

Fázové klúčovanie v optickom prenosovom médiu

Mokrán Martin · Informačné technológie

06.11.2013



Práca sa zaoberá stručnou charakteristikou optického prenosového média, pochopenie vlastností tohto média je nevyhnutné pre ďalšie úvahy o jeho využití na prenos informácií. Ďalej sa zaoberá fázovými modulačnými formátmi na optickom prenosovom médiu. V poslednej časti sa práca zaoberá simuláciou vybraných modulačných techník, ich porovnaním pri dvoch prenosových rýchlostiach signálu a rôznych dĺžkach optického prenosového média a porovnávaním vplyvov parametrov optického média na prenášaný signál. Výsledky sú spracované v tabuľke a graficky. Vďaka tomu môžeme vybrať najvýhodnejšiu z nich pre návrh optických prenosových systémov s ohľadom na bitovú chybovosť a použitú prenosovú rýchlosť.

1. Úvod

Keďže sa v dnešnej dobe stále zvyšuje záujem o vyššie prenosové rýchlosti a vyššiu kvalitu prenosu informácií je potrebné zaoberať sa možnosťami zvýšenia efektivity a rýchlosti prenosu informácií. Jednou z možností, ako zvýšiť maximálne prenosové rýchlosti a kvalitu prenosu za predpokladu nízkych nákladov a dlhej životnosti je implementácia optických vlákien do sietí. Na prenos sa teda používa svetlo – optický výkon. Postupom času sa prišlo na to, že modulácie v základnom pásme už nie sú postačujúce, kvôli nízkej prenosovej rýchlosti a nízkej odolnosti voči vplyvom znehodnocujúcim kvalitu prenosu.

Preto sa prešlo k moduláciám v preloženom pásme. Tie sa však delia na viacero skupín, keďže každá z nich mení inú veličinu nosného signálu, tým pádom má aj iné prenosové vlastnosti a inú náročnosť hardvérovej realizácie. Táto práca sa venuje modulačným formátom na optickom prenosovom médiu. Zaoberá sa rôznymi typmi modulačných techník, predovšetkým však fázovými moduláciami známymi ako PSK, vlastnosťami optického prenosového média a ich vplyvom na fázové modulácie. V poslednej časti je simulačný program, ktorý sa zaoberá analýzou a porovnaním chybovostí 8PSK a OOK.

2. Vlastnosti optického prenosového média

Vlastnosti optického prenosového média sú frekvenčne závislé a majú rôzny vplyv na prenášanú informáciu. Prenos je znehodnocovaný:

- Lineárnymi efektmi

- tlmenie
- disperzia
 - chromatická disperzia (CD),
 - polarizačná módová disperzia (PMD),
 - módová disperzia
- Nelineárnymi efektmi

Viac o tejto téme je možné nájsť v prácach [1, 2, 8].

3. Modulačné techniky

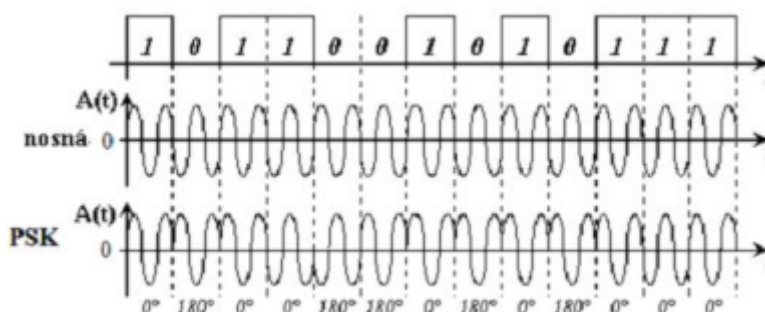
V optických prenosových médiách je potrebné použiť na prenos informácie moduláciu, podľa pásma ich môžeme rozdeliť na dve kategórie [1]:

- modulácie v základnom pásme – linkové kódy,
- modulácie v preloženom pásme

3.1. Fázové klúčovanie

Fázové klúčovanie PSK (Phase Shift Keying) patrí do skupiny modulácií v preloženom pásme. Pri fázovom klúčovaní sa nemení obálka signálu. Na prenos informácie je použitá modulácia fázy – zmena v závislosti od prenášanej informácie. Najjednoduchšiu PSK moduláciu si môžeme predstaviť tak, že fázou nosného signálu pre logickú nulu neposúva a pre logickú jednotku posunie fázou nosného signálu o π . V praxi sa však s klasickou PSK moduláciou nestretneme, lebo jej technická realizácia je pomerne náročná a nie veľmi výhodná, častejšie sa používajú jej ekvivalenty [1, 3, 4, 7, 9]:

- Viacstavová PSK – MPSK (kde M je počet stavov),
- diferenciálna fázová modulácia DPSK (Differential Phase Shift Keying),
- binárna DPSK – DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying),
- kvadratúrna DPSK – DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying).

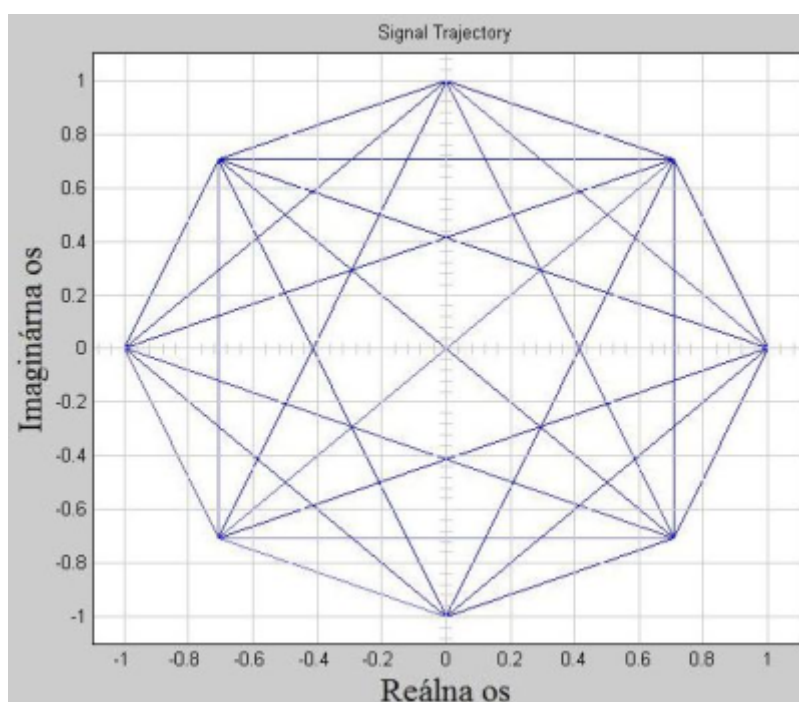


Obr. 1. Výstupný PSK signál v závislosti od vstupnej postupnosti.

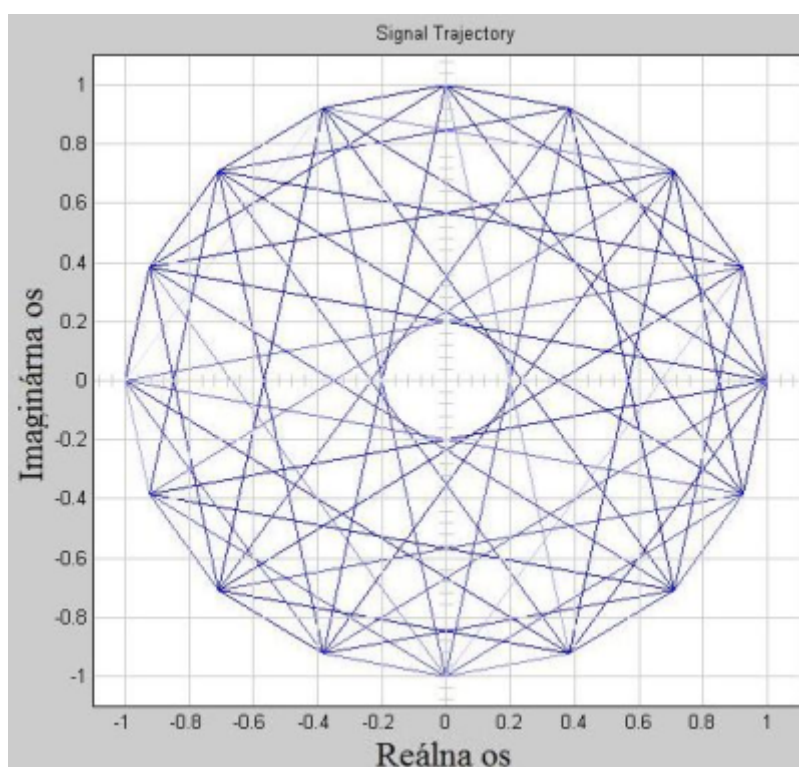
Na zníženie chybovosti pri viacstavových PSK moduláciách môžeme použiť Grayov kód (GK). Grayov kód je binárny kód s charakteristickou vlastnosťou – dva po sebe idúce stavy sa líšia navzájom len v jednom bite [5, 6]. V praxi to pre trojbitové postupnosti vyzerá tak, že stavy sú: (000, 001, 011, 010, 110, 111, 101 a 100).

3.1.1. Modulácie DMPSK a MPSK

Kedže diferenciálne modulácie sú jednoduchšie na implementáciu, je vhodné zaoberať sa nimi. Zásadný rozdiel medzi diferenciálnou a klasickou PSK spočíva v polohe stavov. Na obrázkoch je znázornený rozdiel vektorových diagramov medzi 8PSK (obr.2) a D8PSK (obr.3). Diferenciálne modulátory nemajú na rozdiel od klasických PSK modulátorov pevne určenú polohu jednotlivých stavov (ako je zobrazené na obr.4 a obr.5). Informácia je ukrytá, ako už názov napovedá, v zmene fázy. Čiže modulátor pričíta (resp. odčíta) posun fázy zodpovedajúci stavu, ktorý kóduje, k momentálnemu stavu fázy. Demodulátor následne porovnáva prichádzajúci stav fázy so stavom fázy po oneskorení (predošlým stavom) a interpretuje prijatý stav.



Obr. 2. Vektorový diagram pre 8PSK.



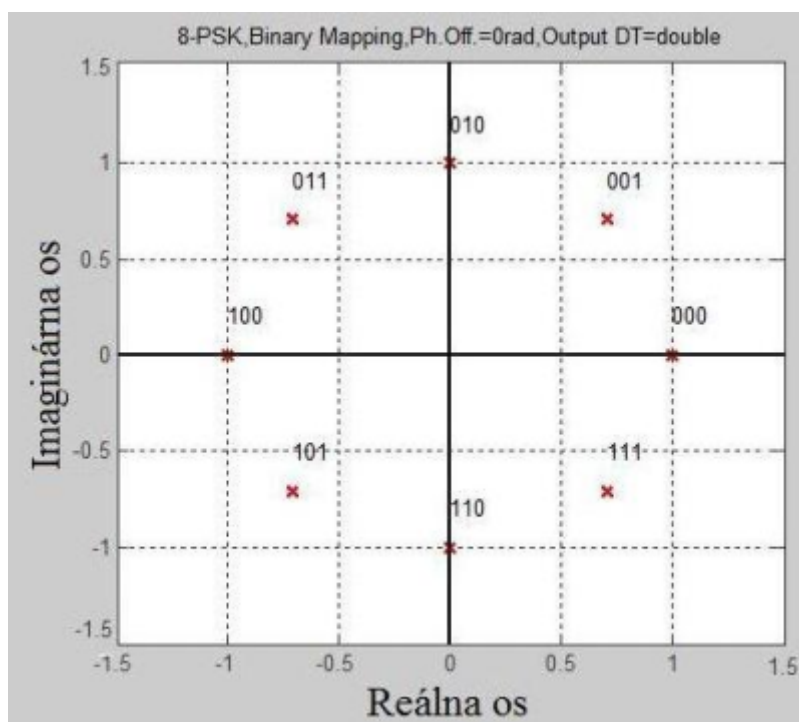
Obr. 3. Vektorový diagram pre D8PSK

4. Simulácie vybraných fázových modulačných techník

Simulácie sú vykonané v prostredí Matlab 2010 Simulink a pozostávajú z implementácie modulačných formátov do už existujúceho modelu prenosovej cesty, ktorý je realizovaný v prácach [10, 11, 12], keďže program neponúka blok na simuláciu optickej prenosovej cesty. Simulačné prostredie ponúka bloky určené pre simuláciu rôznych modulátorov, generátorov, meracích prístrojov, spracovania signálov a bloky matematických operácií. Ďalej sa uvažovalo s vlnovou dĺžkou 1310nm, tlmením 0,35dB/km, disperziou 3,0[ps/(nm.km)], čo sú parametre vlákna SMSI G.657A pri spomenutej vlnovej dĺžke, dĺžkou prenosovej trasy 12, 14, 16, 18 a 20 km, prenosovou rýchlosťou 1 a 10Gbit/s a výkonom $P=100\text{mW}$.

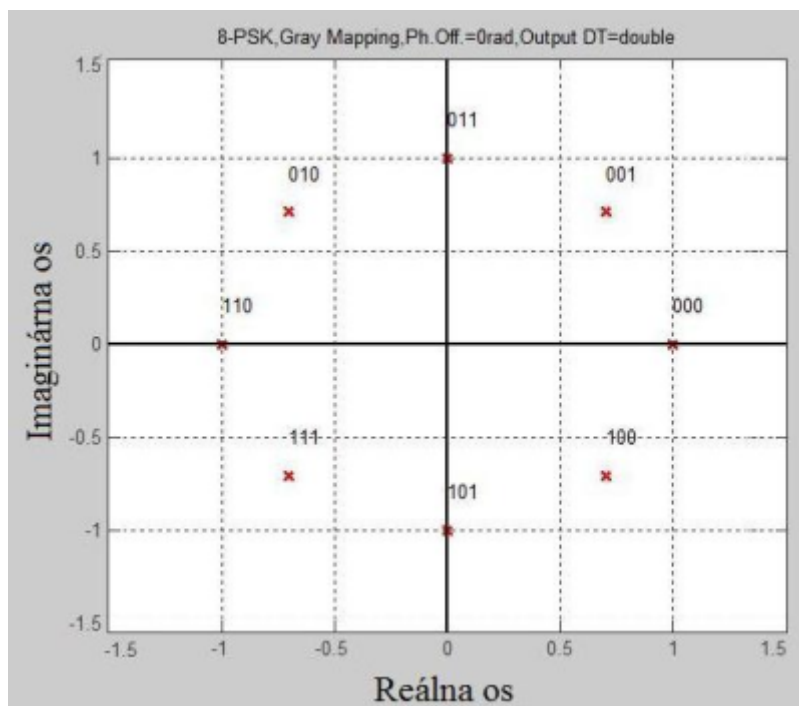
Pri výbere modulačných techník na simuláciu sú vybraté tie, ktoré sa javia ako najodolnejšie voči už spomínaným vplyvom, čiže modulačné techniky meniace fázu nosného signálu a s ohľadom na maximálnu možnú prenosovú rýchlosť sú zvolené viacstavové modulačné formáty. Tieto sú následne porovnané s amplitúdovou moduláciou OOK (On/Off Keying), ktorú nie je možné použiť pri vyšších rýchlostiach kvôli vzniku medzisymbolovej interferencie ISI (Inter Symbol Interference). Ako najvhodnejšia sa javí 8PSK, čiže osemstavová fázová modulácia.

Pri osemstavovej modulácii sú po prenosovom médiu - optickom vedení prenášané trojice bitov, keďže $2^3 = 8$. Jednotlivé stavy je možné vyjadriť ako komplexné čísla čiže ako kombináciu imaginárnej a reálnej zložky, resp. veľkosťou a uhlom vzhľadom na nulu. Jednotlivé stavy sú umiestnené s posunom o $\pi/4$ od seba. Výhodou 8PSK modulácie je vyššia možná prenosová rýchlosť, keďže jedna zmena fázy reprezentuje trojicu bitov vstupujúcich do modulátora. Nevýhodou je menšia vzdialenosť medzi jednotlivými stavmi vzhľadom na imaginárnu a reálnu os, ktorá môže viesť k väčšej chybovosti oproti modulačným technikám s menším počtom stavov. Štandardné rozmiestnenie stavov (binárna konštelácia) je zobrazené na obr.4.



Obr. 4. 8PSK – binárne rozmiestnenie stavov.

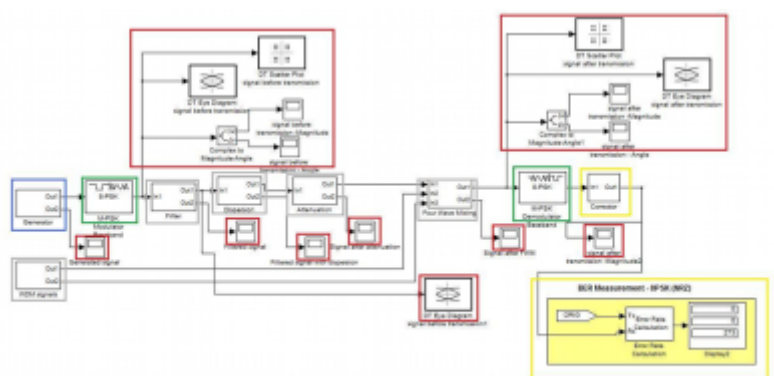
Keďže medzi stavom (111) - $7\pi/4$ a stavom (000) - 0π (resp. 2π) je rozdiel len $\pi/4$ a je medzi nimi maximálna Hammingova vzdialenosť - 3, čo v prípade chybného interpretácie vyslaného symbolu môže znamenať až trojnásobnú chybu, je výhodné použiť pri tejto modulačnej technike Grayov kód (GK). Posun $\pi/4$ medzi jednotlivými stavmi ostane zachovaný, zmenia sa len polohy jednotlivých stavov, resp. ich interpretácia pre vysielateľ a detektor - prijímač. Interpretácia jednotlivých stavov je zobrazená na obr.5.



Obr. 5. Rozmiestnenie stavov pri 8PSK s GK.

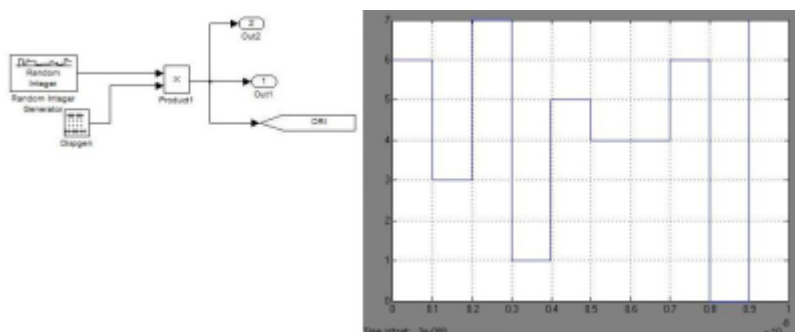
Pre jednoduchšiu orientáciu v simulačnom programe a blokoch, z ktorých pozostáva simulovaný model vedenia, modulátorov a demodulátorov je zobrazený obr. 6, v ktorom je kompletný model 8PSK a v ňom farebne vyznačené nasledovné časti:

- Modrá - Generátor signálu vstupujúceho do modulátora
- Zelená - Modulátor a demodulátor (v tomto prípade 8PSK s binárnym rozložením stavov)
- Šedá - Prvky prenosovej cesty
- Žltá - Prvky potrebné pre výpočet a zobrazenie BER
- Červená - Zobrazovacie a meracie prvky (zobrazovanie signálu v čase, diagram oka a závislosti imaginárnej a reálnej zložky)



Obr. 6. Model 8PSK.

Ako zdroj vstupných dát je potrebné pre účely simulácie použiť blok viacstavového generátora, ktorý generuje náhodne osem stavov (od 0 po 7), vstupujúcich do modulátora. Zapojenie generátora je na obr.7.



Obr. 7. Zapojenie generátora a jeho výstupný priebeh.

Pre možné overenie správnej funkcie bloku modulátora – striedaním všetkých stavov, je potrebné na generátore nastaviť počet stavov (M-ary number) na 8, ktoré bude náhodne striedať vo vzorkovacom čase (sample time) $1 \cdot 10^{-9}$, čo zodpovedá rýchlosti 1Gbit/s. V ideálnom prípade je použitý binárny generátor, ktorý strieda dve logické úrovne a to log.0 a log.1. Pre možnosť realizácie viacstavovej modulácie s binárnym generátorom je nevyhnutné pred blok modulátora zaradiť buffer s veľkosťou 3 bity pre 8PSK. Pri nezaradení bufferu pred modulátor, vznikne nesprávna interpretácia vstupného toku dát a modulovaný signál bude oscilovať len medzi dvoma stavmi z ôsmich.

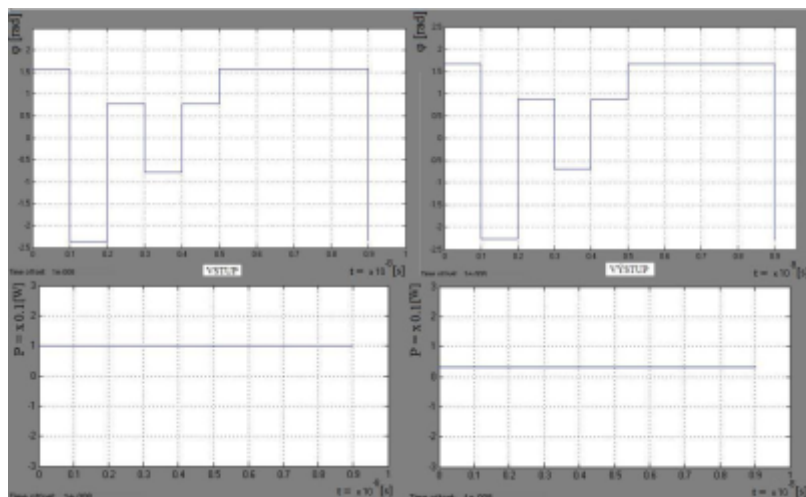
Zapojenie s binárnym generátorom však nie je možné použiť, kvôli formátu prenášaných dát (vznikajúcich v bloku bufferu), ktorý nekorešponduje s blokmi už existujúcej prenosovej cesty, do ktorej je implementovaný viacstavový modulačný formát. Na obr.8 je zobrazený výstup z modulátorov 8PSK s binárnym rozložením stavov a 8PSK s GK v závislosti od vstupných hodnôt (hodnôt vystupujúcich z generátora) – ich priebehy fáz v závislosti od času a ich obálka signálov, ktorú majú rovnakú.



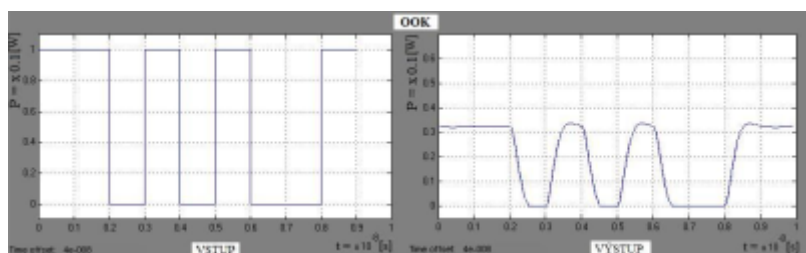
Obr. 8. Vstupy a výstupy z 8PSK modulátorov.

Na obr.9 môžeme vidieť obálku a fázu signálu, ktorý prešiel prenosovou cestou (výstup) v porovnaní so signálom vstupujúcim do prenosovej cesty. Amplitúda obálky po prechode prenosovou cestou je menšia oproti amplitúde vstupujúceho signálu, tento jav je zapríčinený blokom tlmenia v modeli prenosovej cesty, jeho hodnota je v tomto prípade 4,2dB, čo zodpovedá tlmeniu 0,35dB/km pri dĺžke 12km. Obe obálky sú zobrazené na obr.9 v dolnej polovici obrázku. V jeho hornej polovici sa nachádzajú priebehy zobrazujúce fázu prenášaného signálu.

Keď porovnáme vstupnú fázu s výstupnou, môžeme vidieť, že je medzi nimi rozdiel – výstupná hodnota je o niečo vyššia, je to spôsobené blokom disperzie, ktorý okrem rozšírenia obálky signálu v čase (čo nie je pri obálke PSK signálov pozorovateľné) aj mení fázu. Posun však v tomto prípade nie je tak výrazný, aby významným spôsobom ovplyvnil činnosť demodulátora a tým aj výslednú chybovosť. Na porovnanie týchto vplyvov aj s iným modulačným formátom je obr. 10, na ktorom je zobrazený vstup a výstup z prenosovej cesty pre modulačný formát OOK. Na tomto obrázku je jasne viditeľný vplyv disperzie a tlmenia na prenášaný signál.



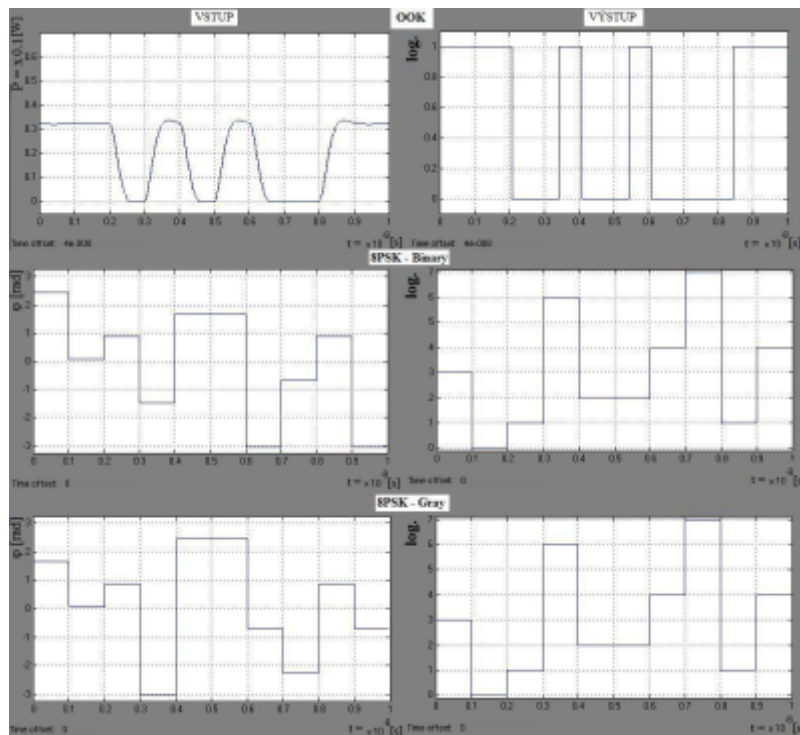
Obr. 9. 8PSK signál pred a po prechode prenosovou cestou.



Obr. 10. Obálka OOK signálu pred a po prechode prenosovou cestou.

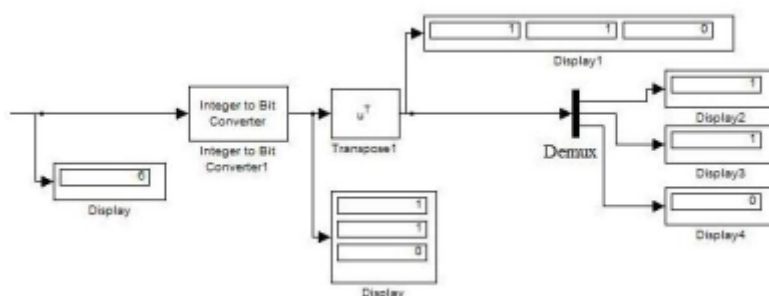
Pre správnu interpretáciu prijatého signálu potrebujeme správne nastavený demodulátor. Pre OOK demodulátor je potrebné nastaviť nižšiu rozhodovaciu úroveň, keďže úroveň signálu je pod preddefinovanou úrovňou (hodnota 50mW) a preto je vysoká chybovosť. Tento krok je možné urobiť, keďže OOK je dvojstavový modulačný formát a vplyv šumu a pod. nie je taký výrazný, aby mohol spôsobiť nesprávnu interpretáciu prijatého symbolu. Pri väčších dĺžkach simulovaného média však už musíme brať do úvahy aj tieto faktory, aby zbytočne nevznikala chybovosť nesprávnym nastavením rozhodovacej úrovne demodulátora.

Ak zostane prednastavená (v tomto prípade aj ideálna) hodnota, tak je tento modulačný formát pri vlastnostiach a dĺžke simulovaného optického média nepoužiteľný. Rozhodovacie úrovne pri OOK demodulátore sú nastavené pre jednotlivé dĺžky nasledovne: pre 12km - 25mW, pre 14km - 20mW, pre 16km - 18,75mW, pre 18km - 17,5mW a pre 20km - 15mW. Funkcia demodulátorov je zobrazená na obr. 11, kde na ľavej strane obrázka je vždy vstup do demodulátora a na pravej strane výstup z demodulátora.



Obr. 11. Funkcia demodulátorov.

Keď chceme porovnať charakter jednotlivých modulačných formátov na optickom prenosovom médiu je vhodné vyhodnotiť ich chybovosť – BER. Výpočet na pôvodnom modeli prenosového média je časovo veľmi náročný, preto je potrebné obmedziť počet prijatých bitov na 15000. Aby však pri tomto množstve bitov bolo možné porovnávať počet chýb, je potrebné zvýšiť chybovosť na prenosovej ceste pridaním bloku šumu AWGN. Analýza chybovosti prebehla na modeloch vlákna SMSI G.657A s použitím signálu o vlnovej dĺžke 1310nm pre dĺžky vlákna 12, 14, 16, 18 a 20km s použitím modulačných formátov 8PSK s binárnym mapovaním, 8PSK s Grayovým mapovaním (GK) a OOK pri rýchlostiach 1Gbit/s a 10Gbit/s. Pre možné poukázanie na výhodu využitia Grayovho kódu pri 8PSK moduláciách, je potrebné vyhodnocovať chyby po bitoch (výstupný formát z generátora a prenosovej cesty je osemstavový), preto je potrebné pre 8PSK modulácie zaradiť pred blok pre výpočet chybovosti ešte bloky na spracovanie hodnôt z generátora a výstupu z prenosovej cesty. Bloky na spracovanie hodnôt sú uvedené na obr.12 a pre prehľadnosť operácií sú pridané do schémy zobrazovacie prvky.



Obr. 12. Spracovanie hodnôt pre vyhodnotenie 8PSK chybovosti.

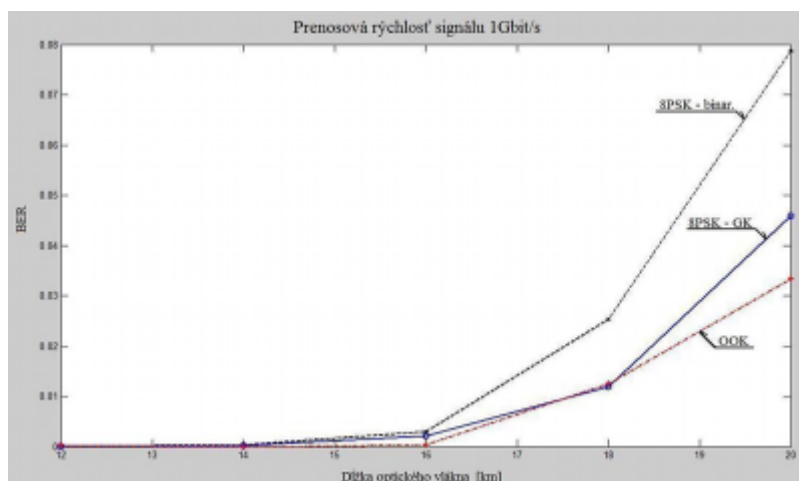
Spracovanie prebieha tak, že je vstupná logická hodnota (v rozmedzí od 0 do 7) konvertovaná príslušným blokom na bity (Integer to Bit Converter), ďalej je transponovaná na to určeným blokom (u^T), aby ju bolo možné rozdeliť na jednotlivé

bity. Táto transponovaná hodnota je potom rozdelená na jednotlivé bity blokom demultiplexora (v obrázku Demux). Tieto hodnoty sú následne porovnávané s rovnako upravenými prijatými hodnotami v blokoch pre výpočet BER. Namerané hodnoty sú uvedené v tab. č.1.

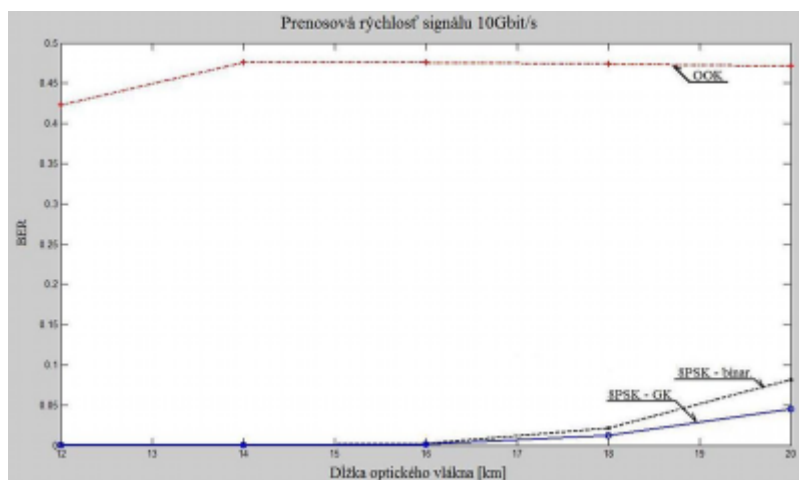
Tab. 1. Porovnanie chybovostí vybraných modulačných formátov.

BER		Dĺžka optického prenosového média				
		12km	14km	16km	18km	20km
Modul. formát, rýchlosť	8PSK - binar., 1Gbit/s	0.00013	0.00033	0.003	0.02533	0.0788
	8PSK - GK, 1Gbit/s	0.00013	0.0002	0.00213	0.01186	0.04593
	OOK, 1Gbit/s	0.0002	0	0.0003	0.0125	0.0333
	8PSK - binar., 10Gbit/s	0.00013	0.00013	0.00206	0.0214	0.0818
	8PSK - GK, 10Gbit/s	0.00013	0.00020	0.00146	0.01206	0.04553
	OOK, 10Gbit/s	0.4225	0.4759	0.4759	0.4736	0.4709

Tabuľka je spracovaná graficky, v obr. 13 je chybovosť pri rýchlosti 1Gbit/s a v obr. 14 chybovosť pre rýchlosť 10Gbit/s.



Obr. 13. Porovnanie chybovostí pri rýchlosti 1 Gbit/s.



Obr. 14. Porovnanie chybovostí pri rýchlosti 10 Gbit/s.

Modulačný formát OOK sa pri rýchlosti 1Gbit/s javí ako najvýhodnejší z hľadiska

chybovosti, je to zapríčinené veľkým odstupom medzi logickými úrovňami (keďže má len 2 logické úrovne). Pri rýchlosti 10Gbit/s je však už výrazný vplyv ISI zapríčinený disperziou a preto už nie je možné pri tejto rýchlosti použiť OOK. Pri vyšších rýchlostiach je možné použiť moduláciu 8PSK, ktorá je odolnejšia voči vplyvom znehodnocujúcim prenos. Ako najvýhodnejšia z hľadiska chybovosti sa javí 8PSK s Grayovým kódom.

5. Záver

V prostredí Matlab Simulink sú implementované modulačné formáty 8PSK s binárnym mapovaním, 8PSK s Grayovým mapovaním a OOK do modelu prenosovej cesty, ktorý zahŕňa parametre optického vlákna ako sú disperzia, tlmenie a efekt štvorvlnového zmiešavania FWM (Four Wave Mixing). Chybovosti jednotlivých modulačných formátov sú porovnané v tabuľke a graficky. Z nameraných výsledkov môžeme usúdiť, že formát OOK je výrazne obmedzený maximálnou prenosovou rýchlosťou. 8PSK modulácie sa javia ako výhodnejšie kvôli väčšej odolnosti voči vplyvom znehodnocujúcim prenos na optickom prenosovom médiu aj pri vyšších rýchlostiach a pri použití Grayovho kódu pri 8PSK je možné znížiť chybovosť oproti binárnemu usporiadaniu stavov. Vďaka týmto simulačným programom môžeme porovnať rôzne modulačné formáty, ktoré môžu byť po určení najvýhodnejšieho následne použité v reálnom optickom prenosovom médiu.

6. Odkazy na literatúru

1. ČERTÍK, Filip – MOKRÁŇ, Martin – ŠPIRKOVÁ, Miroslava: Modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. ŠVOČ 2012.
2. MOKRÁŇ, Martin: Fázové modulačné formáty v optickom prenosovom médiu. ŠVOČ 2013.
3. SCHIFF, Maurice: Introduction to Communication Systems Simulation. Artech House, 2006. 217 s. ISBN 15-9693-002-0
4. LANZ, Gergely: MODULAČNÉ TECHNIKY V OPTICKOM PRENOSOVOM MÉDIU. Bratislava, 2011. 53 s. EVIDENČNÉ ČÍSLO: FEI-5408-51286
5. BIHN, Le Nguyen: Optical Fiber Communications Systems: Theory, Practice, and Matlab Simulink Models. 2010. 534s. ISBN 14-3980-620-9.
6. DORAN, R.W. : The Gray Code. University of Auckland, 2007. [online] [Citované 9.4.2013] Dostupné z <http://www.cs.auckland.ac.nz/research/groups/CDMTCS/researchreports/304bob.pdf>
7. COSLOVICH, Andrea: MODULAZIONI DIGITALI E MODEM. [Citované 9.4.2013]. Dostupné na internete: <http://spazioinwind.libero.it/acoslovich/modudigi/modudigi.htm>
8. ČUCHRAN, Ján – RÓKA, Rastislav: Optokomunikačné systémy a siete. Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2006. 208 s. ISBN 80-2272-437-8.
9. BOHÁČ, Leoš – LUCKI, Michal: Optické komunikační systémy. Praha: České vysoké učení technické, 2010. 165 s. ISBN 978-80-01-04484-1.
10. ČERTÍK, Filip: Using Matlab Tools for Simulation of the optical Transmission Medium. In Technical Computing Bratislava 2012 [elektronický zdroj] : 20th Annual Conference Proceedings. Bratislava, 7.12. 2012. Bratislava: RT Systems, 2012, s. 8. ISBN 978-8-970519-4-5.
11. RÓKA, Rastislav – ČERTÍK, Filip: Modeling of enviromental influences at the signal

transmission in the optical transmission medium, International Journal of Communication Networks and Information Security Vol. 4, No. 3. S146- 162. ISSN 2073-607X.

12. RÓKA, Rastislav – ČERTÍK, Filip: The Nonlinear FWM Effect and its Influence on Optical Signals Utilized Different Modulation Techniques in the WDM Transmission Systems. OK 2012 – 24th Conference, Praha (Czech), 25.-26. 10. 2012, ISBN 978-8-86742-36-6.

Spoluautorom článku je doc. Ing Rastislav Róka, PhD., Ústav telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita, Ilkovičova 3, Bratislava 812 19
