

Ing. Filip Čertík

Autoreferát dizertačnej práce

**POKROČILÉ TECHNIKY OPTICKÉHO SPRACOVANIA SIGNÁLOV V OPTICKOM
PRENOSOVOM MÉDIU**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Telekomunikácie
v študijnom odbore 5.2.15 Telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, Máj 2015

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Filip Čertík

Autoreferát dizertačnej práce

**POKROČILÉ TECHNIKY OPTICKÉHO SPRACOVANIA SIGNÁLOV V OPTICKOM
PRENOSOVOM MÉDIU**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

5.2.15 Telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, Máj 2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia
na Ústave telekomunikácií FEI v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Filip Čertík
Ústav telekomunikácií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.
Ústav telekomunikácií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Oponenti:

meno:	prof. Ing. Milan Dado, PhD.
adresa:	Univerzitná 1, 010 26, Žilina
pracovisko:	EF ŽU Žilina
meno:	Ing. Norbert Majer, PhD.
adresa:	Zvolenská cesta 20, 974 05, Banská Bystrica
pracovisko:	Výskumný ústav spojov

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod.

v zasadacej miestnosti ÚT FEI STU v Bratislave,

Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, B-blok, 6.p., miestnosť B602

.....
prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

1.	Úvod	2
2.	Súčasný stav riešenej problematiky	3
2.1	<i>Efektívne využitie prenosovej šírky pásma</i>	3
2.2	<i>Využitie pokročilých modulačných a kódovacích techník</i>	3
3.	Ciele dizertačnej práce	4
4.	Metodika práce a metódy skúmania	5
4.1	<i>Simulácia rozličných techník pokročilého spracovania signálu a viackanálových WDM systémov</i>	5
4.2	<i>Simulácia negatívnych vplyvov v prostredí jednomódového optického vlákna</i>	9
4.2.1	Simulácia vplyvu chromatickej disperzie CD	9
4.2.2	Simulácia vplyvu polarizačne módovej disperzie PMD	10
4.2.3	Simulácia vplyvu štvorvlnového zmiešavania FWM	11
4.2.4	Simulácia vplyvu vlastnej fázovej modulácie SPM a krížovej fázovej modulácie XPM	12
4.2.5	Simulácia vplyvu Brillounovho a Ramanovho stimulovaného rozptylu	13
5.	Analýza dosiahnutých výsledkov a ich vyhodnotenie	15
5.1	<i>Analýza negatívneho prostredia optického vlákna prostredníctvom simulačného modelu a jeho overenie</i>	15
5.2	<i>Analýza výsledkov v oblasti modulačných techník pre použitie v prostredí optického vlákna</i>	16
5.3	<i>Analýza výsledkov v oblasti kódovacích techník pre použitie v prostredí optického vlákna</i>	18
5.4	<i>Návrh realizácie modulačných a kódovacích techník</i>	20
6.	Pôvodné vedecké prínosy	22

1. Úvod

Od prvého objavu v roku 1970, využitie a požiadavky na optické vlákno vzrástli enormne. Využitie optických vlákien v dnešnej dobe je široké. So vzrastajúcim dátovým tokom cez internet, elektronickým obchodom, počítačovými sieťami, multimédiami, hlasovou prevádzkou, dátami a videom, vzniká potreba takého prenosového média s možnosťou vysporiadania sa s takýmto veľkým množstvom informácií. Optické vlákna, s ich enormnou prenosovou šírkou pásma, sa ukázali byť riešením. Optické prenosové systémy sa pôvodne využívali na prenos cez diaľkové a chrbticové siete, pričom postupne táto technológia preniká cez metropolitné siete až do prístupových sietí. So zvyšujúcimi sa nárokmi, ako sú vyššia prenosová rýchlosť a kapacita systémov, kladenými na optické prenosové systémy je prenos v základnom pásme nedostačujúci. Vytváranie nových optických sietí nemusí byť vždy realizovateľné, či už po ekonomickej stránke, alebo z praktickej stránky (rôzne povolenia). Z tohto dôvodu sa používajú už existujúce optické siete, ktoré pri nízkych prenosových rýchlostiach vykazujú len malé vplyvy znehodnotenia prenosu, ale s narastajúcimi rýchlosťami lineárne a nelineárne javy prenosového prostredia značne zvyšujú svoj negatívny vplyv a vzniká potreba tieto problémy riešiť.

Okrem iných je jednou z vhodných možností je použitie modulácií a kódovacích techník. Rozličné pokročilé modulačné techniky sú schopné prispôbiť signál pre dané prenosové médium tak, aby bol optický systém optimalizovaný a dosahoval vysoké prenosové rýchlosti a veľkú kapacitu. Vhodne zvolené kódovacie techniky umožňujú dekodovať signál pri vyššom šume sieťou a znížiť nároky pre optické prijímače. Vhodná kombinácia modulačných a kódovacích techník by umožnila prenos viacstavových modulácií, ktoré vyžadujú väčší odstup signálu od šumu, a tak zvýšila celkovú prenosovú rýchlosť a kapacitu pre optické prenosové systémy. Pri nasadení vhodnej kombinácie modulačných a kódovacích techník je nutné takýto systém analyzovať. Z tohto dôvodu je dôležité navrhnúť a simulovať pokročilé techniky spracovanie signálu s ohľadom na danú prenosovú cestu, ktorá obsahuje lineárne aj nelineárne vplyvy prostredia optického vlákna. Takáto simulácia umožňuje získať hranice prenosových rýchlostí a dosahu optického systému pre zvolené pokročilé techniky spracovania signálu a pre vytvorenú prenosovú cestu s nastavenými parametrami a jednotlivé výsledky porovnať pred nasadením do reálnej prevádzky.

2. Súčasný stav riešenej problematiky

Od 80-tych rokov 20. storočia, kedy sa uskutočnil prenos 400 Mbit/s signálu pri 1300 nm vlnovej dĺžke cez jednomódové vlákno dlhé 50 km, sa začal rýchly rozvoj optokomunikačných systémov a sietí. Pre zvýšenie dosahu systému sa prešlo na vlnové dĺžky 1550 nm, kde koeficient tlmenia vlákna je nižší ako 0,2 dB/km. V dnešnej dobe neustále sa zvyšujúca požiadavka na kapacitu a prenosové rýchlosti viedla k používaniu rozmanitých technológií pre dosiahnutie uspokojenie novovzniknutých širokopásmových služieb [JIA12, ROH14].

2.1 Efektívne využitie prenosovej šírky pásma

Technológia vlnovodízkového multiplexu WDM je prostriedkom pre zväčšenie prenosovej kapacity systému, ktorý umožňuje využitie rozličných pokročilých techník spracovania optických signálov. Táto technológia je realizovaná pridaním optických zdrojov s rôznymi vlnovými dĺžkami v rozličných uzloch siete kruhovej a stromovej topológie použitím rekonfigurovateľného add-drop multiplexora ROADM. Dnešný trend vedie k znižovaniu nákladov na bit/s/Hz, čo priamo vedie k potrebe vyššej rýchlosti príslušných optických prenosových rozhraní. Všetky diaľkové optické prenosové systémy s prenosovou rýchlosťou 100 Gbit/s na kanál, či už vo vývoji alebo nasadené, sú založené na namodulovaní polarizačne multiplexovaného QPSK (PDM-QPSK) kľúčovania na jednu nosnú frekvenciu (vlnovú dĺžku) pri použití koherentnej detekcie spojenú s digitálnym spracovaním signálu. Dosiahnutá spektrálna účinnosť je 2 bity/s/Hz cez konvenčnú 50 GHz optickú mriežku, kde celková kapacita systému je 10 TB/s pri prenose cez vlnové dĺžky spadajúce do okna C [ESS10]. Jedným z možných riešení zvýšenia kapacity takýchto systémov je použitie viac optických nosičov nazývaných superkanály a prekonať tak obmedzenie šírky pásma a rýchlostí optoelektronických komponentov prostredníctvom ultra hustého WDM (UDWDM) využitím 100/200 Gbit/s kanálov. Experimentálne výsledky uvedené v práci [CHA09] demonštrujú prenos jedného superkanála pri využití PDM-QPSK formátu na 7000 km. Pri návrhu a realizovaní technológií WDM však treba uvažovať s vplyvmi prostredia optického vlákna, ktoré obmedzujú ich dosah a počet použitých kanálov [FUK01]. Celkový výkon vložený do optického vlákna je väčšinou obmedzený hranicou Stimulovaného Ramanovho rozptylu, ktorý pri prekročení určitej hraničnej výkonovej úrovni preniesie značnú časť výkonu medzi kanálmi. Ďalším nepriaznivý vplyv obmedzujúci vzdialenosti a výkony medzi jednotlivými kanálmi je vplyv FWM, ktorý priamo ovplyvňuje susedné kanály [TAG96].

2.2 Využitie pokročilých modulačných a kódovacích techník

Jedným z ďalších možných riešení pre zníženie nákladov na informačný bit je zvýšenie prenosových rýchlostí na prenosový kanál. Využitím viacstavových modulácií (8PSK, 16QAM, 32QAM) je možné zvýšiť prenosovú rýchlosť systémov na 100 Gbit/s a viac na jeden kanál. Tieto viacstavové modulácie však majú nižšiu odolnosť voči šumu generovaným prostredím optického vlákna, a ich odolnosť klesá s počtom stavov modulácie [OLM13, WIN06]. Pre využitie viacstavových modulácií je nutné zabezpečiť v sieti nasledujúce požiadavky:

- nízku stratovosť optického výkonu signálu v optických komponentov siete (zahrňujúci prenosové vlákno, disperziu kompenzujúce zariadenia a optické prepínače a smerovače v sieti) pre minimalizovanie nutnosti optického zosilnenia a vloženia šumu spojenú so zosilnením
- nízkošumové optické zosilňovače (ako EDFA a Ramanove zosilňovače) pre zníženie znásobovania šumu cez jednotlivé zosilňovače
- pokročilé optické vlákna redukujúce nelineárne vplyvy pôsobiace na signál a umožňujúce zvýšenie vloženého výkonu vo vlákne

Pre zabezpečenie prenosu cez kanál s vysokou chybovosťou BER je možné použiť doprednú opravu chýb FEC, ktorá znižuje požiadavky optického odstupu signálu-šumu OSNR v optických prijímačoch. V súčasnosti sa experimentuje a uvažuje o nasadení Turbo a LDPC kódov, ktoré dosahujú oproti RS kódom zlepšenie BER až o 2,5 do 3 dB [DJO07, RAH15]. Výber vhodnej kombinácie modulačnej a kódovacej techniky umožňuje zvýšenie prenosovej rýchlosti na kanál a pri využití technológie WDM sa kapacita takto navrhnutého optického systému pohybuje okolo 1,28 Tbit/s na vzdialenosti od 1000 až 2000 km optického vlákna [OUC06, DJO07, RAH15, OUC06].

3. Ciele dizertačnej práce

Vzhľadom na uvedený prehľad súčasného stavu riešenej problematiky je zrejmé, že zvyšujúce nároky na prenosovú rýchlosť a kapacitu nových, alebo už nasadených optických systémov majú za následok použitie nových často drahých technológií. Tento dôvod vedie k hľadaniu nových možných riešení, ktoré sú cenovo dostupné a technicky jednoducho realizovateľné. Jedným z vhodných riešení je využitie viacstavových modulácií s vhodnou opravou chýb. Takéto riešenie zvýši prenosové rýchlosti a kapacitu na už vybudovaných optických prenosových systémoch a zníži chybovosť dát. Hlavným cieľom dizertačnej práce bude nájsť optimálne spojenie modulácie a kódu na opravu chýb z hľadiska dĺžky vlákna a prenosovej rýchlosti 40 Gbit/s, 100 Gbit/s a viac pri prenose cez diaľkové siete a použitia jednomódových vlákien.

Na základe získaných poznatkov v danej problematike formulujem ciele dizertačnej práce do nasledovných téz:

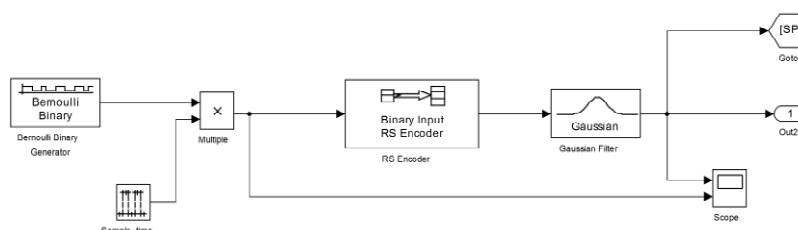
1. Vytvorenie simulačného modelu pre lineárne a nelineárne vplyvy optického prenosového média v programe Matlab Simulink a porovnanie výstupných parametrov signálu pomocou BER a diagramov oka s výsledkami iných publikovaných prác,
2. Rozšírenie vytvoreného simulačného modelu o existujúce a nové viacstavové modulačné techniky pre optické prostredie,
3. Návrh a implementácia techniky doprednej opravy chýb FEC do vytvoreného simulačného modelu,
4. Implementovanie techník iných opravných kódov,
5. Analýza výsledkov simulácie a ich porovnanie s výsledkami iných publikovaných prác,
6. Návrh realizácie navrhovaných modulačných a kódovacích techník v reálnych optokomunikačných systémoch a sieťach.

4. Metodika práce a metódy skúmania

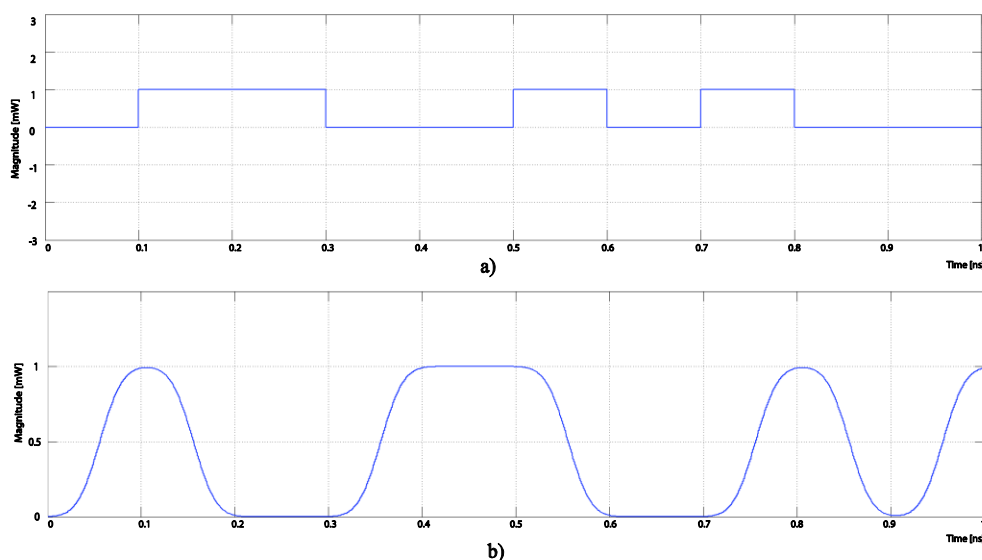
Cieľom dizertačnej práce je návrh, realizácia a vyhodnotenie rozličných modulačných a kódovacích techník v optickom prenosovom médiu. Prvým krokom je vytvorenie simulačného modelu, ktorý umožňuje meniť parametre prostredia optického vlákna. Vytvorený simulačný program simulujúci optické prenosové médium je uskutočňovaný v prostredí Matlab Simulink 2014a a Matlab GUI. Matlab GUI je vytvorený z dôvodu jednoduchšieho vkladania parametrov optického vlákna, na základe ktorých sú vypočítané lineárne a nelineárne vplyvy optického vlákna. Program môže byť dimenzovaný na prenosové rýchlosti 1 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s a 100Gbit/s na jeden prenosový kanál.

4.1 Simulácia rozličných techník pokročilého spracovania signálu a viackanálových WDM systémov

Prvým krokom k prenosu dát cez optické prenosové médium je generovanie náhodných bitových postupností. Bernoulliho generátor je použitý ako zdroj signálu, ktorý generuje logickú "1" a logickú "0". Ako náhradný zdroj môže byť použitý generátor náhodných celých čísel. Na zaistenie funkčnosti generátora, musia byť vložené vstupné parametre ako pravdepodobnosť nuly a prenosová rýchlosť. Schéma generátora je zobrazená na obr. 4.1. Kompletná schéma generátora zahŕňa Bernoulliho generátor, ktorý generuje ideálny pravouhlý signál obsahujúci len reálnu zložku, diskretný generátor na určenie typu modulačného formátu signálu pre 1 bit, blokový kód na zakódovanie generovanej postupnosti bloku dát a Gaussov filter, ktorý mení ideálny pravouhlý signál na Gaussov signál. Schéma generátora náhodných bitov obsahuje blok RS encoder, ktorý zakóduje postupnosť bitov zvoleným RS kódom. Tento blok je nahraditeľný inými blokovými kódmi, ktoré sú pred vytvorené v Matlab Simulink 2014. Výstupné NRZ signály z Bernoulliho generátora a z Gaussovho filtra sú zobrazené na obr. 4.2.



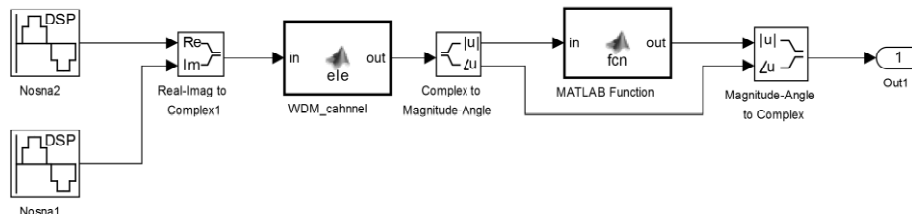
Obr. 4.1. Schéma generátora náhodných bitov



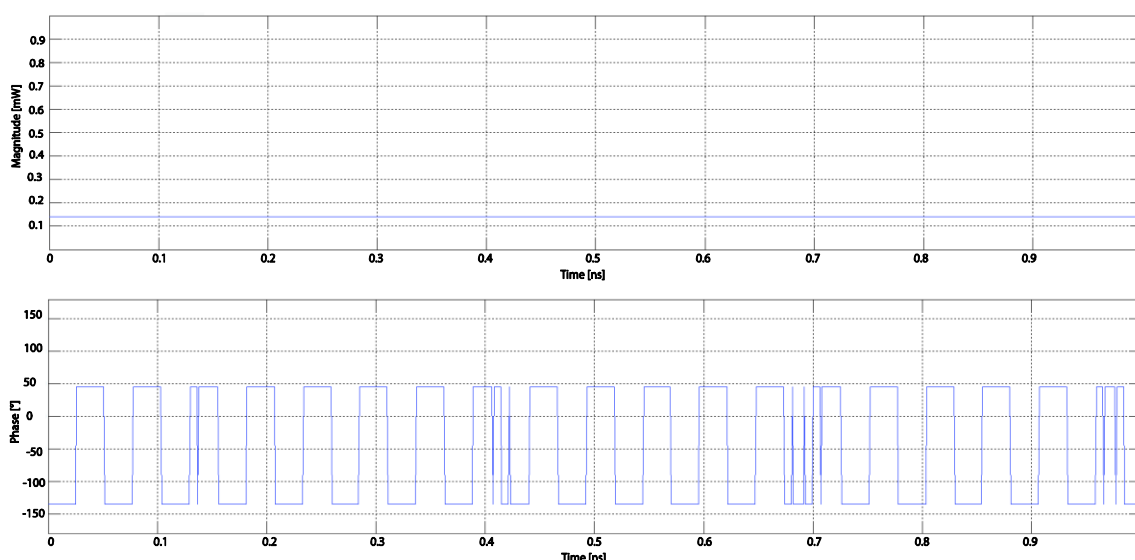
Obr. 4.2. Výstupný NRZ signál z a) Bernoulliho generátora b) Gaussovho filtra

Existuje niekoľko možností pre konverziu elektrického signálu na optický modulovaný signál. V minulosti sa využívala priama modulácia optického signálu, kde laserová dióda bola priamo riadená elektrickým signálom. Takto generovaný signál obsahoval amplitúdový a fázový šum, čo znemožňovalo použitie fázového kľúčovania. Optické systémy s priamou moduláciou boli nízko nákladne vďaka

priamej detekcii signálu, avšak limit takýchto optických prenosových systémov je do 10 Gbit/s z dôvodu CD. Ďalšou možnosťou modulovania signálu je ovplyvňovanie spojitej vlny CW z optického zdroja elektrickým signálom pomocou optického modulátora. Po analýze dostupných modulátorov sme sa v práci zamerali na modulovanie signálov pomocou MZM modulátora. Spojitú postupujúcu vlnu simulujem ako lineárne polarizovanú vlnu pozostávajúcu z dvoch polarizovaných módov elektrického a magnetického poľa, ktoré sú komplexné a navzájom ortogonálne. Schéma pre vytvorenie komplexnej spojitej vlny je zobrazená na obr. 4.3 a výstupný priebeh je zobrazený na obr. 4.4.

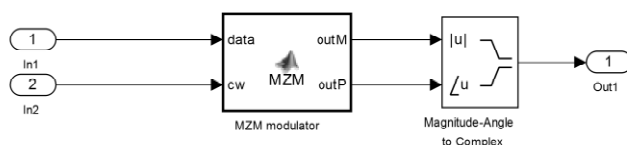


Obr. 4.3. Schéma generovania postupujúcej spojitej vlny

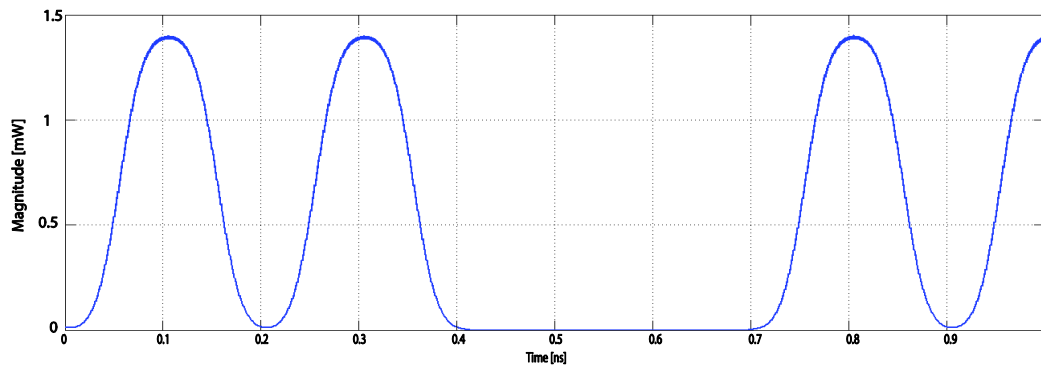


Obr. 4.4. Priebeh postupujúcej spojitej vlny

Po vygenerovaní vstupujú informácie dáta spolu s postupujúcou vlnou CW do MZM, kde ovplyvňujú spojité vlnenie v závislosti od zvolenej modulačnej techniky. Simulácia využíva fyzikálny princíp MZM, ktorý je založený na interakcii dvoch polarizovaných vln (interferencii a deštrukcii vln). V prípade signálu OOK sa na vstup MZM privedú dve rovnako polarizované vlny. V tomto prípade pri nenulovej vstupnej hodnote elektrického dátového signálu dochádza k interferencii optických vln, ktorá vytvára novú vlnu šíriacu sa v smere z. Pri absencii elektrického dátového signálu dochádza k deštruktívnemu stavu optických vln, čo má za následok nulový signál. Schéma modulátora MZM je zobrazená na obr. 4.5 a signál modulovaný OOK kľúčovaním je zobrazený na obr. 4.6.



Obr. 4.5. Schéma MZM modulátora



Obr. 4.6. Priebeh signálu modulovaného OOK kľúčovaním

V optických prenosových systémoch sa často využíva menej náročné Diferenciálne BPSK kľúčovanie, ktoré umožňuje jednoduchú detekciu signálu. Pri BPSK kľúčovaní je dátový signál daný hodnotou fázy daného bitu a pri DBPSK je dátový signál určený rozdielom fázy bitu s fázou predchádzajúceho bitu. Schéma generovania dátového elektrického signálu pre DBPSK je oproti generovaniu BPSK doplnená o blok časového oneskorenia a blok vykonávajúci XOR operáciu. Na výslednom bite spolu s predchádzajúcim bitom je vykonaná operácia XOR, čo zabezpečí zakódovanie informácie do rozdielu fázy. Následne je takýto dátový signál privedený do modulátora MZM, kde dochádza k elektro-optickej konverzii ako pri BPSK. Binárne kľúčovanie dosahuje svoje limity pri dátových rýchlostiach do 10 Gbit/s na jeden kanál. Tento limit vedie k upriameniu pozornosti na iné modulačné techniky ako modulácia Duobinary, ktorá predstavuje spojenie medzi amplitúdovou a fázovou moduláciou. Jednou z výhod modulácie je vyslanie polovičnej šírky pásma na jeden bit a odstránenie vplyvu ISI.

Binárne frekvenčné kľúčovanie BFSK je ďalšou možnosťou pre prenos informácie. Na vytvorenie signálu s kľúčovaním BFSK je potrebné priviesť dva dátové signály do modulátorov MZM, do ktorých vstupujú dve spojité optické vlny CW z dvoch nezávislých optických laserov. Vytvorenie kľúčovania BFSK je podobné ako pri kľúčovaní OOK, no v prípade absencie signálu sa vysiela signál s inou frekvenciou.

Viacstavové kľúčovanie ako napríklad QPSK, 8PSK a 16QAM vysielajú niekoľko bitov na symbol a teda predstavujú možné zvýšenie prenosovej rýchlosti a dosahu optických prenosových systémov. Viacstavové kľúčovanie je možné vytvoriť použitím niekoľkých MZM modulátorov. Kľúčovanie QPSK je možné vytvoriť súčtom výstupov z dvoch MZM modulátorov, kde jeden modulátor musí generovať výstupný optický signál s fázovým posunom o π . Kľúčovanie 8PSK a 16QAM sú generované pomocou štyroch MZM modulátorov. Kľúčovanie 8PSK využíva riadenie MZM pomocou troch elektrických dátových postupností a kľúčovanie 16QAM využíva riadenie MZM realizované štyrmi elektrickými dátovými postupnosťami, kde každú postupnosť je možné zakódovať pomocou 10 Gbit/s toku.

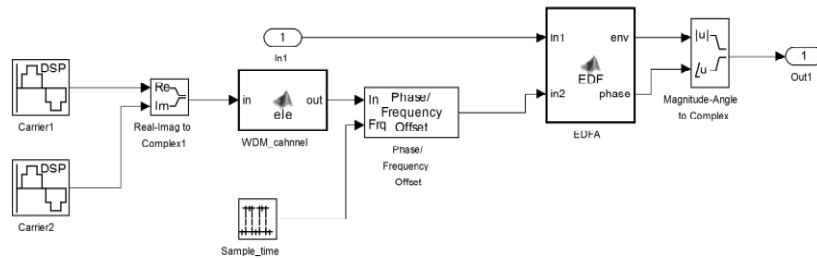
Optické prenosové systémy na dlhé vzdialenosti LH (rádovo 100 -1000 km) používajú techniku WDM multiplexovania pre zvýšenie kapacity systému a efektívnosti prenášania dát. Pre simuláciu DWDM systému je nutné generovať ďalšie optické signály. Návrh simulácie umožňuje zvoliť počet prenášaných signálov v jednom optickom vlákne a zároveň umožňuje zvoliť vzdialenosti medzi jednotlivými kanálmi. Generované signály sú privedené do bloku DWDM Multiplex, kde sú napojené do optického vlákna a prenášajú sa spolu s analyzovaným signálom. Výstupom z DWDM multiplexora je viackanálový komplexný signál, ktorý je prenášaný cez optické vlákno. Výstupný signál po prenose cez optické vlákno je značne skreslený lineárnymi a nelineárnymi vplyvmi a dochádza tu k značnému poklesu optického výkonu vplyvom tlmenia v závislosti od dĺžky vlákna. Pre prenos cez optické vlákno dlhšie ako 50 km je potrebné použiť optické zosilňovače, ktoré zosilnia užitočný optický signál do potrebnej miery, aby bol optický signál detekovateľný v prijímači. Po analýze optických zosilňovačov a zvolených kritérií obsahuje simulačný model dva typy zosilňovačov - EDFA a Ramanov zosilňovač. Zosilňovače EDFA predstavujú jedny z najviac používaných optických zosilňovačov, ktoré sú charakterizované vysokým zosilnením a nízkym šumom a zabezpečujú širokospektrálne zosilnenie v C-okne (~ 1530 nm). Princíp zosilňovačov EDFA spočíva vo vložení optickej vlny s vysokým výkonom

označovanej ako pumpová vlna, najčastejšie pracujúcej na vlnovej dĺžke 980 nm alebo 1450 nm. Na konci optického vlákna sa vkladá erbiom dopované vlákno, ktorého ióny sú vybudené prichádzajúcou pumpovou vlnou do vyššieho energetického stavu, kde dochádza k zosilneniu optického signálu okolo vlnovej dĺžky 1530 nm pomocou stimulovanej emisie, kde sa ióny vracajú do základného stavu. Rovnica popisujúca fyzikálny princíp zosilnenia je daná:

$$P_p = \alpha_p L_{er} P_{sat}(\lambda_p) \frac{1 + \eta_p}{1 + \eta_s} \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{\eta_p - \eta_s}{1 + \eta_s} \alpha_p L_{er}\right)} \quad (4.1)$$

kde α_p predstavuje koeficient tlmenia pre pumpovú vlnu, L_{er} je dĺžka erbiom dopovaného vlákna, $P_{sat}(\lambda_p)$ predstavuje saturovaný výkon pumpovej vlny, η_p a η_s sú pomerové prierezy danej optickej vlny.

Simulácia zosilňovača EDFA pozostáva z generovania pumpovej vlny s vlnovou dĺžkou 1450 nm, bloku frekvenčného posunu na potrebnú vlnovú dĺžku a blokom EDFA, ktorý je opísaný rovnicou (4.1). Výsledná schéma pre EDFA zosilňovač je zobrazená na obr. 4.7.

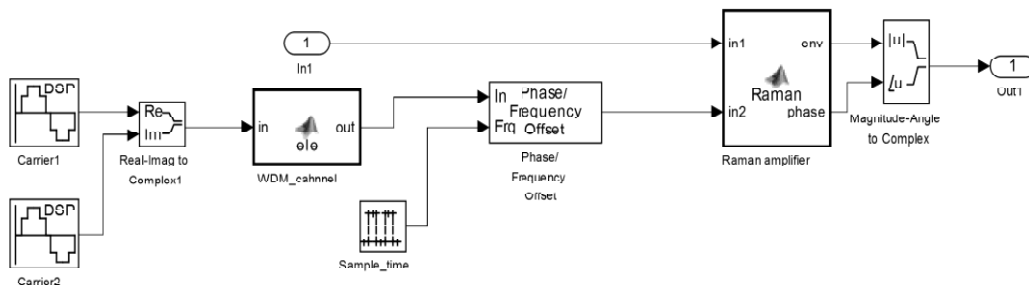


Obr. 4.7. Bloková schéma EDFA zosilňovača

Ramanov zosilňovač sa používa pri zosilnení na veľké vzdialenosti so širokým spektrálnym zosilnením. Ramanove zosilňovače sa často používajú v kombinácii s EDFA zosilňovačmi pre dosiahnutie efektívneho zosilnenia pri generovaní nízkeho šumu. Ramanove zosilňovače fungujú na princípe stimulovaného Ramanovho rozptylu, kde časť výkonu pumpovej optickej vlny prenesie na užitočný signál. Simulácia Ramanovho zosilňovača pozostáva z generovania pumpovej vlny, bloku frekvenčného posunu na potrebnú vlnovú dĺžku a blokom Raman amplifier, ktorý je opísaný rovnicou (4.2). Výsledná schéma pre Ramanov zosilňovač je zobrazená na obr. 4.8.

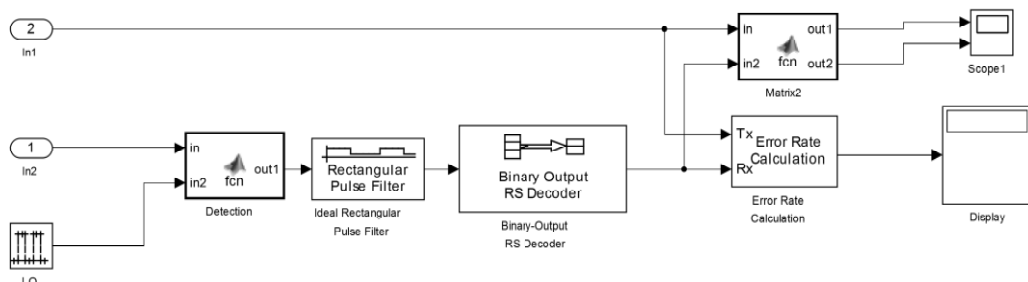
$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{g_r}{A_{eff}} P_p P_s - \alpha_s P_s \quad (4.2)$$

kde P_s predstavuje výkon užitočného optického signálu, P_p predstavuje výkon pumpovej optickej vlny, g_r je Ramanov koeficient zosilnenia, A_{eff} predstavuje efektívnu oblasť vlákna a α_s predstavuje koeficient tlmenia užitočného optického signálu.



Obr. 4.8. Bloková schéma Ramanovho zosilňovača

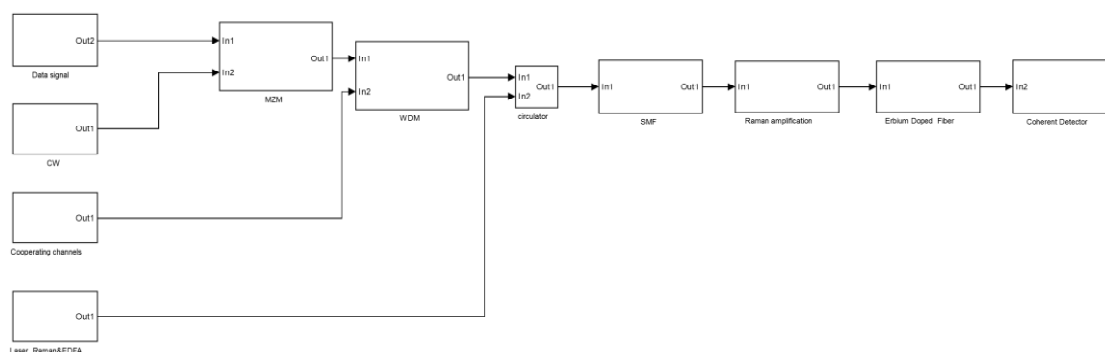
Zosilnený optický signál je následne demodulovaný a prekonvertovaný na elektrický signál, kde je následne porovnávaný s vyslaným signálom pre výpočet parametra BER. Bloková schéma koherentného prijímača je zobrazená na obr. 4.9. Schéma pozostáva z bloku Detection, kde spolu s lokálnym oscilátorom LO umožňuje detekovať amplitúdu a fázu prijatého signálu. Blok Detection obsahuje vlnovodlžkový filter pre výber analyzovaného optického kanálu. Následne je detekovaný signál upravený na pravouhlý signál. Dekóder pre daný kód umožňuje opraviť a detekovať chyby vzniknuté v kanáli. Výsledný demodulovaný a dekódovaný signál je následne porovnávaný s vyslaným signálom. Výsledkom je získanie parametra BER pre daný optický prenosový systém.



Obr. 4.9. Bloková schéma koherentného prijímača

4.2 Simulácia negatívnych vplyvov v prostredí jednomódového optického vlákna

Simulácia prenosu signálov v prostredí jednomódového vlákna pozostáva z niekoľkých vplyvov. Jednotlivé lineárne a nelineárne vplyvy sú vytvorené za použitia vytvorených blokov zo Simulinku, DSP a Communication toolboxov v kombinácii s programovateľnými blokmi Matlab Function blocks. Kompletná schéma optického prenosového systému WDM je zobrazená na obr. 4.10.



Obr. 4.10. Bloková schéma optického prenosového systému WDM

4.2.1 Simulácia vplyvu chromatickej disperzie CD

Na simulovanie chromatickej disperzie sme použili základné bloky z Matlab Simulink a programovateľné bloky. Modulovaný signál vstupujúci do vytvoreného bloku chromatickej disperzie je najprv rozdelený na amplitúdovú a fázovú zložku. Amplitúdová zložka signálu je oneskorená o príslušné rozšírenie a následne spojená s originálnym signálom. Rovnica popisujúca celkové rozšírenie je daná:

$$D_{CD} = \frac{\Delta\tau_{CD}}{L} \left[\frac{ps}{nm.km} \right] \quad (4.3)$$

kde D_{CD} predstavuje koeficient CD udávaný výrobcom optického vlákna, L je celková dĺžka vlákna a $\Delta\tau_{CD}$ je celkové rozšírenie optického signálu vplyvom CD.

Takýto signál je tlmený z dôvodu zachovania energie na príslušnú úroveň. Takýto signál je spojený s pôvodnou fázou a tento komplexný signál je privedený do bloku, ktorý mení fázu komplexného signálu, ktorá je daná rovnicami [JAM05, RAS12]:

(4.4)

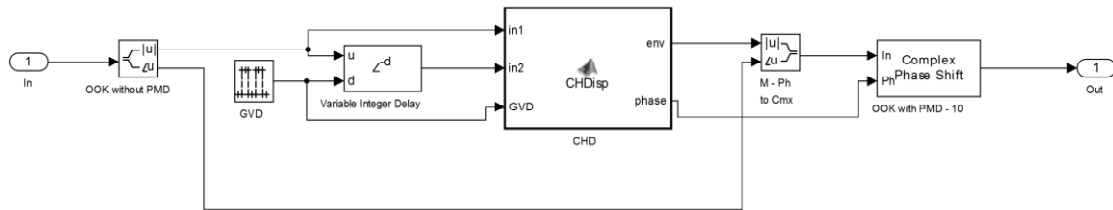
$$t = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi}{df_m}$$

(4.5)

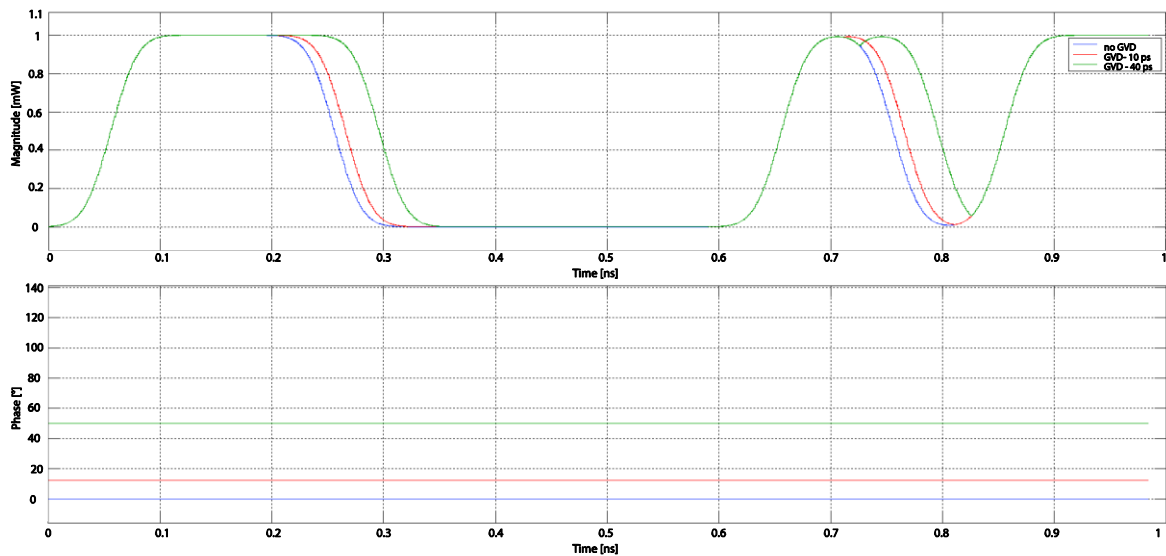
$$GVD = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\Phi}{df_m^2}$$

kde t predstavuje čas, ktorý je potrebný na prechod optického impulzu cez daný optický prenosový systém, fázový posun signálu $\Delta\Phi$ a koeficient skupinovej rýchlosti disperzie GVD (Group Velocity Dispersion).

Bloková schéma chromatickej disperzie je znázornená na obr. 4.11 a príslušný priebeh signálu pre OOK kľúčovanie je zobrazené na obr. 4.12.



Obr. 4.11. Bloková schéma na generovanie vplyvu CD



Obr. 4.12. Vplyv CD na signál modulovaný kľúčovaním OOK

4.2.2

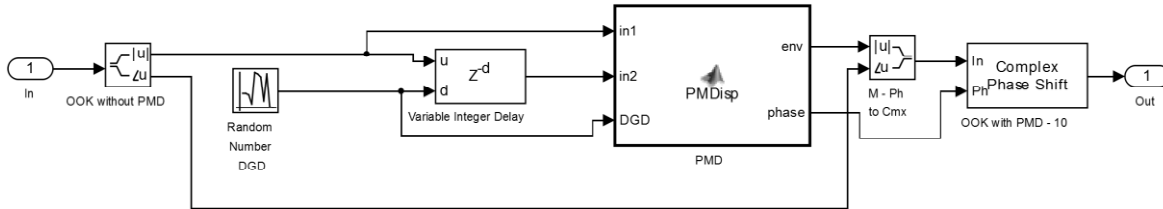
Simulácia vplyvu polarizačne módovej disperzie PMD

Blok PMD rozširuje pôvodný signál v časovej oblasti a v dôsledku čoho nastáva fázový posun signálu. Blokovaná schéma pre simulovanie vplyvu PMD je zobrazená na obr. 4.13. Blokovaná schéma PMD obsahuje diskretný dynamický generátor s normálnym rozdelením pre generovanie dynamického parametra diferenciálneho skupinového oneskorenia DGD (Differential Group Delay) charakterizujúceho PMD. Tento signál s hodnotou DGD vstupuje do premenlivého bloku oneskorenia spolu s modulovaným signálom, kde je modulovaný signál oneskorený o hodnotu DGD . Takýto modulovaný oneskorený signál je spolu s modulovaným signálom bez oneskorenia privedený do bloku $disp_plane$, ktorý tieto dva signály prekryje. Výstupný modulovaný signál vstúpi do bloku $disp_loss$, v ktorom je tlmený príslušnou hodnotou tak, aby vyhovoval zákonu zachovania energie a výsledne rozšírenie signálu je dane rovnicou:

$$D_{PMD} = \frac{\Delta\tau_{PMD}}{L} \left[\frac{ps}{\sqrt{km}} \right]$$

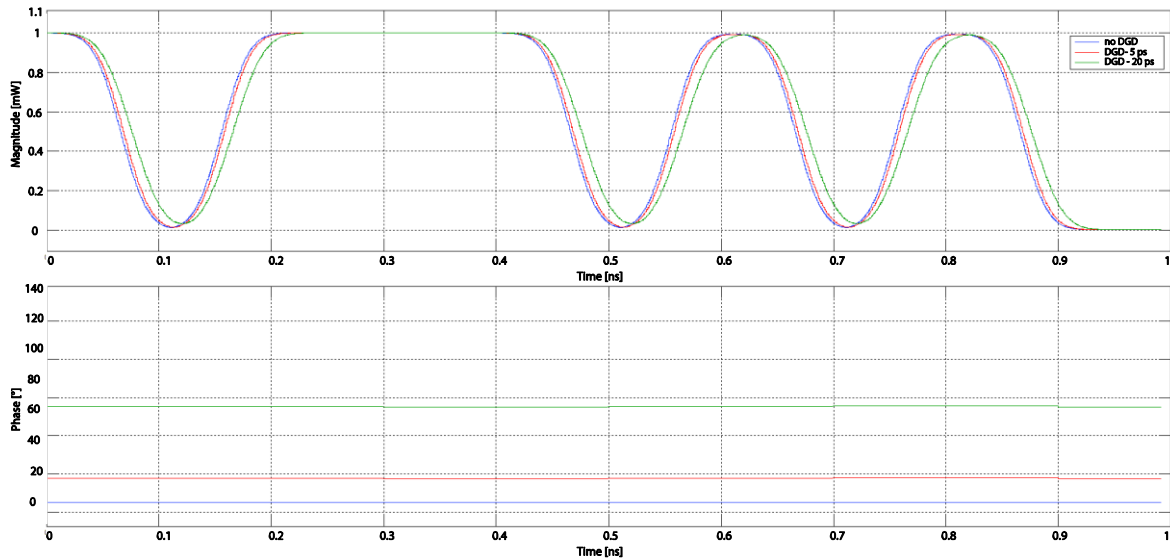
kde D_{PMD} predstavuje koeficient PMD udávaný výrobcom optického vlákna, L je celková dĺžka vlákna a $\Delta\tau_{PMD}$ je celkové rozšírenie optického signálu vplyvom PMD.

Výstupný rozšírený signál je následne privedený do bloku fázového posunu, kde sa mení fáza signálu. Fázový posun je daný rovnicou (4.5). Jednotlivé hodnoty príslušných blokov sú vypočítané na začiatku simulácie.



Obr. 4.13. Bloková schéma na generovanie vplyvu PMD

Pred detekciou optického signálu je možné kompenzovať vplyv CD použitím vlákna kompenzujúceho disperziu DCF (Dispersion Compensating Fiber). Vlákno DCF má záporný koeficient CD rovný okolo -100 ± 10 ps/(nm.km). Vhodne zaradené DCF vlákno umožňuje potlačiť CD na 10 ps pri prenose cez vlákno s dĺžkou 100 km. Táto hodnota predstavuje hranicu, kedy systém dosahuje chybovosť, pri ktorej je možné vyslať. Väčšina chýb v tomto prípade je spôsobená vplyvom PMD, ktorá v určitých časových intervaloch rozširuje signál nad povolený limit ako to znázorňuje obr. 4.14.



Obr. 4.14. Vplyv PMD na signál modulovaný kľúčovaním OOK

4.2.3 Simulácia vplyvu štvorvlnového zmiešavania FWM

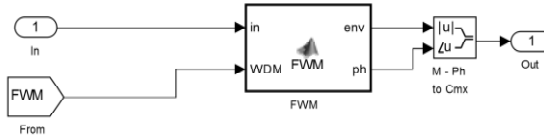
Vplyv FWM sa vyskytuje len v prenosových systémoch WDM, a preto musíme generovať ďalšie optické signály s rovnakou modulačnou technikou na odlišnej vlnovej dĺžke. Pri FWM uvažujeme, že najbližších šesť kanálov ovplyvňuje prenášaný dátový signál [AJM15]. Tieto modulované signály sú zmiešané (v bloku FWM) pomocou bloku SUM a dávajú vznik novej vygenerovanej optickej vlny s adekvátnou amplitúdou, ktorá je vypočítaná na základe rovnice:

(4.7)

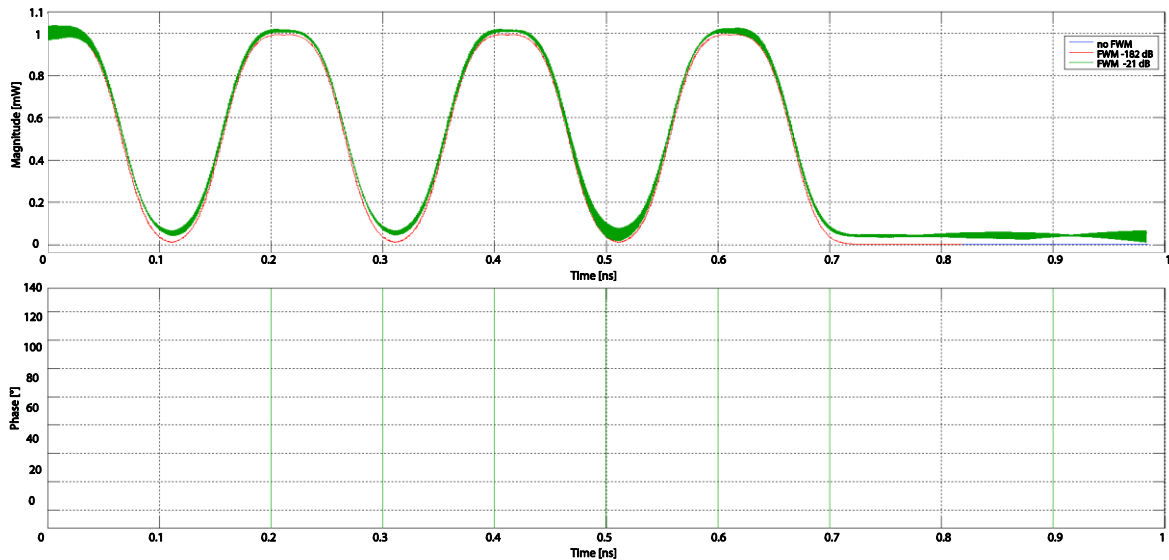
$$A_k^2 = 4\eta\gamma^2 d_e^2 L_{eff}^2 A_1^2 A_2^2 A_3^2 e^{-\alpha L}$$

kde faktor η predstavuje efektívnosť FWM, γ je nelineárny koeficient, L_{eff} je efektívna dĺžka vlákna, $A_1^2(z)$, $A_2^2(z)$, $A_3^2(z)$ sú výkony vstupných signálov, L je dĺžka vlákna, α predstavuje špecifické tlmenie a d_e je takzvaný degeneračný faktor (rovný trom ak sa jedná o degeneratívne FWM, inak je rovný šiestim) [KAH05].

Táto štvrtá vlna interferuje s prenášanými signálmi, ak sú splnené zodpovedajúce fázové podmienky. Bloková schéma FWM je zobrazená na obr. 4.15. Vplyv FWM v systémoch WDM hlavne závisí od výkonu optických signálov, disperzie a tlmenia, a z tohto dôvodu je na obr. 4.16 zobrazený vplyv FWM na systém s prenosovou rýchlosťou 10 Gbit/s.



Obr. 4.15. Bloková schéma pre generovanie vplyvu FWM



Obr. 4.16. Vplyv FWM na signál modulovaný kľúčovaním OOK

4.2.4

Simulácia vplyvu vlastnej fázovej modulácie SPM a krížovej fázovej modulácie XPM

Vplyv SPM predstavuje zmenu fázy a frekvencie vplyvom vlastnej zmeny intenzity signálu, takže sa vyskytuje aj pri jednokanálovom prenose. Vplyv XPM mení fázu a frekvenciu signálu na základe zmeny intenzít zo susedných signálov. Na simulovanie bloku SPM&XPM je použitá rovnica (4.8), ktorá vyjadruje celkovú zmenu fázy signálu vplyvom SPM a XPM. Na obr. 4.17 je zobrazená bloková schéma SPM a XPM vplyvu. Do bloku SPM&XPM vstupuje celkovo 80 kanálov, ktoré menia výslednú fázu skúmaného signálu. Výsledná intenzita je následne zderivovaná, pre získanie frekvenčného posunu. Táto hodnota je privedená do bloku zmeny frekvencie, ktorá mení frekvenciu signálu na základe rovnice (4.9) [HIC10]. Vplyv SPM a XPM na OOK signál je znázornený na obr. 4.18.

(4.8)

$$\Delta\phi_i = \frac{2\pi n_2 L}{\lambda} \left[I_i(t) + 2 \sum_{i \neq j} I_j(t) \right]$$

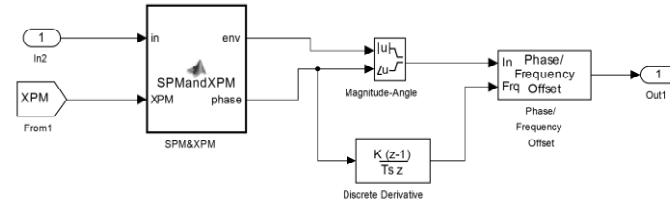
kde $\Delta\phi_i$ predstavuje fázový posun signálu, n_2 je nelineárny index lomu, $I_i(t)$ predstavuje intenzitu prenášaného signálu, $I_j(t)$ predstavuje intenzitu signálu susedných kanálov, L je dĺžka optického vlákna a λ je vlnová dĺžka prenášaného signálu. Prvá časť zátvorky reprezentuje zmenu fázy vplyvom SPM a druhá časť zátvorky reprezentuje vplyv XPM. Faktor 2 v rovnici (4.8) má svoj pôvod v nelineárnej susceptibilite a vyjadruje dvojnásobnú efektívnosť vplyvu XPM oproti vplyvu SPM pri rovnakej

intenzite signálu. Ovpływňovanie signálu vplyvom XPM nastáva len v prípade, ak sa interagujúce signály prekrývajú v čase. Vplyv XPM môže znížiť vlastnosti systému oveľa viac ako vplyv SPM, hlavne v prípade ak sa používa systém s viac ako 100 kanálmi.

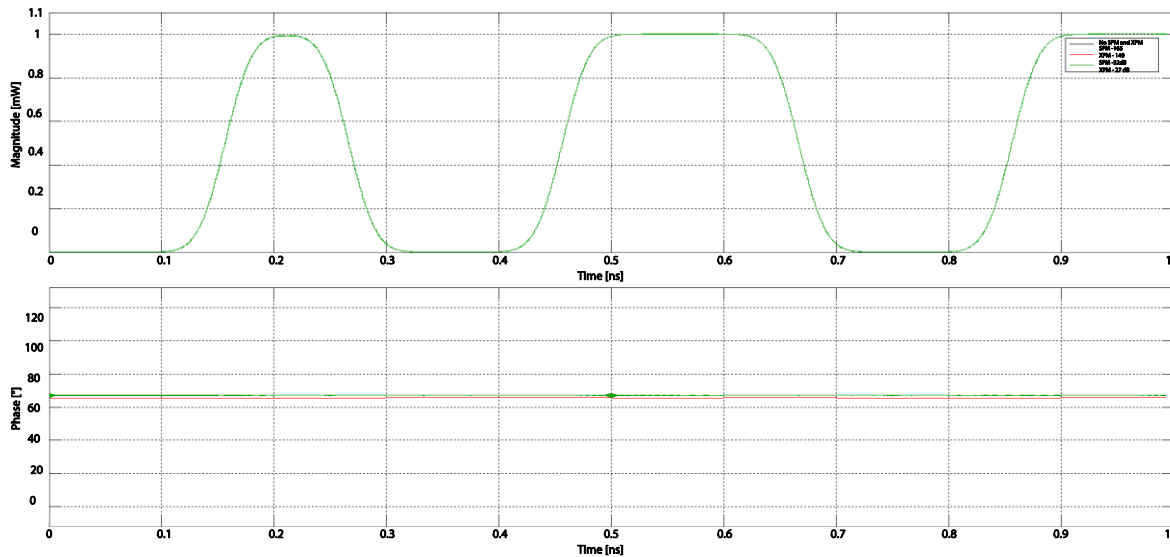
(4.9)

$$\omega = \frac{d\phi}{dt}$$

kde ω reprezentuje celkovú frekvenciu signálu v závislosti od zmeny fázy prenášaného signálu Φ .



Obr. 4.17. Bloková schéma pre generovanie vplyvov SPM a XPM



Obr. 4.18. Vplyv SPM a XPM na signál modulovaný kľúčovaním OOK

4.2.5

Simulácia vplyvu Brillounovho a Ramanovho stimulovaného rozptylu

Vplyvy SBS a SRS ovplyvňujú intenzitu signálov. Pri SBS sa zmení frekvencia niekoľkých fotónov signálu vplyvom akustickej vlny, čo má za dôsledok interferenciu s prenášaným signálom. Novovytvorená vlna sa šíri výhradne v opačnom smere ako prenášaný signál. Vplyv SRS je podobný ako SBS, pričom šírka pásma SRS je oveľa väčšia ako pri SBS a tak zasahuje väčší počet prenášaných kanálov. SRS sa na rozdiel od SBS dokáže šíriť aj v smere prenášaného signálu [YUJ03, AUY03]. Oba tieto vplyvy predstavujú šum. Na simuláciu SBS a SRS sme použili rovnice:

(4.10)

$$-\frac{dI_s}{dz} = +g_B I_p I_s - \alpha_s I_s$$

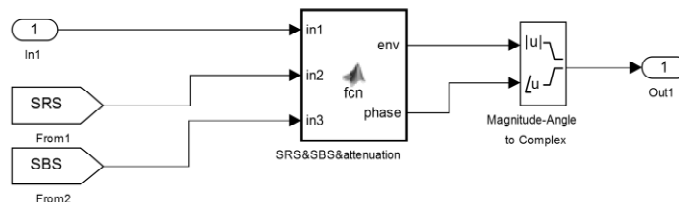
(4.11)

$$-\frac{dI_s}{dz} = +g_R I_p I_s - \alpha_s I_s$$

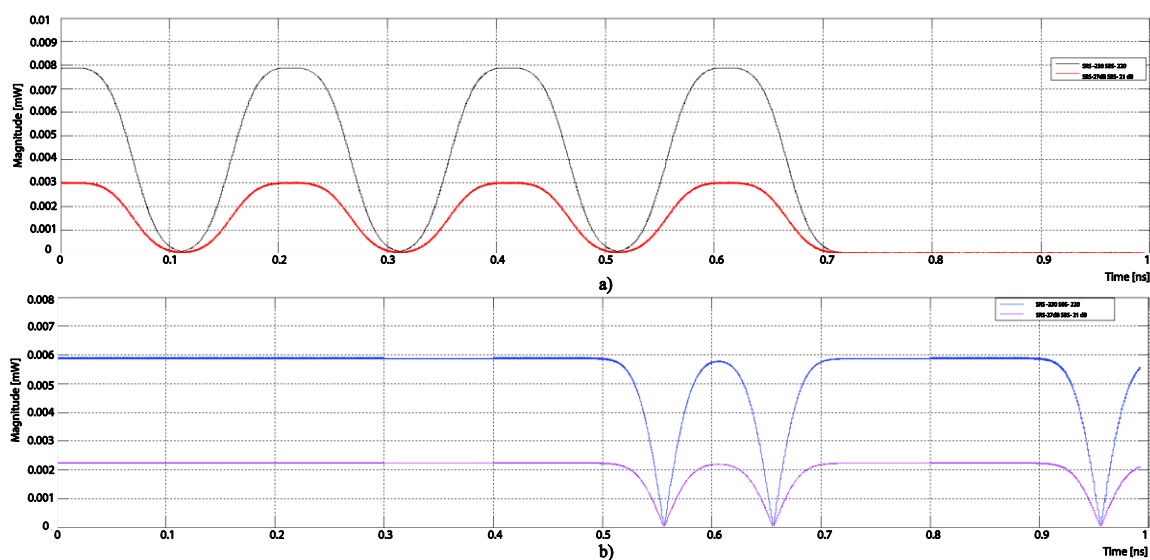
kde I_p je intenzita budiaceho signálu, I_s je intenzita ovplyvňovaného signálu, g_B je Brillouinovo stimulovaný ziskový koeficient, g_R je Ramanov stimulovaný ziskový koeficient, α_s , α_p sú straty signálu

a budiacich vln. Koeficient SBS g_B je závislý od frekvencie s prírastkom šírky pásma okolo 50-100 MHz pre elektrickú vlnu s vlnovou dĺžkou približne 1550 nm.

Výsledná bloková schéma je znázornená na obr. 4.19. Do bloku SBS&SRS privádzame 80 kanálov, ktoré menia intenzitu skúmaného optického signálu. Vplyv SBS, SRS a tlmenia je znázornený na obr 4.20, ktorý zobrazuje vložený šum v amplitúde signálu vplyvom SRS a SBS a pokles výkonu signálu vplyvom tlmenia.



Obr. 4.19. Bloková schéma pre generovanie vplyvov SBS, SRS a tlmenia

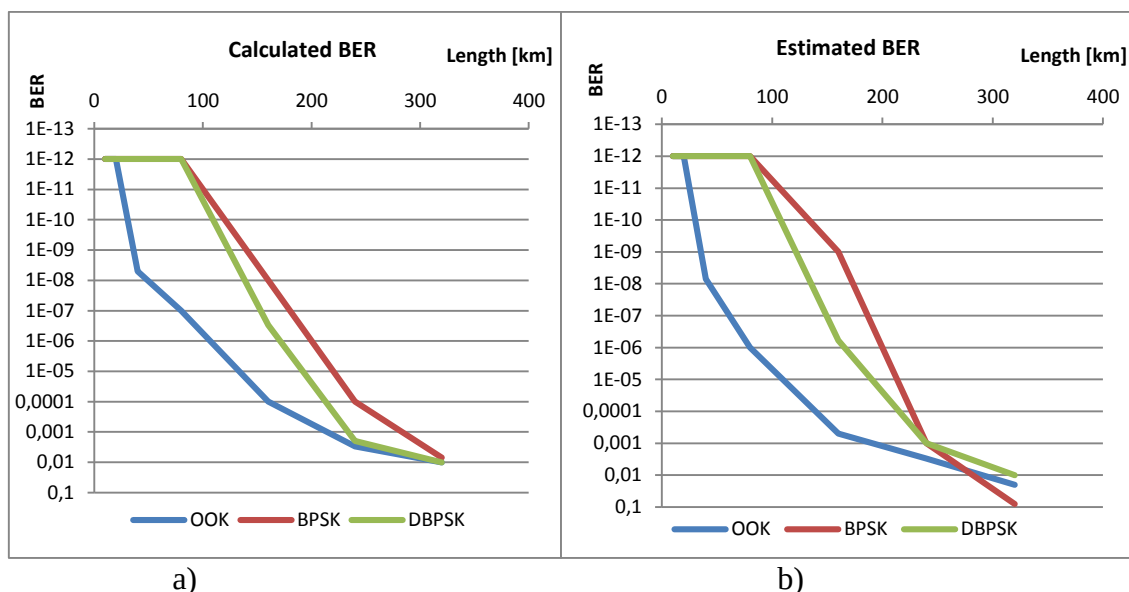


Obr. 4.20. Vplyv SRS, SBS a tlmenia na signál modulovaný OOK kľúčovaním

5. Analýza dosiahnutých výsledkov a ich vyhodnotenie

5.1 Analýza negatívneho prostredia optického vlákna prostredníctvom simulačného modelu a jeho overenie

Pri simulácii známych binárnych modulačných techník je možné overiť simuláciu na základe BER v závislosti od dosahu daných systémov. Pre overenie sme zvolili tri binárne modulácie - OOK, BPSK a DPSK pri 10 Gbit/s systéme. V praxi optické prenosové systémy využívajúce priamu detekciu OOK majú dosah do 50 km bez využitia optických zosilňovačov. Koherentné systémy, ktoré umožňujú potlačiť CD dokážu vysielat' do vzdialenosti 100 km bez použitia optických zosilňovačov, alebo regenerátorov. Na obr. 5.1 sú znázornené jednotlivé BER pre dané modulácie v závislosti od dĺžky vlákna.



Obr. 5.1. a) Vypočítaná BER b) Odhadnutá BER pomocou faktora kvality

Dosah systémov je možné hodnotiť parametrom BER. V optických prenosových systémoch sa systém považuje za funkčný, ak nameraný parameter BER nie je väčší ako 10^{-12} . Na obr. 5.1 sú znázornené simulované a vypočítané parametre BER pre binárne modulácie v závislosti od dĺžky vlákna. Výsledky chybovosti jednotlivých binárnych modulácií sú takmer totožné pre simuláciu aj výpočet. Nekoherentná detekcia OOK signálu má dosah do 50 km, kde BER parameter dosahuje hodnotu 10^{-12} , čo zodpovedá teoretickým poznatkom. V tomto prípade je chybovosť spôsobená CD, ktorá pri koeficiente CD 3,2 ps/nm.km (pre $\lambda = 1310$ nm) dosahovala hodnotu 175 ps, čo prekračuje povolenú hraničnú rozšírenie signálu. Koherentné PSK modulácie nie sú limitované CD a preto dosahujú vyššie vzdialenosti. V tomto prípade sa limitná hranica 100 km zhoduje s teoretickým dosahom koherentných systémov a je zapríčinená vplyvom tlmenia, ktorý limituje výkon prenášaného signálu a teda neschopnosť detekovať signál v prijímači.

Na overenie simulačného modelu sme porovnali dve optické prenosové trasy, ktoré boli namerané v spolupráci s firmou Orange Slovensko. Optická trasa_1 pozostáva z 59,2 km štandardného SM vlákna (ITU-T G.652) využívajúca 10 Gbit/s nekoherentný OOK modulovaný signál s 80 WDM kanálmi. Optická trasa_2 pozostáva z 170,7 km štandardného SM vlákna (ITU-T G.652) využívajúca 10 Gbit/s nekoherentný OOK modulovaný signál s 80 WDM kanálmi. Jednotlivé vysielače sú realizované pomocou MZM modulátora a generovania spojitej vlny CW pomocou CW-DFB (Distributed FeedBack) lasera. Výkon 1mW a vložený amplitúdový šum 4 dB sú generované CW-DFB, pričom fázový šum je potlačený. Pre overenie simulácie analyzujeme vyslaný optický signál s frekvenciou 193,4 THz. Optické prenosové cesty využívajú EDFA zosilňovače, kde pred detekciou signálu je zaradené erbiom dopované vlákno, čo umožňuje zosilnenie optického signálu pred jeho detekciou. Optická trasa_1 využíva len jeden EDFA zosilňovač a optická trasa_2 používa celkovo štyri EDFA zosilňovače umiestnené každých 40 km. Funkčnosť jednotlivých optických trás bola overená simuláciou a výpočtom parametra BER. Výsledky

simulácie pre jednotlivé optické trasy ukazujú parameter BER väčší ako 10^{-12} , a teda vyhovujú podmienkam pre prenos. Úspešnosť splnenia podmienok pre prenos je dosiahnutá použitím kódu RS (255,239).

Tab. 5.1: Parametre optickej trasy_1

Parametre	Namerané	Simulované
Rx power (dBm)	-13,69	-12,3
OSNR	21,07	20,9
PMD (ps)	1,74	1,83
SPM (dB)	1,03	1,1
XPM (dB)	-42,02	-40,5
FWM (dB)	N/A	-112
Q	6,27	6,2
BER	$>10^{-15}$	$>10^{-12}$

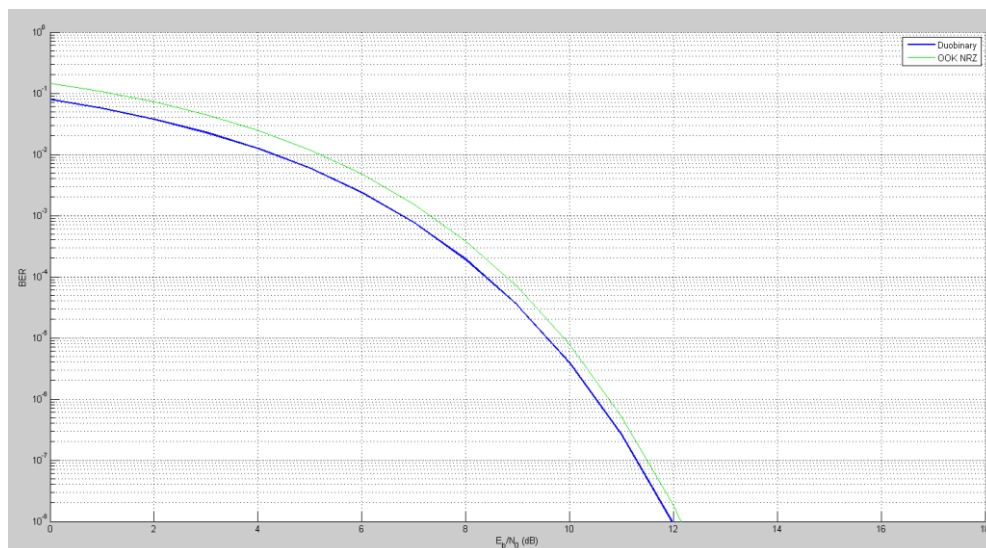
Tab. 5.2: Parametre optickej trasy_2

Parametre	Namerané	Simulované
Rx power (dBm)	-13,2	-13,4
OSNR	25,9	24,3
PMD (ps)	1,06	1,25
SPM (dB)	0,87	1,22
XPM (dB)	-57,59	-60,5
FWM (dB)	N/A	-124,3
Q	7,99	8,1
BER	$>10^{-15}$	$>10^{-12}$

Porovnanie jednotlivých meraných a simulovaných trás je znázornené v tab. 5.1 pre optickú trasu_1 a v tab 5.2 pre optickú trasu_2. Jednotlivé vplyvy prostredia optického vlákna vyšli s maximálnou odchýlkou okolo 2 dB. Väčšinou sa jednalo o nárast vplyvov v simulácií, čo znamená, že simulované trasy majú horšie vlastnosti ako pri reálnom nasadení, a teda pri vhodnom výsledku bude možno takýto optický prenosový systém bez problémov nasadiť do prevádzky.

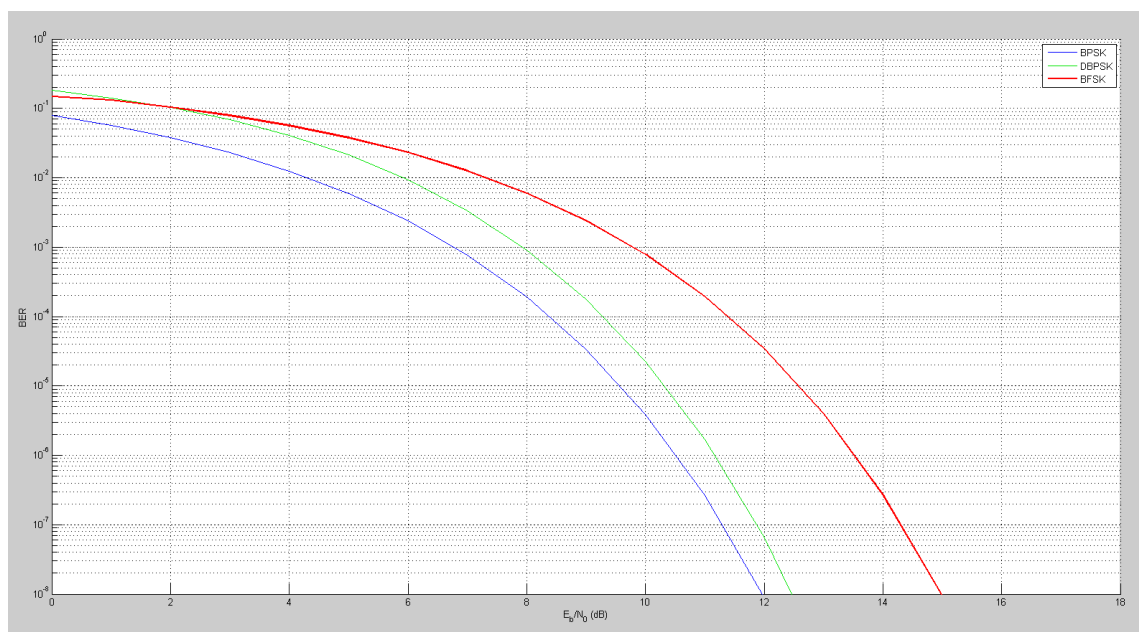
5.2 Analýza výsledkov v oblasti modulačných techník pre použitie v prostredí optického vlákna

V minulosti využívali optické prenosové systémy dvojstavovú amplitúdovú moduláciu OOK s priamym detekovaním. Takéto systémy sa vyznačovali prenosom 1 - 10 Gbit/s cez optické jednomódové vlákna s dĺžkou do 50 km. V súčasnosti je možné upraviť takýto nasadený systém koherentným prijímačom, ktorý je schopný prenášať optický signál rádovo v km, v závislosti od citlivosti prijímača a od generovaného šumu vysielača. Zmena optického systému na koherentný je dostupná, ale cenovo náročná z dôvodu zabezpečovacích mechanizmov na detekciu fázy polarizácie. Ďalším možným vylepšením na koherentnú detekciu je zmena kľúčovania OOK na moduláciu Duobinary. Jedná sa o úpravu elektrickej časti systému, ktorá je menej nákladná ako v prípade výmeny optických komponentov. V tejto časti sme využili simuláciu Monte Carlo v prostredí Matlab. Algoritmus Monte Carlo umožnil merať bitovú chybovosť pre vytvorený model prostredia optického vlákna s danou moduláciou. V tejto simulácii bolo použité štandardné SM vlákno spĺňajúce špecifikáciu ITU-T G.656. Porovnanie kľúčovania OOK s koherentnou detekciou a modulácie Duobinary je znázornené na obr. 5.2.



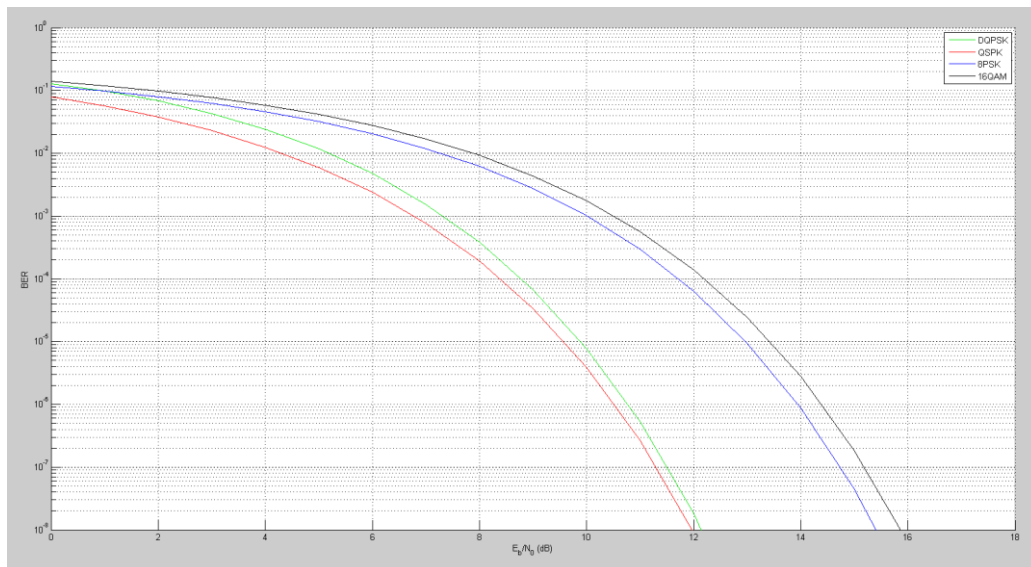
Obr. 5.2. Porovnanie chybovosti pre kľúčovanie OOK a Duobinary moduláciu

Ďalším možným riešením je použiť koherentný systém s fázovými a s frekvenčnými modulačnými technikami. Medzi základné patrí kľúčovanie BPSK, DBPSK a BFSK. Jednotlivé modulačné techniky dosahujú podobné charakteristiky zobrazené na obr. 5.3, kde BPSK dosahuje lepších výsledkov zhruba o 0,1 dB oproti DBPSK a zhruba o 3 dB oproti FSK.



Obr. 5.3. Porovnanie chybovosti pre kľúčovanie BPSK, DBPSK a BFSK

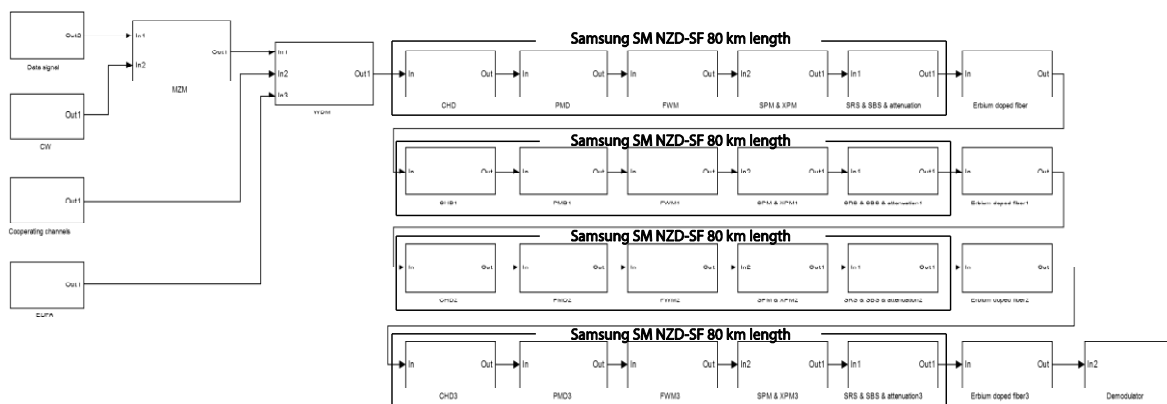
Pre zvýšenie prenosovej rýchlosti optického prenosového systému je možné nasadiť viacstavové modulácie. Takéto modulačné techniky bývajú náchylnejšie na odstup signál-šum OSNR ako binárne modulácie, preto je nevyhnutné analyzovať parameter BER v závislosti od OSNR. Na obr. 5.4 je znázornená chybovosť pre viacstavové modulácie. QPSK a DQPSK kľúčovania vykazujú podobnú odolnosť voči šumu ako BPSK a DBPSK kľúčovania. V tomto prípade by sa jednalo o zvýšenie prenosovej rýchlosti systému o dvojnásobok a v kombinácii s polarizačne módovou moduláciou by sa jednalo o 40 Gbit/s systém. Takéto riešenie vyžaduje nasadenie modulátorov MZM a modulátora PDM. Viacstavové modulácie 8PSK a 16QAM majú zhoršenú odolnosť voči šumu takmer o 2 dB, čo by v niektorých systémoch viedlo k vysokej chybovosti zapríčinennej šumom lasera, zosilňovačov a/alebo nelineárných vplyvov prostredia optického vlákna.



Obr. 5.4. Porovnanie chybovosti pre viacstavové modulácie QPSK, DQPSK, 8PSK a 16QAM

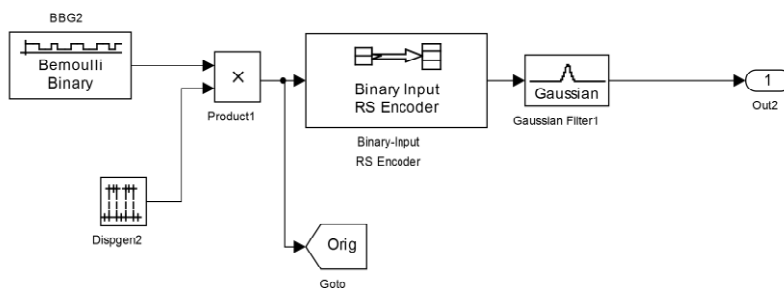
5.3 Analýza výsledkov v oblasti kódovacích techník pre použitie v prostredí optického vlákna

Jedným z nových trendov zlepšenia prenosu cez optické prenosové systémy je využitie rozličných kódovacích techník. Pre analýzu vybraných kódov sme si zvolili optický prenosový systém, ktorého parametre sú uvedené v časti 5.1. Celková bloková schéma optického systému je znázornená na obr. 5.5, kde celková dĺžka vlákien je 320 km, pričom každých 40 km bolo v rámci zosilnenia EDFA vložené erbiom dopované vlákno dĺžky 80 m.

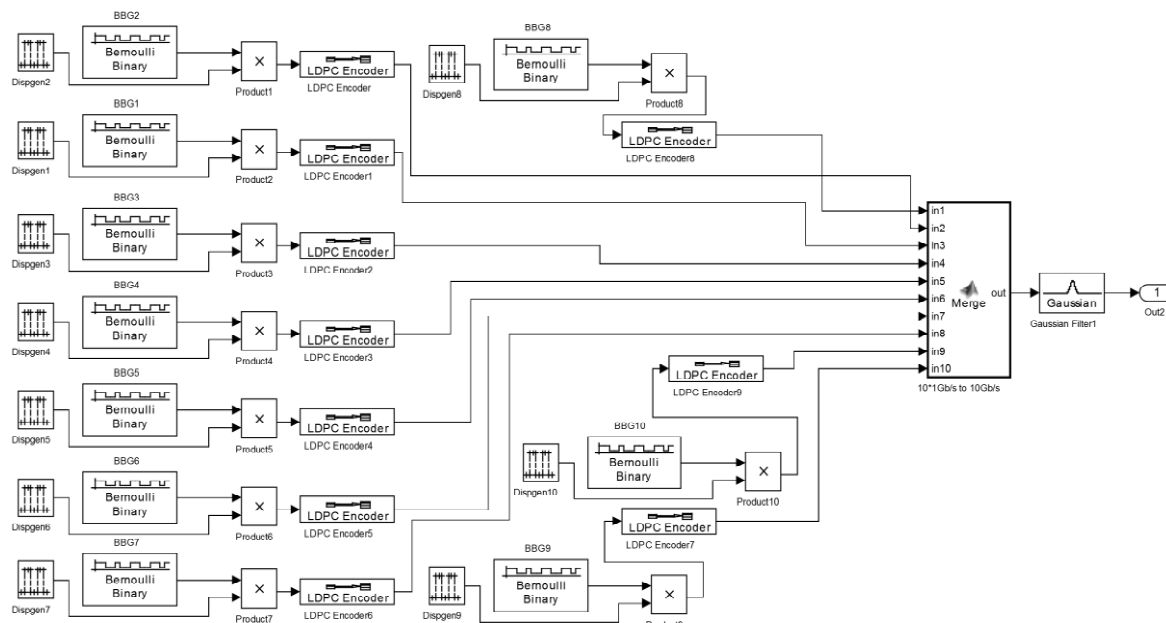


Obr. 5.5. Bloková schéma pre analýzu kódovacích techník

Pri analýze kódovacích techník sme sa pre zlepšenie prenosu binárnych modulačných techník nasadených v optickom systéme rozhodli použiť a analyzovať nasledovné kódy: RS (255,239), BCH (255,231) a LDPC (960,480). Dátové binárne postupnosti sú kódované v elektrickej časti a následne modulované príslušnou modulačnou technikou v modulátoroch MZM. RS a BCH kódy umožňujú kódovanie priamo 10 Gbit/s signálu, ako je znázornené na obr. 5.6. LPCD kódovanie je však časovo náročné, a z tohto dôvodu sú samostatne kódované 1 Gbit/s dátové signály, ktoré sú následne časovo multiplexované do jedného 10 Gbit/s dátového toku. Kódovanie LDPC spolu s časovým multiplexom signálu je znázornené na obr. 5.7.

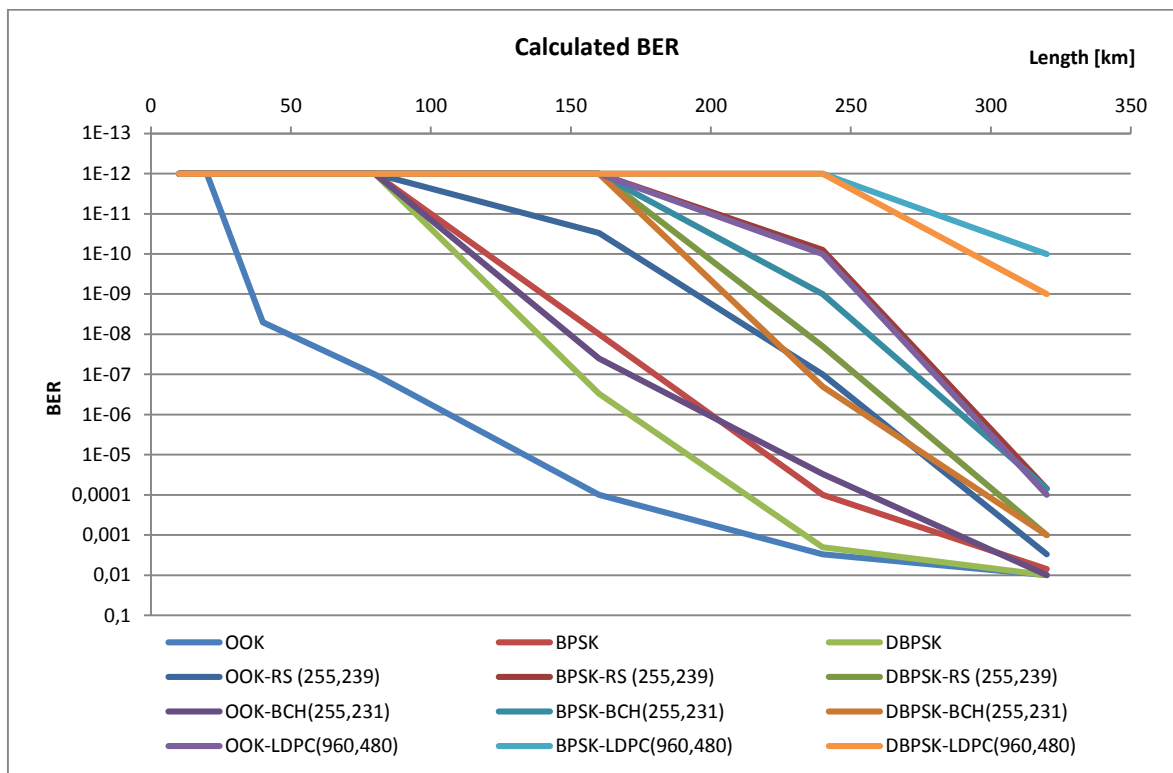


Obr. 5.6. Bloková schéma kódovania dátového signálu pomocou RS a BCH



Obr. 5.7. Bloková schéma kódovania dátového signálu pomocou LDPC

Na obr. 5.8 je znázornené porovnanie binárnych modulačných techník OOK, BPSK a DBPSK v kombinácii s použitými kódovacími technikami RS, BCH a LDPC. Ako už bolo spomenuté, pre nekoherentnú detekciu OOK kľúčovania je dosah systému limitovaný na 50 km. Použitie kódovacích techník umožnilo zvýšiť dosah systému na 80 - 160 km v závislosti od použitého kódu. Lepšie parametre sú dosiahnuteľné pomocou koherentných fázových modulačných techník BPSK a DBPSK kľúčovania, kde limit týchto kľúčovaní je okolo 80 - 100 km. Kódovanie pomocou RS a BCH umožnilo zvýšiť dosah systému na 160 km a 230 km pri použití LDPC kódu. Pre tento konkrétny systém je na zvýšenie dosahu najefektívnejšie použiť LDPC kódy, ktoré dosahuje až o 50% lepšie výsledky. Nevýhodou takéhoto systému je však nutnosť kódovať jednotlivé dátové signály s nižšou prenosovou rýchlosťou ako je celková prenosová rýchlosť systému. Z tohto dôvodu je lepšie použiť LDPC kódy na rozhraní diaľkových a metropolitných sietí, kde dochádza k časovému multiplexovaniu dátových signálov.



Obr. 5.8. Porovnanie binárnych modulačných techník v kombinácii s kódovacími technikami

5.4 Návrh realizácie modulačných a kódovacích techník

Pri návrhu kombinácie modulačných a kódovacích techník uvažujeme použitie štandardného SM vlákna (ITU-T G652) pri prenose dátových signálov s prenosovou rýchlosťou 10 Gbit/s a s 80 WDM kanálmi. Jednotlivé vysielače sú realizované pomocou MZM modulátora a generovania spojitej vlny CW pomocou CW-DFB lasera [KIS01, TAK03]. Výkon 1 mW a vložený amplitúdový šum 4 dB je generovaný laserom CW-DFB, pričom fázový šum je potlačený. Analyzovaný vyslaný optický signál je na frekvencii 193,4 THz a jeho výsledný SNR je 30 dB. Na zvýšenie dosahu optickej prenosovej trasy je použitý EDFA zosilňovač každých 40 km s Ramanovým zosilňovačom na začiatku trasy, kde oba zosilňovače majú NF rovné 4 dB. Pred prijímač je zaradené vlákno so zápornou CD pre kompenzovanie vplyvu CD v systéme. Prijatý signál je detekovaný koherentným detektorom, ktorého citlivosť je do -17 dBm s využitím tvrdého rozhodovania pri použití LDPC(960,480) zvolený na základe analýzy v časti 5.3 [IPE07].

V návrhu sme najprv uvažovali binárne modulácie, kde kľúčovanie OOK dosahuje najhoršie prenosové vlastnosti, pričom dosah systému je limitovaný na 230 km. Pri analýze kľúčovania BPSK a BFSK sme dosiahli podobné prenosové vlastnosti, kde je systém schopný prenášať signál na vzdialenosť okolo 300 km pri prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s. Na dosiahnutie najväčšieho dosahu systému je vhodné použiť práve tieto modulačné formáty. Pre zvýšenie prenosovej rýchlosti pre tieto modulačné formáty je možné použiť polarizačnú moduláciu PDM (PDM-BPSK a PDM-BFSK), kde výsledná prenosová rýchlosť bude dvojnásobná, t.j. 20 Gbit/s. Pre dosiahnutie vyššej prenosovej rýchlosti je nutné použiť viacstavové modulačné formáty. Signál modulovaný kľúčovaním QPSK je možné preniesť na vzdialenosť okolo 300 km, kde prenosová rýchlosť oproti binárnym moduláciám je dvojnásobná a pri použití PDM je možné preniesť signál 40 Gbit/s. Pri použití 8PSK a 16QAM systémov je maximálny dosah systému okolo 200 km, čo je spôsobené šumom zosilňovačov a nelineárnymi vplyvmi prostredia optického vlákna v dôsledku vyššieho vloženého výkonu do systému. Takýto systém má však prenosovú rýchlosť pri použití PDM-8PSK 60 Gbit/s a pri PDM-16QAM až 80 Gbit/s na jeden kanál. Pri analýze signálov sme zistili, že zhoršenie dosahu systémov je spôsobené šumom zosilňovačov a kumulovaním nelineárných vplyvov po každom zosilnení. Pri použití takéhoto zapojenia je výhodné použiť práve kľúčovanie 16QAM s kódovaním jednotlivých kanálov kódom LDPC(960,480). Pre dosiahnutie lepších parametrov optického systému je možné použiť kvalitnejšie zosilňovače s nižším NF , iné detektory a jemného

dekódovania v detektoroch. Takéto úpravy však rapídne zvyšujú cenu daného systému, a teda ďalšia analýza z hľadiska ceny v porovnaní s efektívnosťou systému je nutná. Výstupné parametre pre daná modulačné techniky sú zobrazené v tab. 5.3.

Tab. 5.3: Porovnanie vybraných modulačných techník pre vybraný optický prenosový systém

Modulačné techniky	parametre	vzdialenosť [km]							
		40	80	120	160	200	240	280	320
OOK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}
	OSNR [dB]	25	19	14	7	2	1	1	1
BPSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-9}
	OSNR [dB]	27	24	20	17	15	11	8	5
DBPSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-10}	10^{-8}
	OSNR [dB]	27	24	20	17	15	11	8	5
BFSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-9}
	OSNR [dB]	28	26	24	21	18	16	13	10
QPSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-9}
	OSNR [dB]	27	24	20	17	15	11	8	5
8PSK	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-10}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}
	OSNR [dB]	27	23	19	14	9	6	2	1
16QAM	BER []	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-3}	10^{-1}	10^{-1}
	OSNR [dB]	27	22	17	12	7	2	2	1

6. Pôvodné vedecké prínosy

Cieľom dizertačnej práce bolo nájsť optimálne spojenie modulácie a kódu na opravu chýb z hľadiska dĺžky vlákna a prenosovej rýchlosti pri prenose cez diaľkové siete a použitia jednomódových vlákien. V práci je zobrazený konkrétny návrh na zlepšenie prenosovej rýchlosti a kapacity daného systému. Z analýzy optického prostredia je zjavné, že každý optický prenosový systém musí byť analyzovaný samostatne v závislosti od použitého optického vlákna. Pri nasadení nových pokročilých techník spracovania signálov je nutné tiež vypočítať jednotlivé náklady pre zlepšenie parametrov daného systému. Viacstavové modulačné techniky v kombinácii s kódovacími technikami sa ukázali byť vhodné pre zvýšenie celkovej prenosovej rýchlosti a kapacity systémov. V tomto prípade bolo do úvahy zobrazené len dostupné technické riešenie.

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

1. Vytvorenie simulačného modelu pre lineárne a nelineárne vplyvy optického prenosového média v programe Matlab Simulink 2014 a porovnanie výstupných parametrov signálu pomocou BER a diagramov oka s výsledkami iných publikovaných prác.
2. Rozšírenie simulačného modelu o existujúce a nové viacstavové modulačné techniky ako sú 8PSK, 16QAM a BFSK kľúčovania, ktoré umožnili zvýšenie prenosovej rýchlosti daného optického systému, pri menšej odolnosti voči šumu.
3. Návrh a implementácia doprednej opravy chýb FEC do vytvoreného modelu pri použití známeho kódu RS (255,239), ktorý dokázal znížiť hranicu SNR pre detekovanie prijatého signálu.
4. Implementovanie iných opravných kódov, t.j. BCH a LDPC kódov, ktoré dosahovali výrazne lepšie výsledky ako pri použití RS kódu.
5. Analýza výsledkov simulácie a porovnanie výsledkov simulácie s výsledkami zo optických prenosových systémov reálnej prevádzky.
6. Návrh realizácie navrhovaných modulačných a kódovacích techník v reálnych optokomunikačných systémoch a sieťach.

Resumé

The thesis deals with analysis of advanced signal processing techniques such as modulation and coding techniques in optical transmission systems. First, the characteristics of linear and nonlinear optical transmission medium effects are presented and the generating principle of multi-state modulation techniques and characteristics of selected types of coding techniques are presented. The thesis includes extensive overview of the state of art in the fields of increasing transmission rate, range and transmission capacity of optical transmission systems. Furthermore, the design and the simulation model for the optical transmission system are presented, where we disclose the possibility of analysis and evaluation of transmitted optical signals. Detailed analysis of each block of generating optical signals, their coding and binary modulation techniques are shown. The extension of the simulation model of existing and new higher data rate modulation techniques such as 8PSK, 16QAM and BFSK keying is presented, which allowed an increase in transmission rate of the optical system with less resistance to noise. Next, we shown the analysis of blocks for the simulation of linear and nonlinear fiber optic environmental influences and their impact on the transmitted optical signal modulated with OOK and BPSK keying. We presenting the design and implementation of forward error correction FEC to create the model using a known code RS (255.239), which can reduce the SNR threshold for detecting the received signal and additional implementation of other correction codes as BCH and LDPC codes, which achieve much better results than using the RS code. Created simulation is then analysed and compared with the effects of real transmission systems. In the final part, the design implementation of the proposed modulation and coding techniques in real optical transmission systems and networks.

The aim of this dissertation thesis was to find an optimal combination of modulation and error correction code in terms of fiber length and transmission rate when transmitting over long distance networks and the use of single mode fibers. The paper shows the concrete proposals to improve transmission speed and capacity of the system. The analysis of the optical medium is obvious that each optical transmission system must be analysed separately depending on the optical fiber. If using new advanced signal processing techniques, it is also necessary to calculate individual costs to improve the parameters of the system. Higher data rate modulation techniques combined with coding techniques have proved to be suitable for increasing the total transmission rate and capacity of the systems. In this case, it was considered as the collected technical solution.

In conclusion, the main outcomes of thesis are following results:

1. Creating a simulation model for linear and nonlinear effects of optical transmission medium in Matlab Simulink 2014 and a comparison output signal parameters using BER and eye diagrams with results from other published works.
2. Extending the simulation model of existing and new high data rate modulation techniques such as 8PSK, 16QAM and BFSK keying, which allowed an increase in transmission speed of the optical system with less resistance to noise.
3. Design and implementation of forward error correction FEC to create the model using a known code RS (255.239), which can reduce the SNR threshold for detecting the received signal.
4. Implementation of other correction codes, i BCH and LDPC codes, which achieve much better results than using the RS code.
5. Analysis of simulation results and comparison of simulation results with the results of optical transmission systems, real operation.
6. The draft implementation of the proposed modulation and coding techniques in real optical transmission systems and networks.

Zoznam použitej literatúry

- [AJM15] Ajmani M., Singh P., *FWM in WDM System, Effects and Techniques to Minimize: A Review*, In Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies ACCT, ISBN: 978-1-4799-8487-9, February 2015.
- [ALL03] Ch. T. Allen, P. K. Kondamuri, D. L. Richards, D. C. Hague, *Measured Temporal and Spectral PMD Characteristics and Their Implications for Network-Level Mitigation Approaches*, Journal of lightwave technology, vol. 21, NO. 1, January 2003
- [AUY03] AuYeung J., Yariv A., *Spontaneous and stimulated Raman scattering in long low loss fibers*, In IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 14, Issue: 5, ISSN: 0018-9197, January 2003.
- [BAL09] Bale B. G., Boscolo S., Turitsyn S. K., *Dissipative dispersion-managed solitons in mode-locked fibre lasers*, Conference on Optical Communication, Vienna, ISBN: 978-1-4244-5096-1, September 2009.
- [BER05] Bergano S. N., *Wavelength Division Multiplexing in Long-Haul Transoceanic Transmission Systems*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 12, December 2005.
- [BEY14] Beygi L., Agrell E., Kahn M. J., Karlsson M., *Rate-Adaptive Coded Modulation for Fiber-Optic Communications*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 32, No. 2, January 15, 2014.
- [CAN10] F. Cang, K. Onohara, T. Mizuochi, *Forward Error Correction for 100 G Transpor Network*, IEEE Communication Magazine, March 2010 s 48 - 55.
- [CAR02] Carter A.C. Griffin R.A., "Optical differential quadrature phase-shift key (oDQPSK) for high capacity optical transmission," Technical Digest of Optical. Fiber Communication Conference, WX6, 2002.
- [CHA06] Charlet G., *Progress in Optical Modulation Formats for High-Bit Rate WDM Transmissions*, In IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 12, No. 4, August 2006.
- [CHA09] Chandrasekhar S., Liu X., *Experimental investigation on the performance of closely spaced multi-carrier PDM-QPSK with digital coherent detection*, In Opt. Exp., Vol. 17, No. 24, pp. 21350–21361, 2009.
- [CHI12] Chi N., Fang W., Shao Y., Zhang J., Tao L., *FSK Modulation Scheme for High-Speed Optical Transmission*, In ZTE Communucations, Vol. 10, No. 3, Semptember 2012.
- [CHO01] Cho S.-H., Kumagai H., Midorikawa K., *Fabrication of multi-core structures in optical fibers using plasma self-channeling excited by a femtosecond laser*, In Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO/Pacific Rim 2001. The 4th Pacific Rim Conference, Vol. 1, July 2001.
- [CUC06] J. Čuchran, R. Róka, *Optocommunication systems and networks*. STU Publishing house Bratislava, 2006, pp. 6-140.
- [DIN11] Ding W., Gorbach A.V., Wadsworth W.J., Knight, J.C., *Time- and frequency-domain measurements of solitons in subwavelength silicon waveguides using cross-correlation*, In Lasers and Electro-Optics Europe, 12th Conference on European Quantum Electronics Conference, ISBN: 978-1-4577-0533-5, 22-26 May 2011.
- [DJO04] Djordjevic B. I., Vasic B., Neifeld A. M., *LDPC-Coded OFDM for Optical Communication Systems with Direct Detection*, In IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 13, No. 5, October 2004.
- [DJO06] Djordjevic B. I., Sankaranarayanan S., Chilappagari K. S., Vasic B., *Low-Density Parity-Check Codes for 40-Gb/s Optical Transmission Systems*, In IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 12, No. 4, August 2006.
- [DJO07] Djordjevic I. B., *Generalized LDPC Codes and Turbo-Product Codes with Reed-Muller Component Codes*, In Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, 2007, Serbia, ISBN: 978-1-4244-1468-0, September 2007.

- [ESS10] Essiambre R., Kramer G., Winzer P.J., Foschini G.J., *Capacity Limits of Optical Fiber Networks*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 28, Issue: 4, ISSN: 0733-8724, February 2010.
- [EVA11] Evans P. et al., "*Multi-channel coherent PM-QPSK InP transmitter photonic integrated circuit (PIC) operating at 112 Gb/s per wavelength*," Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference, PDPC7, 2011.
- [FUK01] Fukuchi K., Kasamatsu T., Morie M., Ohhira R., Ito T., Sekiya K., Ogasahara D., Ono T., *10.92-Tb/s (273 x 40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM opticalrepeateder transmission experiment*, In Proc. Optical Fiber Communication Conf. (OFC), 2001, Paper PD24.
- [GEO97] Georges T., Charbonnier B., *Reduction of the dispersive wave in periodically amplified links with initially chirped solitons*, In Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 9, Issue: 1, ISSN: 1041-1135, January 1997.
- [GNA11] Gnauck A.H. et al., "*Generation and transmission of 21.4-Gbaud PDM 64-QAM using a high-power DAC driving a single I/Q modulator*," Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference, PDPB2, 2011.
- [GRO88] Wayne D. Grover, *Forward Error Correction in Dispersion-Limited Lightwave System*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. 6. No 5. May 1988.
- [HAS00] Hasegawa A., *Soliton-Based Optical Communications: An Overview*, In IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 6., November/December 2000.
- [HAS12] Hassan Abid Yasser, *Polarization Losses in Optical Fibers*, In Recent Progress in Optical Fiber Research, Dr Moh. Yasin (Ed.), ISBN: 978-953-307-823-6, InTech, January 2012.
- [HEF96] B. L. Heffner, *PMD measurement techniques – a consistent comparison*, In Optical Fiber Communications, ISBN: 1-55752-422-X, March 1996.
- [HIC10] Hiçdurmaz B., Karlik S. E., Yilmaz G., *Analysis of SPM and XPM phenomena in optical fiber communication systems*, In National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering ELECO, ISBN: 978-1-4244-9588-7, December 2010.
- [IAN98] E. Iannone, F. Matera, A. Mecozzi, M. Settembre, *Nonlinear Optical Communication Networks*, John Wiley and Sons, pp. 20-50, TK5103.59.N66 1998.
- [INO02] Inoue K., *Polarization effect on four-wave mixing efficiency in a single-mode fiber*, In IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 28, Issue: 4, ISSN: 0018-9197, August 2002.
- [IPE07] Ip. E., Lau A. P. T., Barros J. F. D., Kahn M. J., *Coherent detection in optical fiber systems*, In Optics Express, Vol. 16, No. 2, November 2007.
- [JAM05] Z. Jamaludin, A. F. Abas, A. S.M. Noor, M.K. Abfullah, *Issues n polarization mode disperzion (PMD) for high speed fiber optics transmission*, Suranaree J. Sci. Technol., Vol. 12 No. 2, June 2005.
- [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.
- [KAH05] J. M. Kahn, K.-P. Ho, "*Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems*", IEEE. J. on Sel. Topics in Quantum Electron. 10, 259-272 (2004)2005.
- [KAL99] Kalmar A. Winzer P.J., "*Sensitivity enhancement of optical receivers by impulsive coding*," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 17, no. 2, pp.171-177, 1999.
- [KAR07] Karfaa Y.M., Ismail M., Abbou F.M., Shaari S., *Effects of four-wave mixing crosstalk in WDM networks on the transmitted optical frequencies and wavelengths of channels for various fiber types*, In Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics APACE, ISBN: 978-1-4244-1434-5, December 2007.
- [KIS01] Kise T., *Over 100mW high power operation of 1625nm Lb and DFB laser diodes*, LEOS 2001, Technical Digest ThQ5, pp. 802-803, November 2001.

- [KOR12] Korotky S. K., *Price-points for components of multi-core fiber communication systems in backbone optical networks*, In Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal, Vol. 4, Issue: 5, ISSN: 1943-0620, May 2012.
- [KUN02] Kung A., Thevenaz L., Robert P. A., *Polarization analysis of Brillouin scattering in a circularly birefringent fiber ring resonator*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 6, August 2002.
- [LEE14] Lee Y., Tanaka K., Nomoto E., Arimoto H., Sugawara T., *Multi-core fiber technology for optical-access and short-range links*, In Optical Internet 2014 (COIN), 2014 12th International Conference, pp 1-2, August 2014.
- [LIN12] Lin Ch., Djordjevic B. I., Zou D., Arabaci M., Cvijetic M., *Nonbinary LDPC-Coded Mode-Multiplexed Coherent Optical OFDM 1.28-Tbit/s 16-QAM Signal Transmission Over 2000 km of Few-Mode Fibers With Mode-Dependent Loss*, In IEEE Photonics Journal, Vol. 4, No. 5, October 2012.
- [LIY14] Li Y., Hua N., Zheng X., *An analysis of optimized CapEx for multi-core fiber based optical networks*, In Optical Communications and Networks (ICOON), 2014 13th International Conference, pp. 1 -4, November 2014.
- [MIZ05] T. Mizuoichi, *Recent Progress in Forward Error Correction for Optical Communication Systems*, publishe in IEICE TRANSACTIONS on Communications, 2005/05/01, ISSN 0916-8516, Vol.E88-B No. 5, pp. 1934-1946.
- [OLM13] Olmedo M.I., Tianjian Z., Jensen J.B., Qiwen Z., *Multiband Carrierless Amplitude Phase Modulation for High Capacity Optical Data Links*, In Journal of Lightwave Technology, ISSN:0733-8724, Vol. 32, Issue: 4, October 2013.
- [OUC06] Ouchi D., Kubo K., Mizuoichi T., Miyata Y., *A fully integrated block turbo code FEC for 10 Gb/s optical communication systems*, In Optical Fiber Communication Conference, 2006, ISBN: 1-55752-803-9, March 2006.
- [RAH15] Rahman T., Rafique D., Napoli A., de Man E., *Ultralong Haul 1.28-Tb/s PM-16QAM WDM Transmission Employing Hybrid Amplification*, In Journal of Lightwave Technology, Vol. 33, Issue: 9, ISSN: 0733-8724, February 2015.
- [RAS12] Rasheed I., Abdullah M., Mehmood S., Chaudhary M., *Analyzing the non-linear effects at various power levels and channel counts on the performance of DWDM based optical fiber communication system*, In International Conference on Emerging Technologies ICET, ISBN: 978-1-4673-4452-4, October 2012.
- [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.
- [SAK08] Sakamoto T. et al., "50-km SMF transmission of 50-Gb/s 16 QAM generated by quad-parallel MZM," Proceedings of European Conference on Optical Communication, Tu.1.E.3, 2008.
- [SAL91] Saleh B. E. A., Teich M. C., *Fundamentals of photonics*, A Wiley-Interscience publication, 1991, pp. 739, TA1520.S2, ISBN: 978-0-471-35832-9.
- [SEA05] J. Seams, *A Comparison of Resistive Terminators for High Speed Digital Data Transmission*, *High Frequency Electronics*, Submit Technical Medium, October 2005.
- [SEG04] Segev M., Fleischer J.W., Cohen O., Buljan, H., *Wave propagation and solitons in 2D photonic structures*, In Conference on Lasers and Electro-Optics, Vol. 1, ISBN: 1-55752-777-6, May 2004.
- [SHA11] Sharma R. L., Singh R., *Solitons, its Evolution and Applications in High Speed Optical Communication*, In International Journal on Emerging Technologies, ISSN: 0975-8364, 2011.
- [SHT99] Shtaif M., Gnauck H. A., *The Relation Between Optical Duobinary Modulation and Spectral Efficiency in WDM Systems*, In IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 6, June 1999.

- [SIN07] Singh S. P., Singh N., *Nonlinear Effects in Optical Fibers: Origin, Management and Applications*, In *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 73, 249-275, 2007.
- [SON02] Song L., Yu M. L., Shaffer S. M., *10- and 40-Gb/s Forward Error Correction Devices for Optical Communications*, In *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 37, No. 11, November 2002.
- [SUL12] Sultana N., Islam M.S., *Analysis of XPM effect with SPM and GVD in WDM fiber optic transmission system*, In *International Conference on Computer and Communication Engineering ICCCE*, ISBN: 978-1-4673-0478- 8, July 2012.
- [SUZ94] Suzuki M., Edagawa N., Taga H., Tanaka H., *10 Gb/s, over 12200 km soliton data transmission with alternating-amplitude solitons*, In *Photonics Technology Letters*, IEEE, Vol. 6, Issue: 6, ISSN: 1041-1135, June 1994.
- [TAG96] Taga H., *Long distance transmission experiments using the WDM technology*, In *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, Issue: 6, pp.1287-1298, ISSN: 0733-8724, June 1996.
- [TAK03] Takaki K., Kise T., Maruyama K., Yamanaka N. H. K., Funabashi M., Kasukawa A., *High-Power CW-DFB LDs for Optical Communications*, In *Furukawa Review*, No. 23 2003.
- [TOM97] M. Tomizawa, Y. Yamabayashi, K. Murata, T. Ono, Y Kobayashi, K. Hagimoto, *Forward Error Correcting Codes in Synchronous Fiber Optic Transmission Systems*, *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, Vol. 15, No. 1, January 1997.
- [TOT12] Tottori Y., Kobayashi T., Watanabe M., *Low loss optical connection module for 7-core multi-core fiber and seven single mode fibers*, In *Photonics Technology Letters*, IEEE, Vol. 24, Issue: 21, September 2012.
- [WIN06] Winzer P.J., Essiambre, R., *Advanced Optical Modulation Formats*, In *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, Issue: 5, ISSN:0018-9219, May 2006.
- [WUM14] Wu M., Han D., Zhang X., Zhang F., Zhang M., Yuel G., *Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems*, In *Optics Express*, Vol. 22, No. 5, February 2014.
- [XIE04] Xie Ch., Möller L., Ryf R., *Improvement of Optical NRZ- and RZ-Duobinary Transmission Systems With Narrow Bandwidth Optical Filters*, In *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 9, September 2004.
- [XIO00] Xiong F. G., *Digital Modulation Techniques*, Artech House, 2000 INC., pp. 23-234, ISBN 0-89006-970-0.
- [XUC03] Xu Ch., Liu X., Mollenauer L. F., Wei X., *Comparison of Return-to-Zero Differential Phase-Shift Keying and ON-OFF Keying in Long-Haul Dispersion Managed Transmission*, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 15, No. 4, April 2003.
- [XUC04] Xu Ch., Liu X., Wei X., *Differential Phase-Shift Keying for High Spectral Efficiency Optical Transmissions*, In *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 10, No. 2, April 2004.
- [YUC06] Yu Ch., Xu L., Ip E., Ji N. P., Wang T., *Comparison of Modulation Formats for 40-Gbit/s DWDM Optical Fiber Transmission Systems with 50-GHz Channel Spacing*, In *Sarnoff Symposium*, 2006 IEEE, ISBN: 978-1-4244-0002-7, March 2006.
- [YUJ03] Yu J., Kwon I., Oh K., *Analysis of Brillouin frequency shift and longitudinal acoustic wave in a silica optical fiber with a triple-layered structure*, In *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 8, August 2003.

Zoznam publikácií autora

Kapitoly vo vedeckých monografiách vydané v zahraničných vydavateľstvách

1. RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (50%). 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.

Vedecké práce v ostatných recenzovaných zahraničných časopisoch

1. ČERTÍK, Filip (50%) - RÓKA, Rastislav. Advanced Encoding Techniques at High Data Rate Signal Transmission in Optical Transmission Medium. In *Radioengineering, Proceedings of Czech and Slovak Technical Universities*. Impact Factor: 0796. -v procese revízie.
2. ČERTÍK, Filip (100%). Utilization of Encoding Techniques at the Signal Transmission in the Optical Fiber. In *Advances in Signal Processing*. Vol. 3, No. 2 (2015), pp. 17 - 24. ISSN 2332-6883.
3. ŠALÍK, Pavol - ČERTÍK, Filip (35%) - RÓKA, Rastislav. Duobinary modulation format in optical communication systems. In *Advances in Signal Processing*. Vol. 3, No. 1 (2015), pp. 1-7. ISSN 2332-6883.
4. RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (50%). Modeling of Environmental Influences at the Signal Transmission in the Optical Transmission Medium. In *International Journal of Communication Networks and Information Security*. Vol. 4, No. 3 (2012), pp.146-162. ISSN 2073-607X.

Odborné práce v ostatných zahraničných časopisoch

1. ČERTÍK, Filip (100%). The Simulation of advanced modulation techniques and their resistance to the polarization mode dispersion PMD. In *Elektrorevue*, ISSN 1213-1539. - v tlači.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

1. ČERTÍK, Filip (50%) - RÓKA, Rastislav. Simulation and Analysis of the Signal Transmission in the Optical Transmission Medium. In *SIMULTECH 2015*, July 21-23, 2015. Colmar, Alsace, France.
2. ČERTÍK, Filip (50%) - RÓKA, Rastislav. Nonlinear SPM and XPM effects and their influence on optical signals utilized different modulation techniques in WDM transmission systems. In *Optical Communications 2014 : 26th conference and exhibition. Prague, Czech Republic, October 23-24, 2014*. Prague : Action M, 2014, pp. 28-33. ISBN 978-80-86742-39-7.
3. ČERTÍK, Filip (50%) - RÓKA, Rastislav. The Nonlinear FWM Effect and its Influence on Optical Signals Utilized Different Modulation Techniques in the WDM Transmission Systems. In *Optické komunikace 2012 : 24th Conference and Exhibition on Optical Communications 2012. Prague, Czech Republic, October 25-26, 2012*. Prague : Action M, 2012, pp.20-25. ISBN 978-80-86742-36-6.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

1. ČERTÍK, Filip (100%). The simulation of different encoding and modulation techniques utilized in optical transmission system. In *APCOM 2015*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovak Republic, June 24-26. - v procese revízie.
2. RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (50%). Modeling of Nonlinear Influences at the 2-state Modulated Signal Transmission in the Optical Transmission. In *APCOM 2015*, Štrbské Pleso, High Tatras, Slovak Republic, June 24-26. - v procese revízie.
3. ŠALÍK, Pavol - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK (35%), Filip. Digitálne modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2014, ELOSYS*. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 43-47. ISSN 1335-2547.

4. ŠALÍK, Pavol - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (35%). Digitálne modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2014 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác 2014, Bratislava, 29. apríl 2014*. 1.vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, CD-ROM, s. 347-352. ISBN 978-80-227-5154-5.
5. ŠALÍK, Pavol - RÓKA, Rastislav - ČERTÍK, Filip (35%). 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.
6. ČERTÍK, Filip (100%). The Propagation of 10 Gbit/s OOK Modulated Signal via SM Optical Fiber. In *RTT 2013. Research in Telecommunication Technology [elektronický zdroj] : 15th International Conference. Senec, Slovak Republic, September 11-13, 2013*. 1. vyd. Bratislava : FEI STU, 2013, s.CD-ROM, s. 96-101. ISBN 978-80-227-4026-5.
7. ČERTÍK, Filip (100%). The Propagation of Higher Modulated Formats Via Single Mode Optical Fiber. In *RTT 2013. Workshop popri konferencii Research in Telecommunication Technology [elektronický zdroj] : Proceedings; Senec, Slovak Republic, September 11-13, 2013*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD ROM, p. 71-82. ISBN 978-80-227-4025-8.
8. ČERTÍK, Filip (100%). Using Matlab Tools for Simulation of the optical Transmission Medium. In *Technical Computing Bratislava 2012 [elektronický zdroj] : 20th Annual Conference Proceedings. Bratislava, 7.11. 2012*. Bratislava : RT Systems, 2012, s.CD-ROM, [8] s. ISBN 978-80-970519-4-5.
9. ČERTÍK, Filip (50%) - RÓKA, Rastislav. Analysis of Modulation Techniques Utilized in the Optical Transmission Medium. In *Elektro 2012 : 9th International Conference, May 21-22, 2012, Žilina - Rajecké Teplice*. Žilina : Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita, 2012, s.30-35. ISBN 978-1-4673-1178-6.
10. ČERTÍK, Filip (25%) - MOKRÁŇ, Martin - ŠPIRKOVÁ, Miroslava - RÓKA, Rastislav. Modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2012 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác, Bratislava, 25. apríl 2012*. Bratislava : FEI STU, 2012, s.CD-ROM, s. 512-517. ISBN 978-80-227-3697-8.
11. ČERTÍK, Filip (50%) - RÓKA, Rastislav. Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011*. Roč. 17, mimoriadne č (2011), s.42-45. ISSN 1335-2547.
12. ČERTÍK, Filip (50%) - RÓKA, Rastislav. Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu. In *ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011*. Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2011, s.590-595. ISBN 978-80-227-3508-7.

Skriptá a učebné texty

1. KOTULIAKOVÁ, Kvetoslava - TRNOVSKÝ, Tibor - KOŽIČKA, Róbert - ČÍŽ, Pavol - DODEK, Dušan - ČERTÍK, Filip (10%) - DVORSKÝ, Peter. *Metódy modelovania komunikačných funkcií II. Riadenie toku*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2011. CD-ROM [61 s. ISBN 978-80-227-3521-6.

Rôzne publikácie a dokumenty, ktoré nemožno zaradiť do žiadnej z predchádzajúcich kategórií

1. ČERTÍK, Filip (100%). Advanced Modulation Techniques and their Resistance to the Polarization Mode Dispersion PMD. In *KTTO 2013. Knowledge in Telecommunication Technologies and Optic : 13th International Conference. Hradec nad Moravicí, Czech Republic, September 4-6, 2013*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, 2013, s.15.

Riešené výskumné úlohy

1. PPMV 1325PS/2014 - Advanced Optical Signal Processing Techniques, zodpovedný riešiteľ: Ing. Filip Čertík
2. VEGA 1/0106/11 - Analysis and proposal for advanced optical access networks in the NGN converged infrastructure utilizing fixed transmission media for supporting multimedia services, zodpovedný riešiteľ: doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.
3. KEGA 039STU-4/2013 - Utilization of Web-based Training and Learning Systems at the Development of New Educational Programs in the Area of Optical Transmission Media, zodpovedný riešiteľ: . doc. Ing. Rastislav Róka, PhD.