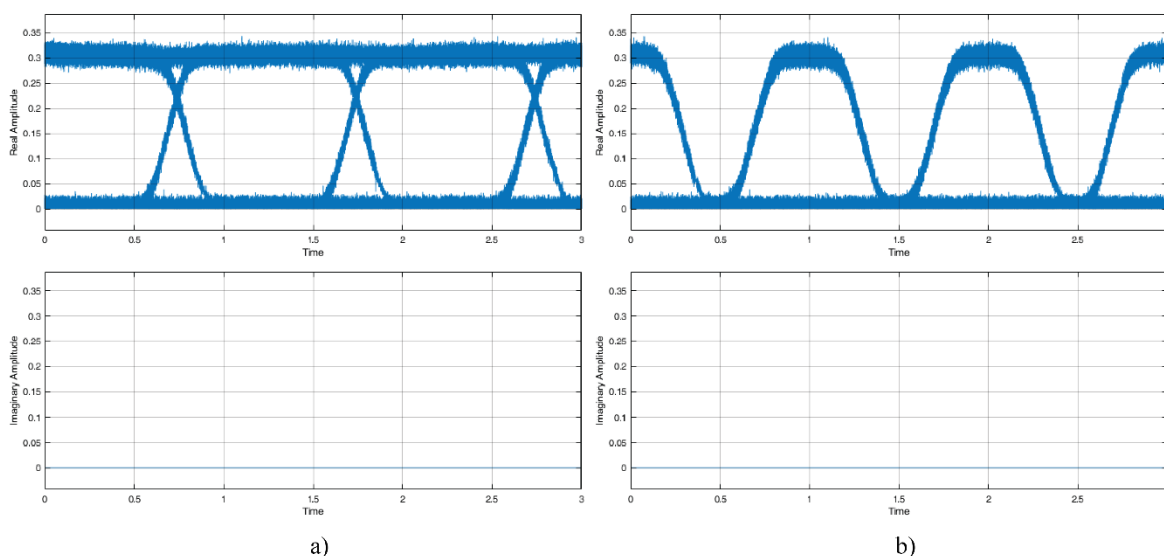
Tab. 3. Zoznam parametrov fotodiód použitých v simulačnej platforme.

Parametre/Typ	InGaAs PIN	APD IAG 080x
Teplota [°C]	25	25
Napájacie napätie [V]	3	55
Šírka pásma detekcie [GHz]	18	2.5
Kvantová účinnosť [A/W]	0.68	0.9
Zátťažový rezistor [Ω]	50	50
Temný prúd [nA]	5	10

Parametre z tab.3 sú získané z datasheetov výrobcov [NEON18],[LASE18].

Diagramy oka sú namerané po 80 km prenosu cez jednomódové vlákno Samsung G.652. zobrazeného v [ITUN18].

Po konverzii do elektrickej oblasti je signál poslaný na spracovanie do bloku diagram oka a konštruktívneho diagramu, kde je odhadnutá chybovosť prenosu na základe Q funkcie. Na obr. 18 je zobrazený diagram oka. Tento diagram zobrazuje všetky možné prechody bitov pri danom kľúčovacom formáte. Vzhľadom na to, že kľúčovací formát OOK nemá žiadne prechody na imaginárnej osi je priebeh pre imaginárnu (kvadrátúrnú os) nulový

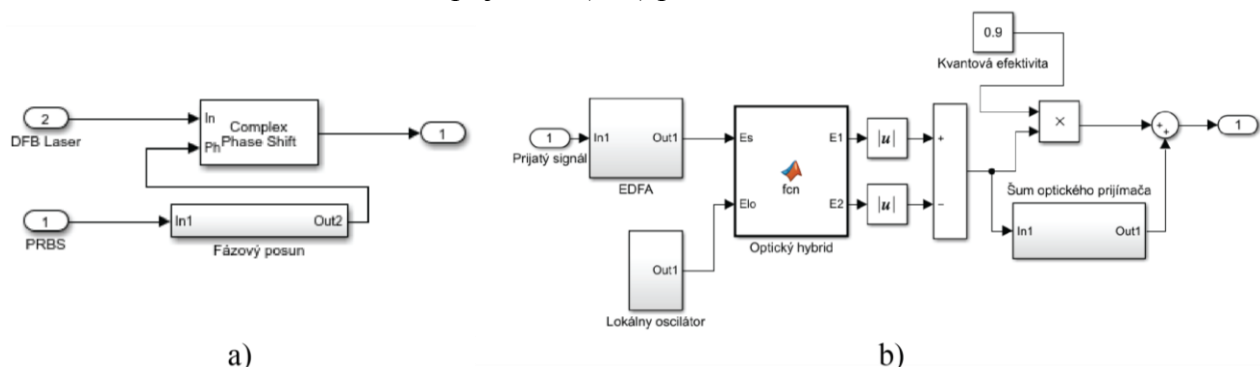


Obr. 11. Diagram oka pre formát s kľúčovaním OOK a) formát RZ b) formát NRZ

3.3 Prenosový systém s kľúčovaním BPSK

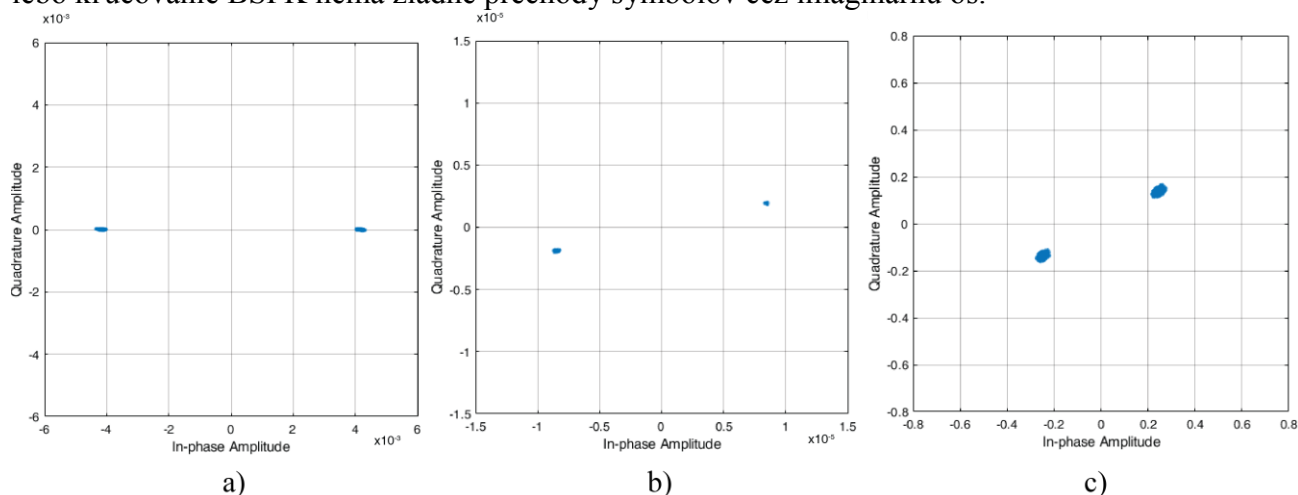
Pri MZM BPSK som simuloval iba vplyv jedného ramena MZM. V bloku fázový posun sa vytvorí fázový posun π pri prijatej log. 1 a fázový posun 0 pri prijatí log. 0 následne je tento fázový posun aplikovaný na optickú vlnu lasera DFB. Takto namodulovaný signál potom pokračuje cez optické vlákno a rovnako ako pri kľúčovaní OOK je pred prijatím predzosilnený zosilňovačom EDFA.

Po prechode zosilnení predzosilňovačom je signál privedený na koherentnú detekciu kde je najskôr zmiešaný so signálom lokálneho oscilátora. Na lokálny oscilátor bol použitý rovnaký typ lasera DFB ako vo vysielacej časti. Výkon lokálneho lasera je automaticky nastavovaný tak aby bol 2x vyšší ako prijatý signál, čo zabezpečí správnu detekciu na IQ osi. Z optického hybridu je signál privedený na vyvážený prijímač a následne odoslaný do vyhodnocovacích blokov konštelačného diagramu a diagramu oka. Na obr. 12a je zobrazená bloková schéma MZM modulátora pre kľúčovanie BPSK a koherentného prijímača (12b) pre kľúčovanie BPSK.

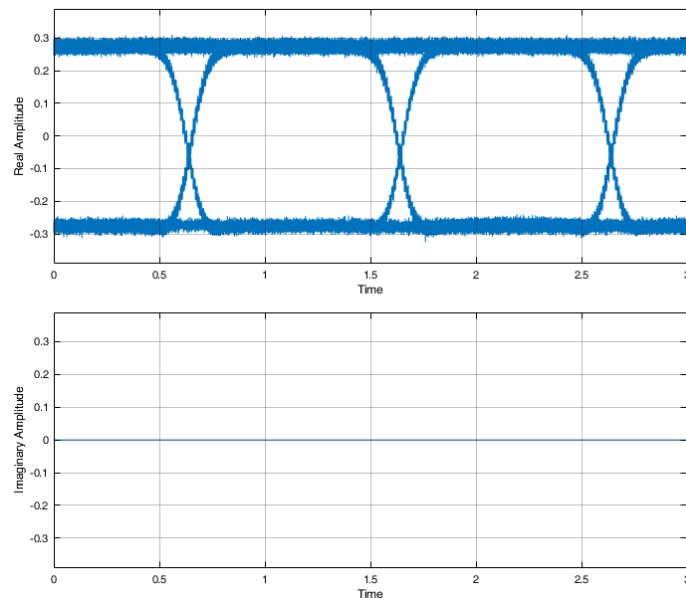


Obr. 12. a) MZM pre kľúčovanie BPSK b) koherentný prijímač pre kľúčovanie BPSK

Na obr. 13 vidíme zobrazenie porovnania konštelačných diagramov po modulátore, po prenosovej ceste a po detekcii koherentným prijímačom. Signál BPSK bol prenosovým vláknom fázovo posunutý, čo môžeme vidieť už na obrázku 13 b. Po detegovaní fotodiódou bol do signálu pridaný šum prijímača a fázový šum lasera čo môžeme vidieť ako zväčšené okolie okolo prijatých symbolov v konštelačnom diagrame (13c). Diagram oka ukazuje zase prechody iba na reálnej osi lebo kľúčovanie BSPK nemá žiadne prechody symbolov cez imaginárnu os.



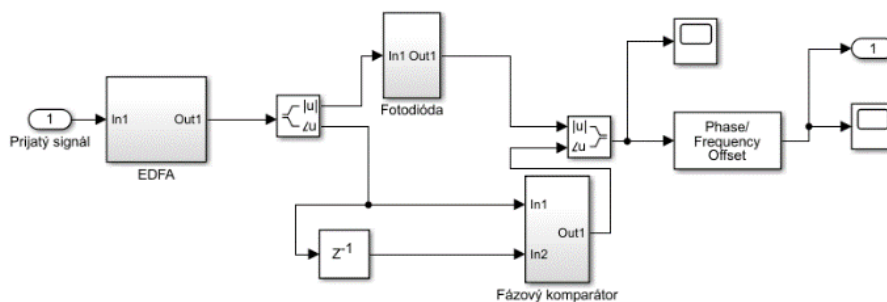
Obr. 13. Konštelačný diagram po detekcii fotodiódou pre kľúčovanie BPSK a) po modulátore MZM b) po prenosovej ceste c) po koherentnej detekcii



Obr. 14. Diagram oka po detekcii fotodiódou pre kľúčovanie BPSK

3.4 Prenosový systém s kľúčovaním DPSK

Kľúčovacie formáty BPSK a DPSK majú rovnaké zapojenie modulátorov. Jediný rozdiel je taký že DPSK modulátor je riadený predkódovanou dátovou postupnosťou. Na obr. 15 je zobrazená bloková schéma MZDI, vďaka ktorému je možnosť detegovať DPSK signál bez použitia lokálneho oscilátora, za použitia oneskorovacieho bloku a vyváženého prijímača. Konštelačný diagram oka sú pre tento kľúčovací formát takmer totožné ako pri BPSK. Tento fakt je spôsobený tým, že DPSK je rozdielne iba v spôsobe detekcie, čo sa prejaví pri zníženej tolerancii na OSNR ako bude ukázané v kapitole 4.

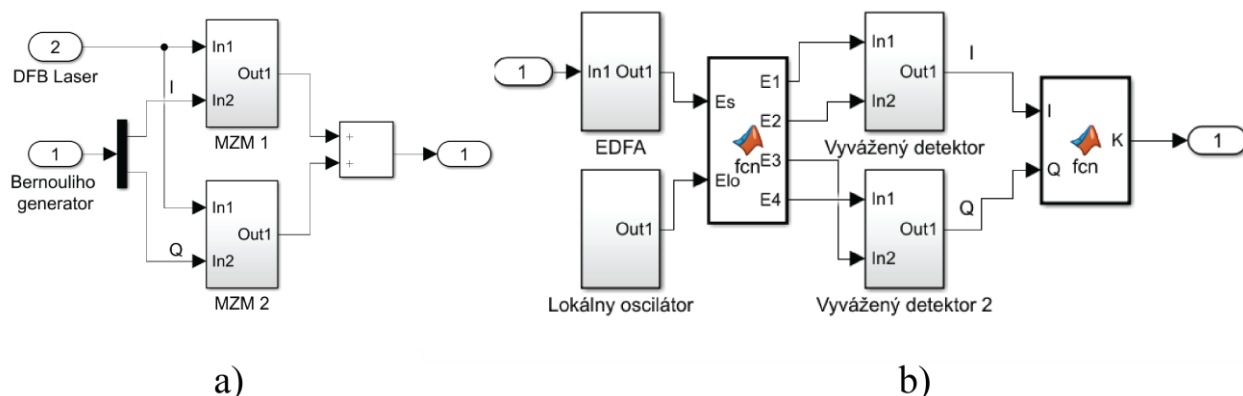


Obr. 15. Bloková schéma MZDI pre kľúčovanie DPSK

3.5 Prenosový systém s kľúčovaním QPSK

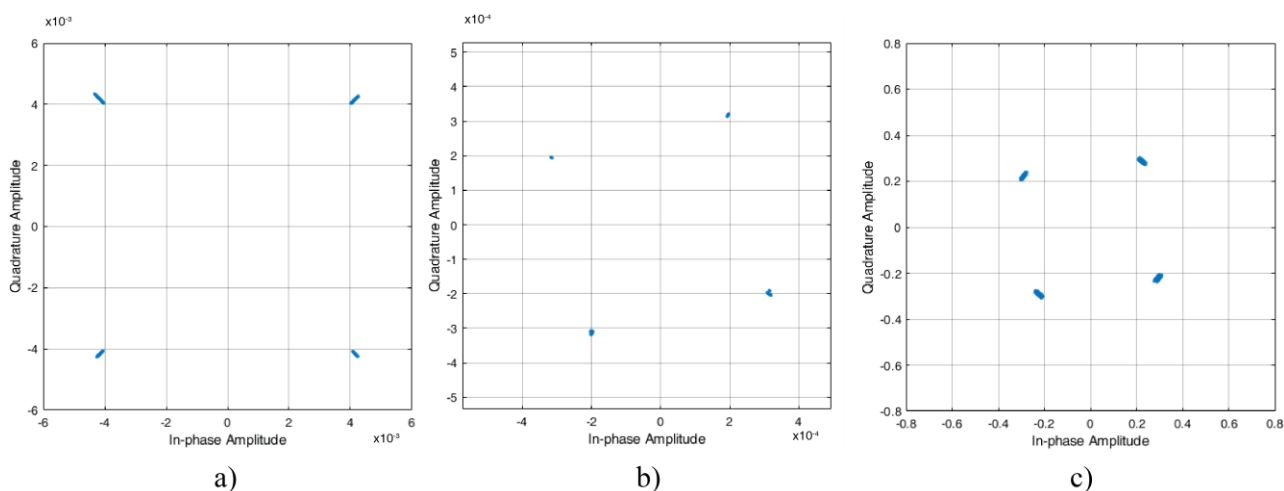
Pri použití kľúčovacieho formátu QPSK vychádza z bloku informačných dát dvojica bitov, ktoré ovládajú dva nezávislé Mach - Zenderove modulátory. Takto zapojené modulátory sa nazývajú duálne paralelné Mach-Zenderove modulátory DPMZM (dual parallel Mach - Zender modulator). V bloku DPMZM je signál informačný signál rozdelený do dvoch vetiev kedy jedna ovláda súfázovú rovinu (bit I) a druhá vetva ovláda kvadratúrnú rovinu (bit Q). Na obr. 16a je zobrazená bloková schéma DPMZM. Takto namodulovaný signál je potom poslaný na prenos optickým médiom.

Takto prijatý signál je spracovaný koherentným prijímačom. Najprv je signál zosilnený zosilňovačom EDFA potom je v optickom hybride 2x4 zmixovaný so signálom lokálneho oscilátora a potom je každá dvojica výstupov z optického hybridu spracovaná vyváženým detektorom, ktorý určí polohu I a Q bitov a tým pádom aj pohyby symbolov na súfázovej a kvadráturnej osi. Na obr.16b je zobrazená bloková schéma koherentného prijímača pre prenosový systém s kľúčovaním QPSK.

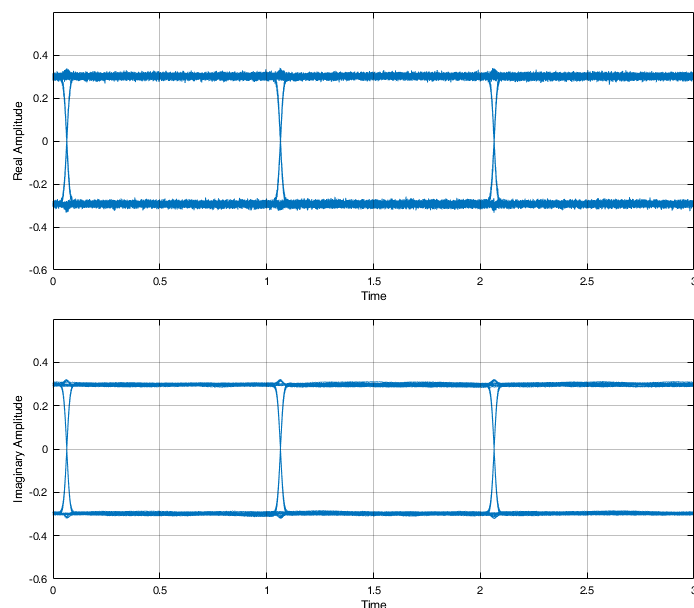


Obr. 16. a) MZM pre kľúčovanie QPSK b) koherentný prijímač pre kľúčovanie QPSK

Na obr. 17 vidíme zobrazenie porovnanie konštelačných diagramov po modulátore, po prenosovej ceste a po detekcii koherentným prijímačom. Fázový posun po prenosovej ceste (obr. 17b) je spôsobený vplyvom disperzie. Body konštelačného diagramu sú poposúvané v rámci malej oblasti vplyvom fázového šumu lokálneho oscilátora (obr. 17c). Do signálu je započítaný aj šum vyváženého prijímača. Na obr. 18 je zobrazený diagram oka za koherentným prijímačom po prenose cez modul optického vlákna. Na diagrame je vidieť pomery signálu a šumu v oboch prechodoch cez IQ rovinu.



Obr. 17. Konštelačný diagram po detekcii fotodiódou pre kľúčovanie QPSK a) po modulátore MZM b) po prenosovej ceste c) po koherentnej detekcii

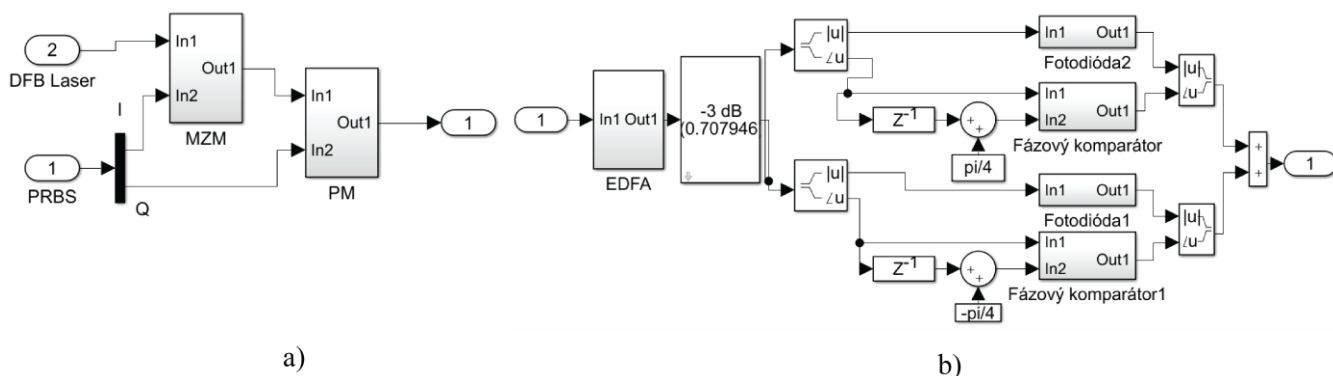


Obr. 18. Diagram oka po detekcii fotodiódou pre kľúčovanie QPSK

3.6 Prenosový systém s kľúčovaním DQPSK

Rovnako ako pri binárnych fázových kľúčovacích formátoch je formát DQPSK veľmi podobný ako formát QPSK. Rozdiel je len v predkódovaní informačného toku tak aby sa kodovala len zmena fázy v dvoch po sebe idúcich bitoch. Z tohto dôvodu som nezobrazoval pre tento kľúčovací formát diagram oka a konštelačný diagram. Toto kľúčovanie je vyhodnotené spolu s ostatnými kľúčovacími formátmi v kapitole 5.

Do MZM prichádza prekódovaná bitová postupnosť DQPSK. Priamo v modulátore je rozdelená na dva bitové toky I a Q, ktoré ovládajú súfázovú a kvadratúrnú zložku. Vyhovotenie modulátora je rozdielne oproti QPSK a je zobrazené na obr. 19a. Informačný bit I ovláda jeden MZM, ktorý vytvorí BPSK konšteláciu. Druhý bit je posielaný do fázového modulátora, ktorý pridá fázový posun $\pi/2$ do namodulovaných bitov z MZM, čím vytvorí konšteláciu DQPSK. Namodulovaný signál je poslaný cez optické vlákno do MZDI kde je zdetegovaný na princípe oneskorovacej linky.



Obr. 19. a) bloková schéma MZM pre kľúčovanie DQPSK b) Bloková schéma MZDI pre kľúčovanie DQPSK

Na obr. 19b je zobrazená bloková schéma MZDI pre kľúčovanie DQPSK. Prijatý signál je rozdelený do dvoch vetiev kde každá z vetiev je oneskorená o dĺžku trvania jedného bitu. Tieto vetvy sú navzájom porovnané vyváženým detektorom a k zisteným rozdielom fáz sú pripočítané konštanty $\pi/4$ a $-\pi/4$ aby sme docielili správnu detekciu všetkých bitov.

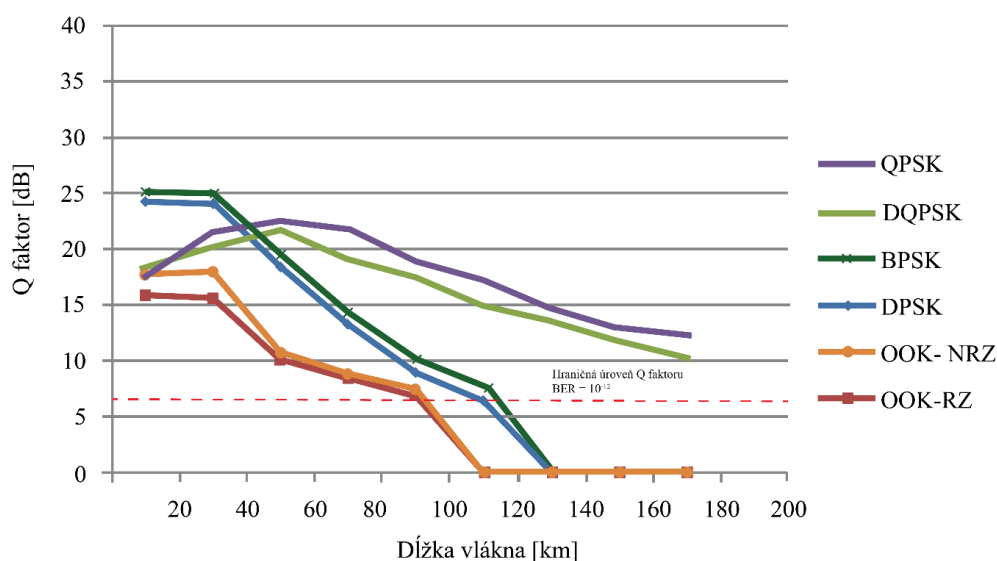
4. Vyhodnotenie výsledkov simulácie

Vybrané kľúčovacie formáty bolo možné testovať iba z hľadiska ich dosahu nakoľko bude v budúcnosti nutné dopracovať do simulačnej platformy moduly elektrického spracovania signálov v koherentnom prijímači. Faktor kvality Q bol vypočítaný pomocou diagramu oka, ktorý dokážeme prepočítať na bitovú a je daný (5).

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (5)$$

Na simuláciu je použité štandardné jednomódové vlákno ITU-T G.652 [ITUN18]. Model optického vlákna je možné nájsť v [CERT15]. Optický vysokofrekvenčný signál je generovaný modelom lasera CW-DFB, ktorý je napájaný prúdom 35 mA. Výstupný výkon lasera DFB je 4.3 mW. Operačná vlnová dĺžka lasera je nastavená na 1550 nm. Optická vlna je prenášaná vo forme komplexnej obálky z hľadiska časovej náročnosti. Operáciu modulácie zabezpečuje model MZM. Na prenos bol použitý jednokanálový systém s prenosovou rýchlosťou 10 Gb/s. Pred optický prijímač je zaradený predzosilňovač EDFA s dĺžkou erbiom dopovaného vlákna 9 m a pumpovacím výkonom 400 mW. Takto zostavený model EDFA produkuje zosilnenie 35.57 dB. V detektoroch sú použité priame prijímače alebo vyvážené prijímače podľa typu použitého kľúčovacieho formátu. Ako opto-elektrický konvertor je použitá lavínová dióda s kvantovou účinnosťou 0.9 W/A, šírkou pásma detekcie 2,5 GHz a vstupnou záťažou 50 Ω .

Na prenos bol použitý jednokanálový systém, bez použitia disperzne kompenzačného vlákna. Rýchlosť prenosu bola nastavená na 10 Gb/s.



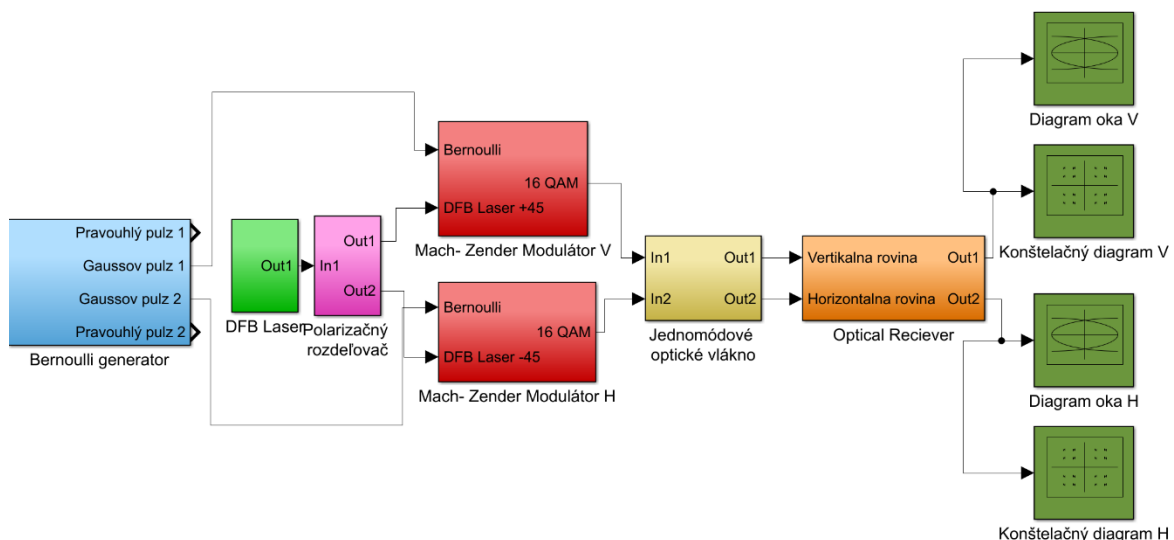
Obr. 20. Závislosť Q faktoru na dĺžke prenosového vlákna

Na obr. 20 vidíme ako sa mení faktor kvality Q v závislosti od dĺžky prenosového vlákna. Kľúčovacie formáty OOK-NRZ a OOK-RZ majú najmenšiu odolnosť voči nelineárnym vplyvom vlákna, čo sa aj ukázalo na prekročení spodnej hranice chybovosti komunikácie $BER=10^{-12}$ pri omnoho dĺžkach prenosu. Podobný dosah zaznamenali kľúčovacie formáty BPSK a DPSK. Z hľadiska chybovosti dosiahol lepšie výsledky fázový formát s koherentnou detekciou (v priemere o 1,8dB vyšší faktor kvality). Najväčšiu odolnosť voči nepriaznivým vplyvom dosiahli modulačné formáty QPSK a DQPSK. Z obrázku je viditeľné, že systém s koherentnou detekciou dosahoval lepšie výsledky faktoru kvality (v priemere o 2,28 dB) ako verzia formátu s nekoherentným prijímačom.

5. Návrh kľúčovania PM 16QAM a posúdenie jeho implementácie do reálnych optických prenosových systémov

V predošlých simuláciách som preukázal, že najvyššiu odolnosť voči nepriaznivým vplyvom vlákna preukázal formát s kľúčovaním QPSK. Tento formát prenáša 2 symboly v dĺžke trvania jedného bitu, čím dosahuje spektrálnu účinnosť 2 bit/Hz. Konštelačný diagram zobrazený v teórii je totožný s konštelačným diagramom kľúčovania 4 QAM. V praxi je rozdiel kvality medzi QPSK a DQPSK tak nízky, že sa v rámci šetrenia nákladov na prijímač používa kľúčovací formát DQPSK, vzhľadom na absenciu potreby koherentnej detekcie. Tento formát je využívaný pri 40G systémoch. Pri prechode na 100G systémy sa začala využívať kombinácia multiplexnej a kľúčovacej techniky PM-QPSK, ktorá mala spektrálnu účinnosť 4 bit/Hz. Vzhľadom na štandard ITU G 694.1 dodržiavať pri DWDM 50 GHz rozstup signálov. Pri vyšších rýchlostiach tento kľúčovací formát okupuje väčšiu šírku prenášaného pásma, čím sa stáva nevyhovujúci pre prenos v DWDM podľa štandardu ITU G.694.1. Pre zúženie okupovaného pásma potrebujeme znížiť symbolovú rýchlosť, čo môžeme dosiahnuť zvýšením rádu kľúčovacej techniky. Najbližšou logickou možnosťou pre vysokorýchlostné formáty sa v poslednej dobe ukazuje formát PM-16 QAM. Tento formát je taktiež kombináciou multiplexnej a kľúčovacej techniky a jeho spektrálna účinnosť je 8 bit/Hz.

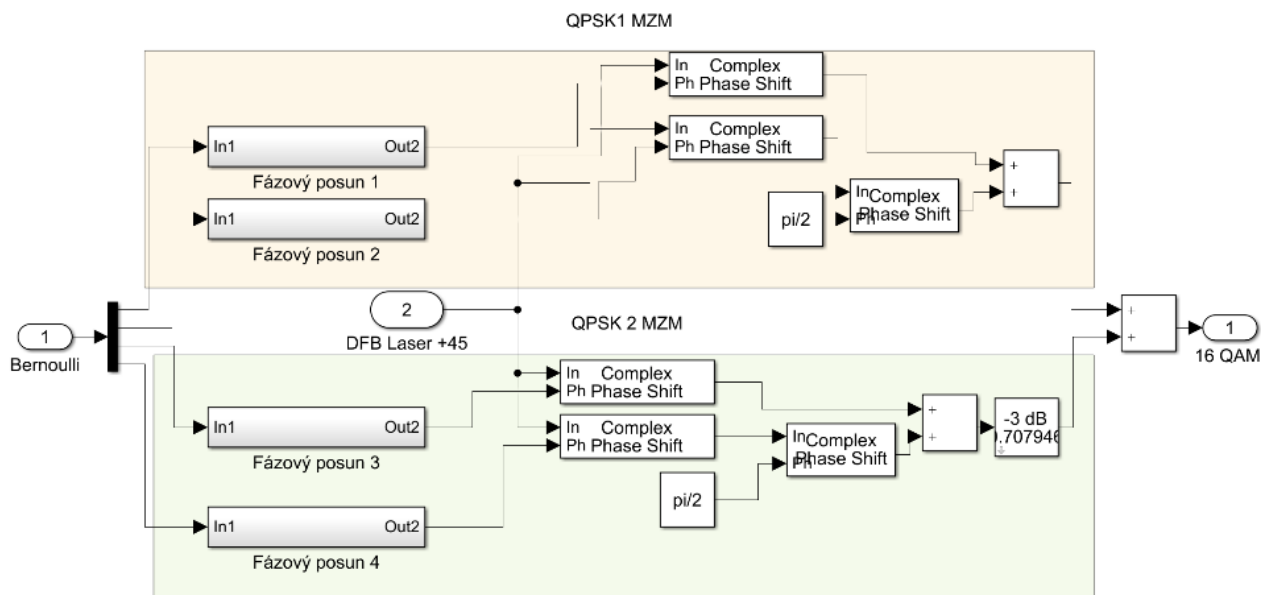
V ďalšej časti predvediem návrh takéhoto kľúčovacieho formátu v Simulačnej platforme pre optické prenosové médium. Na obr. 21 je zobrazená bloková schéma navrhovaného kľúčovacieho formátu PM-16QAM.



Obr. 21. Bloková schéma navrhovaného kľúčovacieho formátu PM-16QAM

Tento návrh sa skladá z Bernoulliho generátora (modrá), ktorý produkuje bitový tok 8-mych symbolov. Signál z lasera DFB je rozdelený polarizačným deličom do dvoch polarizačných rovín. Toto rozdelenie je vykonané na základe zmeny polarizácie svetla o $+45^\circ$ a -45° , čím vznikne medzi dvoma vlnami lasera fázový posun 90° . Na takto polarizované vlny je potom pomocou modulátorov namapovaný konštelačný formát 16QAM.

Kvadratúrne paralelné Mach-Zenderove modulátory (červená) QPMZM (quad parallel Mach-Zender modulators) sú riadené dátovými tokmi z Bernoulliho generátora (4symboly pre každý QPMZM). Dva QPSK modulátory vyprodukujú QPSK konšteláciu, z ktorých je jedna konštelácia utlmená o 3 dB a následne je namapovaná na QPSK1 MZM, čím vznikne 16QAM konštelácia. Na obr. 22 je zobrazená bloková schéma QPMZM v simulačnej platforme pre optické prenosové médium.



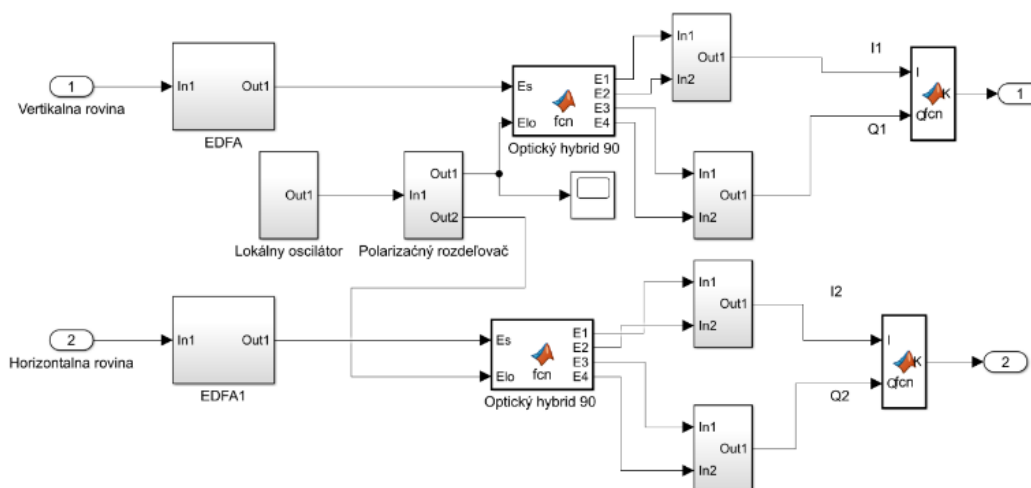
Obr. 22. Bloková schéma QPMZM v simulačnej platforme pre optické prenosové médium

Takto upravené signály v oboch rovinách sú polarizačným kombinátorom spojené do jednej optickej vlny a vyžiarené do optického vlákna.

Tu vznikol počas simulácie problém. Modul optického vlákna vypracovaný kolegami v minulosti nedokáže prenášať optickú vlnu v dvoch polarizačných rovinách. Model bol vytvorený tak aby ovplyvňoval signály podľa typov nepriaznivých vplyvov na vlákne postupne. Signál je v rámci každého bloku rozdelený na obálku a fázu a po ovplyvnení daným nežiadúcim javom zase spojený do komplexnej reprezentácie. Takto vytvorený modul prenosového vlákna vždy odstráni jednu polarizačnú rovinu.

V rámci návrhu som použil dva modely prenosového vlákna pre každý polarizačný mód. Signály sú prenášané separátne v rovinách takže sa neprejaví ich vzájomné ovplyvňovanie v rámci prenosového vlákna.

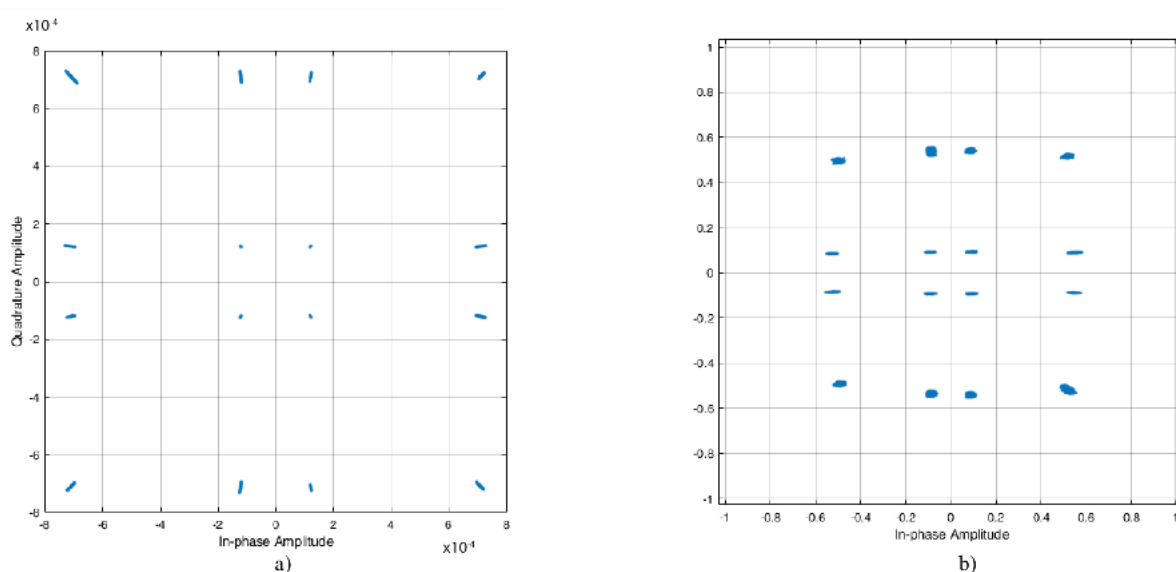
Po prenose optickým vláknom privádzam signály do koherentného detektora PM -16QAM. Bloková schéma koherentného detektora PM-16QAM je zobrazená na obr. 23.



Obr. 23. Bloková schéma koherentného optického prijímača PM-16QAM

Optický signál by mal byť rozdelený polarizačným deličom do dvoch samostatných tokov podľa polarizačných rovin, čo však v návrhu nie je potrebné lebo boli signály prenášané separátne v dvoch moduloch prenosového vlákna.

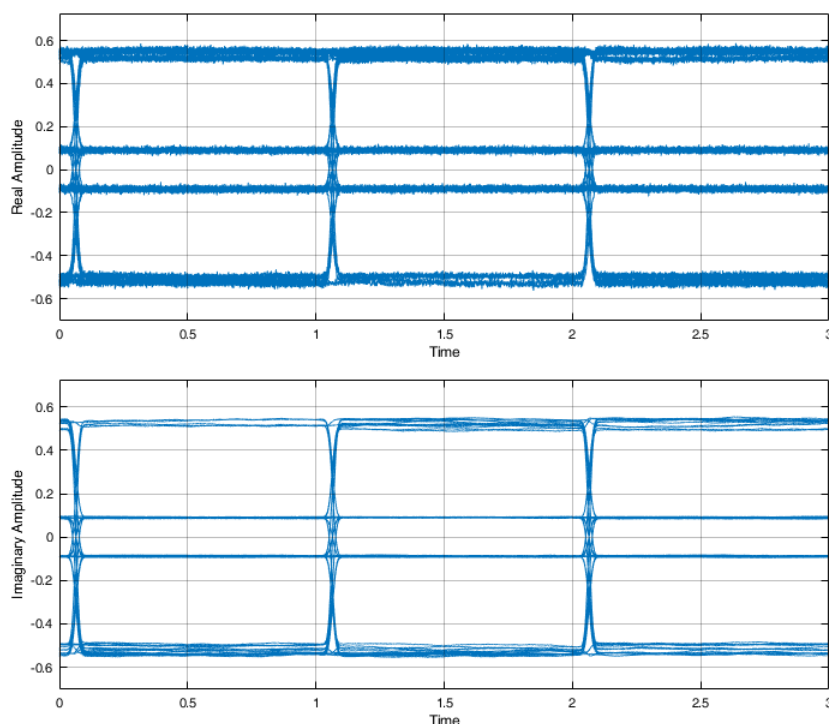
Optická vlna lokálneho oscilátora je rozdelená do dvoch polarizačných rovín a následne je pre každú rovinu zmiešaný signál so signálom lokálneho oscilátora v optickom hybride. Takto zmiešaný signál je následne detegovaný pomocou štyroch vyvážených prijímačov, ktoré detegujú zmeny v súfázovej a kvadratúrnej rovine.



Obr. 24. Konštelačný diagram V roviny PM-16QAM a) pred prenosom b) po prenose

Na obr. 24b vidíme konštelačný diagram vertikálnej roviny PM 16-QAM. Pri detekcii je vidieť, že nevznikol fázový posun v konštelácii, čo je spôsobené tým, že bloky CD a PMD boli odstránené z prenosovej cesty, keďže v čase keď boli vytvárané kolegami neboli otestované pri prenose viacstavových kľúčovacích formátoch a neboli na tento prenos prispôbené.

Na obr. 25 je zobrazený diagram oka pre vertikálnu rovinu PM16QAM. Môžeme vidieť, že tento typ kľúčovania zaznamenáva štyri prechody v kvadratúrnej a súfázovej oblasti, ako je zobrazené aj na konštelačnom diagrame PM-16QAM.



Obr. 25. Diagram oka vertikálna rovina PM 16QAM po koherentnej detekcii

Kľúčovacia technika PM-16QAM dosahuje štyrikrát vyššej spektrálnej účinnosti, čo znamená že taktiež potrebuje 4x vyššie OSNR ako PM-QPSK. Takýto formát bude zároveň 4x menej odolný na fázový šum počas prenosu (fázový šum lokálneho oscilátora, nelineárny fázový šum vplyvom optického vlákna). Pre najvyššiu spektrálnu účinnosť tohto formátu bude potrebné Nyquistove filtrovanie signálov v elektrickej oblasti [TANH15]. Pre zvýšenie dosahu tohto formátu bude potrebné používanie Ramanových zosilňovačov, ktoré síce ponúkajú menší zisk no na druhej strane poskytujú menší vložený fázový a amplitúdový šum a menšie nelineárne skreslenie signálu. Ďalšou požiadavkou pre nasadenie PM-16QAM je vytvorenie flexibilnej prenosovej mriežky [SHEN18]. Spektrálna účinnosť PM-16QAM bude po tvarovaní Nyquistovými pulzami 75 GHz s potrebným rozstupom 37.5 GHz, k čomu by bolo potrebné prispôbiť rekonfigurovateľné add-dropp multiplexory ROADM (reconfigurable optical add-drop multiplexer). Pri splnení týchto požiadaviek by mohol byť tento formát použitý v metropolitných sieťach vzhľadom na predpokladaný dosah 400-1000km.

Najdôležitejšou požiadavkou pre nasadenie PDM 16QAM to 400G systému s jednou nosnou je rozsiahle digitálne spracovanie elektrického signálu v koherentnom prijímači. Prvým krokom je navzorkovanie a kvantovanie analógových elektrických signálov prijatých z fotodiódy rýchlymi analógovo digitálnymi konvertormi ADC. Konvertory ADC kvantujú signál na 6 bitových úrovni, čo je postačujúce pre kľúčovacie formáty ktoré prenášajú 4 bity v jednom vyslanom symbole (16QAM, 16PSK) pre vyššie rády kľúčovacích formátov je potrebné rozlíšenie 8 bitových úrovni. 6 bitové ADC konvertory vedia poskytnúť vzorkovaciu rýchlosť 100 GSa/s [SCHU16], zatiaľ čo 8bitové ADC maximálne 90GSa/s [KULL14]. Tieto vzorkovacie obvody sú založené na BiCMOS technológii. Ďalej musí byť takto navzorkovaný signál časovo zarovnaný aby boli prijaté zložky vo fáze. Najpoužívanším algoritmom je Gram-Schmitdov algoritmus, ktorý vezme jeden vektor ako referenčný a k nemu dopočíta amplitúdu a sklon druhého vektora z optického hybridu tak aby boli vektory na seba kolmé. Následne je kompenzovaná chromatická disperzia v elektrickom signály pomocou filtra s konečnou impulzovou odozvou FIR (finite impulse filter) [SHE16]. Nasledujúcim krokom je kompenzácia nelineárnych efektov. Táto metóda je založená na spätnej propagácii svetla cez optické médium. Tento obvod upraví prijatý elektrický signál prevodom cez inverznú nelineárnu Schrodingerovu rovnicu (ktorá popisuje prechod svetla cez optické prenosové médium) a vyrovná nelineárne vplyvy (SPM, XPM, FWM) ktoré pôsobili na signál počas prenosu. Prevzorkovanie a obnova časovania je potrebná z dôvodu, že ADC nepracujú synchrónne s optickým vysielačom. Gardnerov algoritmus na obnovu časovania môže pracovať s 1 – 3 vzorkami pre jeden symbol, ktoré sú vytvorené pomocou obnovovacej slučky pozostávajúcej z vzorkovacieho interpolačného obvodu a obvodu na odhad chyby časovania. Z dôvodu hraníc rýchlostí ADC musí byť pre PM-16QAM použitá paralelná schéma s 2 vzorkami pre jeden symbol [DORI15]. Pre odstránenie oneskorenia vplyvom PMD musí byť použitý algoritmus CMMA alebo algoritmus DD- LMS. Pri použití dvojstavového DD- LMS algoritmu s SC – LDPC kódovaním môže byť faktor Q vylepšený až o 0.3 dB [HELI17]. Posledným krokom digitálneho spracovania signálov je ekvalizácia a obnova frekvencie a fázy. Maximálna šírka pásma lasera pre implementáciu musí byť 1,4 MHz. Rozdiel frekvencií pri heterodynnej detekcii musí byť vynulovaný algoritmom uzavretej slučky digitálnej fázy DPLL (digital phase locked loop) následne je pomocou Vitterbi – Vitterbi algoritmu zistený odhad fázy prijatého symbolu. Posledným krokom je digitálna demodulácia. Body, ktoré reprezentujú jednotlivé symboly sú zobrazené v I-Q rovine. Vzhľadom na to že každý symbol nie je rovnako zasiahnutý amplitúdovým a fázovým šumom nie je možné použiť tvrdé dekodovanie, ktoré uvažuje euklidovskú vzdialenosť prijatého symbolu od referenčnej konštelácie. Algoritmus predpokladu maxima EM (expectation maximization) optimalizuje prijatú konšteláciu pomocou nájdenia centroidov. Táto metóda dokáže prekonať deštrukciu tvaru konštelácie na základe aktuálne prijímaných dát.

6. Pôvodné vedecké prínosy

Cieľom dizertačnej práce bolo rozšírenie simulačného modelu pre optické prenosové médium o ďalšie zariadenia používané v optických prenosových systémoch, vytvorenie matematickej reprezentácie na ich implementáciu, optimalizácia a vytvorenie nových simulačných metód a návrh vhodnej formy optickej kľúčovacej techniky pre jej kompletne implementovanie v optických prenosových systémoch. Porovnal som kľúčovacie formáty používané v sieťach 40G a v simulačnej platforme som navrhol kombináciu modulačnej a multiplexnej techniky PM-16QAM, ktorá by mohla byť implementovaná v 400G systémoch v budúcnosti.

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

1. Prezentácia matematickej analýzy potrebnej na popis funkcie nasledujúcich optických zariadení: Laser DFB, Mach-Zenderov modulátor, optický zosilňovač EDFA, dióda PIN, dióda ADP, koherentný a nekoherentný optický prijímač
2. Vytvorenie modulu lasera DFB podľa kinetických rovníc lasera, ktorý je schopný simulovať ľubovoľné zariadenie pri extrakcii použitých parametrov, schopného pracovať v ustálenom móde aj v dynamickom móde s kompletnými šumovými pomermi reálnych laserov DFB
3. Vytvorenie modulu zosilňovača EDFA, ktorý je možné použiť v simulačnej platforme alebo na samostatné skúmanie vlastností EDFA, založeného na extrahovaných parametroch s kompletným popisom šumových pomerov
4. Implementácia elektro – optických prvkov fotodiód PIN a ADP s kompletnými šumovými pomermi
5. Vytvorenie modulov koherentného prijímača pre kľúčovacie formáty BPSK, QPSK, 16QAM
6. Vytvorenie modulu nekoherentného prijímača pre kľúčovacie formáty OOK, DPSK, DQPSK
7. Implementovanie modulov Mach Zenderových modulátorov pre kľúčovacie formáty OOK, BPSK, DPSK, QPSK, DQPSK, 16QAM
8. Analýza výsledkov simulácie faktoru kvality Q od dĺžky prenosu kľúčovacích formátov pri rýchlosti 10 Gbit/s
9. Návrh kľúčovacej techniky PM- 16QAM v simulačnej platforme a posúdenie možností jej praktickej realizácie v reálnych optických sieťach

Resumé

The aim of dissertation was to extend the simulation model for optical transmission medium of additional devices used in optical transmission systems, to design mathematical representation for their implementation, to optimize and to create new simulation methods and to design a suitable form of optical modulation technique. I compared the shift keying formats used in 40G networks and in the simulation platform I proposed a combination of modulation and multiplex techniques PM-16QAM that could be implemented in 400G systems in the future.

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 describe the function of the following optical devices: DFB Laser, Mach-Zender modulator, EDFA optical amplifier, PIN diode, ADP diode, coherent and incoherent optical receiver
2. Creation of a DFB laser module based on kinetic laser equations capable of simulating any device with extracted parameters capable of operations in steady mode and in dynamic mode with complete noise ratios of real DFB lasers
3. Creation an EDFA amplifier module that can be used in a simulation platform or a separate EDFA-based exam test, based on extrapolated parameters with a complete description of noise ratios
4. Implementation of electro-optical elements PIN and ADP photodiode with complete noise ratios
5. Creation coherent receiver modules for BPSK, QPSK, 16QAM shift keying formats
6. Creation of a non-coherent receiver module for OOK, DPSK, DQPSK shift keying formats
7. Implementation of Mach-Zender Modulators modules for OOK, BPSK, DPSK, QPSK, DQPSK, 16QAM shift keying formats
8. Analysis of simulation results of Q factor dependence on length of used fiber in 10 Gbit/s
9. Design of a PM-16 QAM shift keying format in the simulation platform and the assessment of the practical realization possibilities in optical transmission networks

Zoznam použitej literatúry

- [AGRE16] Agrell, E. Karlsson, M. Chraplyvy, A. Richardson, D. Krummrich, T. Winzer, P., Roberts, K., Fisher, J. Savory, S. Eggleton, J. Secondini, M. Kschichang, F. Lord, A. Prat, J. Tomkos, I. Bowers, J. Srinivasan, S. Pearce, M. Gisin, N. "Roadmap of optical communications" *Journal of optics, IOP Publishing*, ISBN: 2040-8979, 2016
- [BENN14] Bennet, G. Wu, K. Malik, A. Roy, S. Awadalla, A. "A review of high-speed coherent transmission technologies for long-haul DWDM transmission at 100G and beyond" *IEEE Communications magazine: Integrated circuits for communications*, ISBN: 0163-6804, 2014
- [BINH15] Binh, L. N. "Optical fiber communication systems with MATLAB and Simulink Models", *CRC Press in Taylor&Francis Group*, ISBN:978-1-4822-1752-0 2015
- [CERT15] Certik, F. ,Roka, R. "Simulation and analysis of the signal transmission in the optical transmission medium," *Internatiuonal conference on simulation and modeling methodologies SIMULTECH* no. 5, pp. 219-226, 2015.
- [DORI15] Dorize C., Ghazisaeidi A., Renaudier J., Charlet G., "Performance analysis of nonlinear and gardner timing error detectors with frequency selective pulse shaping," 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), Valencia, pp. 1-3, 2015
- [FATA06] Fatadin, I. Ives, D. Wicks, M. "Numericasl simulation of intensity and phase noise from extracted parameters for CW DFB lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*,Zv. 42,9 , 2006
- [GERST12] Gerstell, O. Jinno, M. Lord, A. Yoo, S. "Elastic optical networking a new dawn for the optical layer" *IEEE Communications magazine: Beyond 100G Optical communications*, ISBN 0163-6804, 2012
- [HELI17] Hélio C. J. *et al.*, "Single-carrier 400G unrepeated WDM transmission using nonlinear compensation and DD-LMS with FEC feedback," *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aguas de Lindoia,, pp. 1-5, 2017.
- [ITUN18] Internation telecommunacation union" G.652: Characteristics of a single-mode fiber and cable," *ITU recommendation* dostupné na internete: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en>, 2018
- [JAIN17] Jain, A. Krishnamurthy, P. Landais, P. Anandarajah, P. "EFK for joint mitigation o phase noise, frequency offset and nonlinearity in 400Gb/s PM-16-QAM and 200Gb/s PM-QPSK systems" *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, number 1, ISBN 1943 0655, 2017
- [JIA12] Jia Z., Yu J., Chien H.-Ch., Dong Z., *Field Transmission of 100 G and Beyond: Multiple Baud Rates and Mixed Line Rates Using Nyquist-WDM Technology*, In *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 30, Issue: 24, ISSN: 0733-8724, July 2012.
- [KULL14] Kull L., Toifl T., Schmatz M., Francese P. A., Menolfi C., Braendli M., Kossel M., Morf T., Meyer Anderson T., and Leblebici Y., "A 90GS/s 8b 667mW 64× interleaved SAR ADCin 32nm digital SOI CMOS," in *Int. Solid-State CircuitsConf. (ISSCC)*, pp. 378–379, 2014
- [LASE18] Laser Components " InGaAs Avalanche Photodiode IAG series," *Laser Components data sheet* dostupné na internete: https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lcd/iag-series_ingaas.pdf&no_cache=1, 2018

- [LUFU17]** Lu F., Zhang B., Yue Y., Anderson J., Chang G., Chang K., "Investigation of Pre-Equalization Technique for Pluggable CFP2-ACO Transceivers in Beyond 100 Gb/s Transmissions," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 230-237, 2017.
- [MAZU18]** Mazur, M. Lorences, A. Schroder J., Anderkson, P. Karlsson, M. "High spectral efficiency PM-128QAM comb-based superchannel transmission enabled by a single shared optical pilot tone" *IEEE J. of lightwave technology*, vol 36., no 6., 2018
- [NEON18]** NeonTech "High Speed InGaAs Photodetector," *NeonTech data sheet* dostupné na internete : http://neontech.cc/detector_31.html, 2018
- [ROH14]** Rohde H., Gottwald E., Teixeira A., Dias Reis J., *Coherent Ultra Dense WDM Technology for Next Generation Optical Metro and Access Networks*, In *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 32, Issue: 10, ISSM: 0733-8724, April 2014.
- [ROKA14]** Róka, R., Čertík, F. "Simulation Tools for Broadband Passive Optical Networks.", *Simulation Technologies in Networking and Communications: Selecting the Best Tool for the Test*, CRC Press in Taylor&Francis Group, ISBN 978-1-4822-2549-5, 2014
- [SANR87]** Sanferrare, R. S. 1987. Terrestrial lightwave systems. *AT&T Technology Journal* 66: 95–107.
- [SAVO10]** Savory, S.J. "Digital coherent optical receivers: Algorithms and subsystems," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.16, no.5, pp.1164–1179, Sept. 2010.
- [SHEI16]** Sheikh A., Fougstedt C., Amat A. G. i., Johannisson P., Larsson-Edefors P. Karlsson M., "Dispersion Compensation FIR Filter With Improved Robustness to Coefficient Quantization Errors," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 22, pp. 5110-5117, Nov.15, 15 2016.
- [SHEN18]** Shen, G. Zhang, Y. Zhou, X. Sheng, Y. Deng, N. Ma, Y. Lord, A. "Ultra- dense wavelength switched network: a special EON paradigm for metro optical networks" *IEEE Communications magazine: Optical communications*, ISBN: 0163-6804, 2018
- [SCHU16]** Schuh K., Buchali F., W. Idler, Q. Hu, W. Templ, A. Bielik, H. Langenhagen, J. Rupeter, Dümmler U., Ellermeyer T., Schmid R., and Möller M., "100 GSa/s BiCMOS DAC Supporting 400 Gb/s Dual Channel Transmission," *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pp. 37–39, 2016
- [TEMP16]** Temprana, E. Kuo P.B.P. Alic, S., Radic, S. "400Gb/s WDM DP-256-QAM transmission with 50GHz channel separation" *Photonic conference IPC*, ISSN: 1558-2213, 2016

Zoznam publikácií autora

Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

ADE01 ŠALÍK, Pavol [35 %] - ČERTÍK, Filip - RÓKA, Rastislav. Duobinary modulation format in optical communication systems. In *Advances in Signal Processing*. Vol. 3, No. 1 (2015), s. 1-7. ISSN 2332-6883. Projekt: 039STU-4/2013 106.
Citované v :

1. Jadon, U. Nain, H. and Mishra, V., "Analysis of duo-binary modulation scheme in single channel on the basis of BER," *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, Bangalore, 2016, pp. 40-42.
2. Qamar , F. M. Islam, K. S. Ali Shah, Z. Farhan, R. and Ali, M. "Secure Duobinary Signal Transmission in Optical Communication Networks for High Performance & Reliability," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 17795-17802, 2017.
3. Singh, K.; Kaur, H. .“Comparative Analysis of Various Optical Filters for Suppression of Four-Wave Mixing effect“. *Programmable Device Circuits and Systems*, [S.l.], v. 8, n. 6, p. 151-155, Jul. 2016. ISSN 0974 – 9624.
4. Bobrovs, V. “ Parametrisko un kombinēto pastiprinātāju pielietojuma izpēte wdm sakaru sistēmās“ in *Riga technical university faculty of electronics and telecommunications Doctora Thesis*, Riga, 2015
5. Kaur, J.; Malhotra, J. “Simulative Analysis of WDM System at Different Data Rate Using Different Fibres.“ In *Digital Signal Processing*, [S.l.], v. 8, n. 7, p. 187-192, Aug. 2016. ISSN 0974 – 9594.
6. Ahmed, R. K Mahmood, H. A. "Performance analysis of PAM intensity modulation based on dispersion compensation fiber technique for optical transmission system," *2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences - 3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES)*, DIYALA, Iraq, 2018, pp. 126-130.
7. Kaur, J.; Malhotra, J. “Simulative Analysis of WDM System at Different Data Rate Using Different Fibres.“ In *Digital Signal Processing*, [S.l.], v. 8, n. 7, p. 187-192, Aug. 2016. ISSN 0974 – 9594.
8. Bobrovs, V.; Olonkins, S. Spolitis, S. Porins, J. Ivanovs, G.“Evaluation of parametric and hybrid amplifier applications in wdm transmission systems“ In *Optical fiber and wirelles communications INTECH open science publishing*, [S.l.], v. 8, n. 7, p. 187-192, Aug. 2016. ISSN 0974 – 9594.
9. Kaler, R.S.;“ Perfomance analysis and compensation of polarization effect in fiber otpics communication systems“ In *Electronics and communication engineering department*, Dissertation tehsis, Thapar university Patiala

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

- ADM01 RÓKA, Rastislav - ŠALÍK, Pavol [50 %]. Impact of environmental influences on multilevel modulation formats at the signal transmission in the optical transmission medium. In *International Journal of Communication Networks and Information Security*. Vol. 9, No. 1 (2017), s. 76-87. ISSN 2073-607X. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85017160390. Projekt: 007STU-4/2016 106 ; 1/0462/17 113.
- ADM02 RÓKA, Rastislav - MOKRÁŇ, Martin - ŠALÍK, Pavol [20 %]. 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. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85029037975. Projekt: 007STU-4/2016 106 ; 1/0462/17 113.
- ADM03 ŠALÍK, Pavol [50%] – RÓKA, Rastislav. Analysis and simulation of dynamic properties for the DFB laser. In *Przegląd elektrotechniczny*. Prijaté pre publikovanie
- ADM04 ŠALÍK, Pavol [50%] – RÓKA, Rastislav. Analysis of PM – 16QAM modulation in the platform for optical transmission system In *Elektronika ir Elektrotechnika* impact factor 0.859 – v procese revízie

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 ČUČKA, Milan - ŠALÍK, Pavol [50 %]. Simulation and measurement of Mach-Zehnder interferometer. In *Student EEICT 2017 : Proceedings of the 23rd conference*. Brno, Czech Republic. April 10, 2017. Brno : University of Technology, 2017, S. 385-389. ISBN 978-80-214-5496-5.
- AFC02 ŠALÍK, Pavol [50 %] - RÓKA, Rastislav. Analysis of possibilities for numerical simulations of continuous wave DFB laser. In *ICUMT 2017 : 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*. Munich, Germany. November 6-8, 2017. Piscataway : IEEE, 2017, S. 215-219. ISBN 978-1-5386-3434-9. V databáze: WOS: 000427948400036. Projekt: 007STU-4/2016 106.
- AFC03 ŠALÍK, Pavol [60%] - RÓKA, Rastislav, TOMÁŠ, Gorazd. Simulation platform of Optical Transmission system in Matlab Simulink. In *International conference of future networks and communication*, 15-18.9 2018 Grand Canaria, prijaté pre publikovanie
- AFC04 ČUČKA, Milan - ŠALÍK, Pavol [30%]- RÓKA Rastislav- GRENNAR, David- MUNSTER, Peter-FILKA, Miroslav. Simulation Models of Pulse Generator for OTDR in Matlab and VPIphotonics In *International conference on telecommunications and signal processing*, 4-6 .7 , Atény Grécko prijaté pre publikovanie

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 RÓKA, Rastislav - ŠALÍK, Pavol [50 %]. Numerical simulation of distributed feedback laser. In *ELITECH'17 [elektronický zdroj] : 19th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 24, 2017*. 1. ed. Bratislava : Spektrum 2. STU, 2017, CD-ROM, [5] p. ISBN 978-80-227-4686-1. Projekt: 007STU-4/2016 106.
- AFD02 ŠALÍK, Pavol [60 %] - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip Modulačný formát DUOBINARY v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2013 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác, Bratislava, 23. apríl 2013*. 1. vyd. Bratislava : FEI STU, 2013, s.CD ROM, s. 396-401. ISBN 978-80-227-3909-2.
- AFD03 ŠALÍK, Pavol [40 %] - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip Digitálne modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj] : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014*. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 43-47. ISSN 1335-2547.
- AFD04 ŠALÍK, Pavol [60 %] - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip . Digitálne modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2014 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác, Bratislava, 29. apríl 2014*. 1. vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, s.CD ROM, s. 347-351. ISBN 978-80-227-4154-5.
- AFD05 ŠALÍK, Pavol [35 %] - ČERTÍK, Filip - RÓKA, Rastislav. Analysis of possible utilization of the 16-QAM modulations for 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. 309-313. ISBN 978-80-227-4373-0. Projekt: 039STU-4/2013 106.
- AFD06 ŠALÍK, Pavol [35 %] - ČERTÍK, Filip - RÓKA, Rastislav. Analysis of possible utilization of the 16-QAM modulations for 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. 309-313. ISBN 978-80-227-4373-0.
- AFD07 ŠALÍK, Pavol [60 %] - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip . Digitálne modulácie v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2015 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác, Bratislava, 23. apríl 2015*. 1. vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, s.CD ROM, s. 347-351. ISBN 978-80-227-4335-8.

Riešené výskumné úlohy

- (1) PPMV 1342PS/2017, Advanced techniques of optical signal processing, zodpovedný riešiteľ
Ing. Pavol Šalík
- (2) VEGA 1/0174/16 - Advanced algorithms and methods for new generation optical networks for the IMS and NGN converged infrastructure, zodpovedný riešiteľ prof. Ing. Ivan Baroňák, PhD.
- (3) KEGA No. 007STU-4/2016 “Progressive educational methods in the field of telecommunications multiservice networks, zodpovedný riešiteľ prof. Ing. Ivan Baroňák, PhD.

