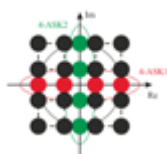


## Vplyv modulačných techník na kvalitu prenášaného signálu v optických vláknových komunikačných systémoch

Ružbarský Ján · Elektrotechnika

18.05.2016



V dôsledku nedokonalosti optických prenosových systémov a zvyšovaním nárokov na prenos cez tieto optické prenosové systémy je prenos v základnom pásme nedostačujúci. Aplikácia nových hardverových zariadení by bola buď technicky nerealizovateľná alebo cenovo nevýhodná, a preto sme začali používať úpravu signálu tak, aby získal odolnosť voči rušivým vplyvom, ktoré najviac znehodnocujú optické prenosové systémy a zároveň vyhovoval nárokom naň kladené. Takáto úprava signálu sa nazýva modulácia.

### 1. Úvod

Optické vlákna sa v súčasnosti stali novým prenosovým médiom, ktoré už v širokej miere nahradzujú doteraz používané metalické vodiče. Optické vlákna ako prenosový prostriedok sa rýchlo uplatnili v praxi hlavne vďaka množstvu výhod oproti metalickým vodičom. Medzi najväčšie výhody patria, vysoké prenosové rýchlosti, veľká šírka prenosového pásma a tiež aj odolnosť voči elektrostatickému a elektromagnetickému rušeniu.

Táto práca je zameraná najmä na vplyvy modulačných techník na kvalitu prenášaných signálov. Venuje sa tiež popisu signálu pomocou RZ a NRZ, kedy signál nadobúda lepšie spektrálne vlastnosti, vhodnejšie pre prenos v optickom prenosovom systéme. Podrobnejšie pojednáva o aplikácii QPSK a QAM modulácií na signály NRZ a RZ, a následný vplyv na prenos. V závere sú zhrnuté vlastnosti modulácií PPM, PSK, QAM. Tieto boli získané teoretickým výpočtom, ale aj simuláciou optického prenosového systému v porovnaní so Shannonovým limitom.

### 2. Modulácie v optických vláknových komunikačných systémoch (OVKS)

Jedným zo základných parametrov optických vláknových komunikačných systémov (OVKS), určujúcim do značnej miery parametre daného systému je spôsob modulácie optického signálu. Význam modulácie spočíva v ovplyvňovaní nosného optického signálu signálom nesúcim informáciu tak, aby bolo pomocou výsledného modulovaného signálu možné preniesť informáciu na čo najväčšiu vzdialenosť najvyššou možnou rýchlosťou a s čo najnižšími nákladmi. Ak uvažujeme koherentný optický prenosový systém, optický signál  $s(t)$  môžeme považovať za elektromagnetické vlnenie, ktoré v danom bode priestoru je možné opísať podobne ako elektrický signál

rovniciou kmitania:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi ft + \varphi_0) \quad (1)$$

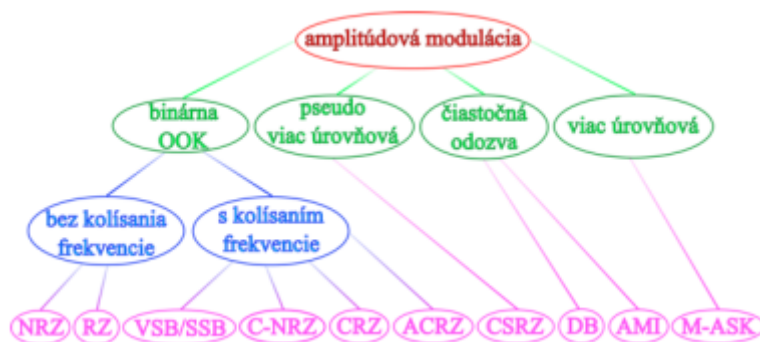
Z uvedeného vyplýva, že optický signál je možné rovnako ako elektromagnetické vlnenie modulovať troma základnými spôsobmi:

- Zmenou amplitúdy  $A$ , kedy hovoríme o amplitúdovej modulácii (AM), alebo v prípade digitálneho prenosu o kľúčovaní amplitúdovým zdvihom (ASK - Amplitude Shift Keying),
- Zmenou frekvencie  $f$ , kedy hovoríme o frekvenčnej modulácii (FM), alebo v prípade digitálneho prenosu o kľúčovaní frekvenčným zdvihom (FSK - Frequency Shift Keying),
- Zmenou fázy  $\varphi_0$ , kedy hovoríme o fázovej modulácii (PM), alebo v prípade digitálneho prenosu o kľúčovaní fázovým zdvihom (PSK - Phase Shift Keying).

Tri vyššie spomenuté typy modulácií je možné kombinovať, čím vzniknú tzv. hybridné modulácie, napríklad modulácie typu QAM (kvadratúrna amplitúdová modulácia). V prípade nekoherentného optického prenosu sa využívajú výlučne modulácie intenzity optického žiarenia, ktoré zodpovedajú metódam ASK. V tejto kapitole ďalej popíšeme niektoré druhy modulácií, ktoré sa využívajú v OVKS.

## 2.1 ASK modulácie

Modulácie typu ASK patria k najstarším a dodnes najpoužívanejším modulačným metódam v optických komunikáciách vďaka jednoduchšej konštrukcii modulátorov a demodulátorov v porovnaní s ostatnými metódami. Dlhodobým výskumom v oblasti amplitúdových optických modulácií bolo vyvinutých mnoho modulačných metód (Obr.1).



Obr. 1 Metódy amplitúdovej modulácie v OVKS

Najjednoduchšou optickou moduláciou je modulácia OOK (On-Off Keying). Ide o moduláciu, pri ktorej sa hodnota informačného bitu prenáša zapnutím alebo vypnutím optického žiarenia. Podľa použitého linkového kódu sa vyskytuje v dvoch variantoch, a to RZ (return to zero) pri využití kódu s návratom k nule a NRZ (non-return to zero) s kódom bez návratu k nule. RZ modulácie majú vyššiu odolnosť proti nelineárnym vplyvom vlákňového spoja a menšie požiadavky na citlivosť prijímača v porovnaní s NRZ. Naopak NRZ sú odolnejšie voči chromatickej disperzii [1].

Pre dosiahnutie vyššej spektrálnej a výkonovej účinnosti a zvýšenie odolnosti nelineárnemu skresleniu sa v OVKS využívajú modulácie SSB (single side band - modulácia s jedným postranným pásmom) a VSB (vestigial side band - modulácia s

čiastočne potlačeným postranným pásmom). Ako vyplýva z názvu, pri modulácii SSB sa prenáša len jedno postranné pásmo signálu, čo podstatne znižuje potrebnú šírku pásma i výkon. Nevýhodou SSB modulácie však je vyššia zložitosť modulátora i demodulátora. Nevýhodou tiež je obálka signálu s výraznými špičkami, ktoré zapríčiňujú náchylnosť k SPM [2]. Kompromis medzi zložitostou a spektrálnou účinnosťou predstavuje modulácia VSB. Na rozdiel od SSB modulácie je v nej ponechaná aj malá časť druhého postranného pásma. Obchádza sa tak potreba strmého filtra v modulátore, zároveň sa zjednodušuje demodulácia signálu [3]. Vďaka menšiemu dynamickému rozsahu obálky je VSB signál odolnejší voči SPM [2].



Obr. 2 Porovnanie spektier signálov DSB, VSB a SSB

## 2.2 PSK modulácie

Pri amplitúdovej (intenzitnej) modulácii je číslicový signál reprezentovaný okamžitou úrovňou optického výkonu. Podobne môže byť tento signál daný aj fázou optického signálu, čo sa označuje ako optická PSK modulácia. Rovnako ako pri ASK moduláciách, aj PSK modulácií existuje mnoho typov (Obr. 3). Rozdeliť ich môžeme podľa počtu stavov na binárne a viacstavové, potom ďalej podľa použitého linkového kódu (RZ a NRZ modulácie) [2].



Obr. 3 Delenie PSK modulácií

### 2.2.1 Non-Return Zero Differential PSK (NRZ-DPSK)

V optickom DPSK signáli s NRZ kódovaním je optický výkon v čase konštantný. Napriek tomu optické pole sa pohybuje medzi 1 a -1 (fáza sa mení medzi 0 a  $\pi$ ), teda priemerná intenzita optického poľa je nulová. Následkom toho sa v spektre poľa NRZDPSK signálu nenachádza nosná zložka, čo je výrazný rozdiel v porovnaní s NRZ-OOK, kde je nosná zložka výrazná. Vďaka konštantnému optickému výkonu by mal byť DPSK signál odolný voči vplyvom nelineárnych javov zapríčiňujúcich rušivú moduláciu výkonu ako je SPM a XPM. Napriek tomu nie je úplne odolný ak uvažujeme chromatickú disperziu. Fázová modulácia môže byť vplyvom GVD prevedená na intenzitnú moduláciu, následne dochádza k skresleniu signálu SPM a XPM. V

dialkových DPSK spojoch s optickými zosilňovačmi je limitujúcim faktorom zvyčajne nelineárny fázový šum. Šum zosilnenej spontánnej emisie (superluminiscencie) generovaný optickými zosilňovačmi je Kerrovým javom vo vlákne premenený na fázový šum, čím skresľuje fázu prenášaného signálu [3].

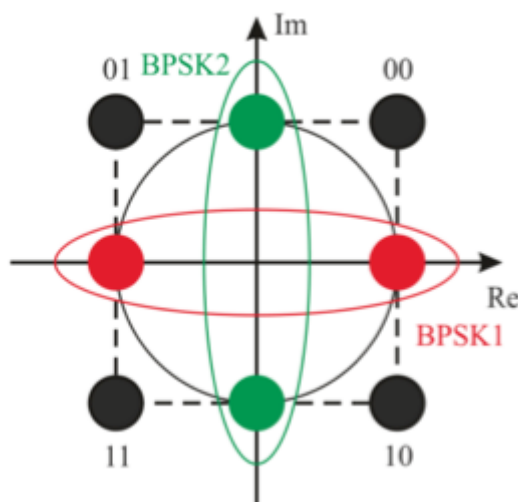
### 2.2.2 Return Zero Differential PSK (RZ-DPSK)

Pre zvýšenie odolnosti nelineárnemu skresleniu a zvýšenie maximálnej dĺžky spoja bola navrhnutá DPSK modulácia s návratom k nule (RZ-DPSK). V tomto modulačnom formáte sa na médiu v každej bitovej perióde objaví optický impulz nesúci informáciu uloženú v jeho fáze. Rovnako ako v NRZ-DPSK sa logická „1“ kóduje zmenou fázy o  $\pi$  vzhľadom na predchádzajúci symbol, „0“ sa prenáša bez zmeny. Šírka optického impulzu je menšia ako bitová perióda, signál sa teda vracia na nulovú úroveň výkonu v každej perióde. RZ-DPSK sa kvôli prídavnej intenzitnej modulácii niekedy označuje aj ako intenzitne modulovaná DPSK (IM-DPSK).

V RZ-DPSK nie je intenzita optického signálu konštantná, čo signál robí náchylnejším na SPM. Dochádza tiež k rozšíreniu spektra signálu vzorkovaním úzkymi impulzmi, čo zapríčiňuje výraznejšie ovplyvňovanie signálu chromatickou disperziou. Napriek tomu je často v dialkových prenosových systémoch možné účinne disperziu kompenzovať, čo je RZ formátom uľahčené vďaka jeho pravidelnosti [3, 4].

### 2.2.3 Quadrature PSK (QPSK)

Výhodou QPSK modulácie v porovnaní s OOK či DPSK je dvojnásobná spektrálna účinnosť, resp. polovičná symbolová rýchlosť pre dosiahnutie rovnakej bitovej rýchlosti. QPSK signál môže byť generovaný pomocou fázového modulátora alebo zloženej štruktúry pozostávajúcej z troch Mach-Zehnderových modulátorov (MZM). Generovanie pomocou fázového modulátora je síce jednoduchšie s lacnejšou implementáciou, nedostatkom však je konverzia fázového šumu na intenzitný. Z tohto dôvodu je väčšina QPSK vysieláčov založená na použití troch MZM.



Obr. 4 Vznik QPSK skladaním BPSK symbolov

Zložením dvoch BPSK signálov s fázovým rozdielom  $\pi/2$  vzniká QPSK signál ako je znázornené na Obr. 4. Vplyvom interferencie dva BPSK signály označené na Obr. 4

modrou a červenou farbou zaniknú za vzniku QPSK symbolov (označené čiernou farbou). QPSK signál môže v čase nadobúdať 4 hodnoty fázy ( $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/4$ ), každý symbol teda môže preniesť dva informačné bity. Symboly QPSK sú spravidla kódované Grayovým kódom (rozdiel práve v 1 bite medzi susednými hodnotami), čo zabezpečuje minimalizáciu bitovej chybovosti v prípade chybnnej demodulácie [2].

## 2.3 FSK modulácie

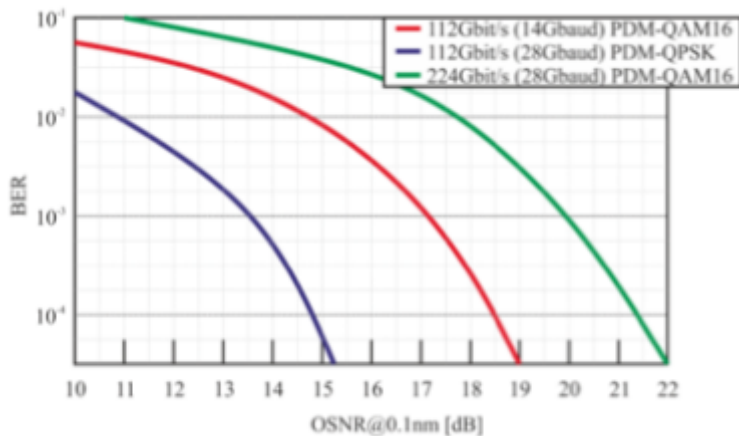
Optická FSK modulácia sa v posledných rokoch teší veľkej pozornosti v oblasti výskumu. Vďaka konštantnej intenzitnej obálke môže byť FSK signál vhodný pre využitie v mnohých aplikáciách. V prvotných FSK vysielačoch sa využívala priama modulácia optickej frekvencie laserového zdroja, ktorej rýchlosť bola limitovaná časovou odpoveďou lasera. Inou možnosťou generovania FSK signálu je využitie optických fázových modulátorov. Po privedení dvoch fázovo modulovaných signálov do oneskorovacích interferometrov (optical delay interferometer) sa z nich stávajú dva komplementárne intenzitne modulované signály, ktoré spolu tvoria FSK signál. Nevýhodou tohto zapojenia je potreba dvoch laserových zdrojov vo vhodnom frekvenčnom odstupe [5, 6].

## 2.4 Hybridné modulácie

Hybridné modulačné metódy reprezentujú kombináciu iných typov fundamentálnych modulácií. Kombináciou modulácií, pri ktorých dochádza k ovplyvňovaniu len jedného parametra vieme lepšie využiť modulačné techniky, vďaka čomu dochádza k zefektívneniu prenosu. Jedným z typov hybridných modulačných metód je kvadrátúrna amplitúdová modulácia QAM, pri ktorej dochádza k modulácii pri zmene amplitúdy a fázy. V nasledujúcej kapitole je táto metóda podrobnejšie opísaná.

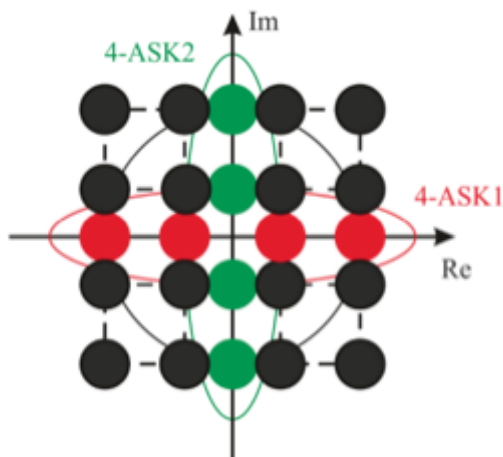
### 2.4.1 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) 16 stavová

16-stavová modulácia QAM16 umožňuje zdvojnásobenie spektrálnej účinnosti v porovnaní s QPSK a redukuje symbolovú rýchlosť potrebnú pre zabezpečenie rovnakej bitovej rýchlosti. To však za cenu vyššieho požadovaného optického odstupe signál-šum (OSNR) a horších vlastností v lineárnom i nelineárnom prenosovom režime kvôli prítomnosti viacerých intenzitných úrovní. Napríklad QPSK signál požaduje o 6,8 dB nižšie OSNR ako QAM16 pre rovnakú symbolovú rýchlosť 28 GBaud a o 3,8 dB nižšie OSNR pre konštantnú bitovú rýchlosť 112 Gbit/s, ako je vidieť z Obr. 5 [2]. QAM16 vyžaduje tiež komplexnejšie spracovanie signálu v porovnaní s jednoduchšími moduláciami, keďže sa pri prijíme využíva adaptívna ekvalizácia a odhad fázy nosnej.



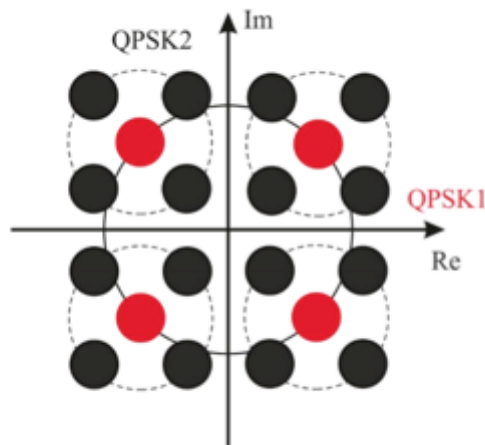
Obr. 5 Porovnanie teoretickej chybovosti QAM-16 a QPSK

Existuje viac techník generácie signálu QAM16. Jedným z najvýznamnejších je postup generovania QAM16 signálu skladaním dvoch 4-stavovo modulovaných signálov. Najjednoduchšia implementácia zahŕňa privedenie dvoch elektrických signálov s rovnomerne rozloženými úrovňami napätia na elektródy I-Q modulátora pracujúceho v lineárnej časti prevodovej charakteristiky. Tieto signály generujú dva optické 4-ASK signály, ktorých syntézou vzniká QAM16 signál. Princíp skladania je znázornený na Obr. 6. Ak sa na riadenie I-Q modulátora využijú elektrické signály s vhodným nerovnomerným rozložením úrovní, môže modulátor pracovať v rozsahu celej prevodovej charakteristiky. Vďaka tomu je možné využiť plnú modulačnú hĺbku a potlačiť šum niektorých modulačných symbolov [2].



Obr. 6 QAM-16 modulácia pomocou 4-ASK signálov

Podobným spôsobom je možné generovať QAM16 signál skladaním dvoch optických QPSK signálov v MZI. Princíp skladania je naznačený na Obr. 7. QPSK signál s vyššou amplitúdou určuje kvadrant komplexnej roviny, kde sa bude daný symbol nachádzať, zatiaľ čo druhý signál s amplitúdou nižšou o 6 dB ďalej vychyluje bod daný silnejším signálom na jednu zo 4 výsledných pozícií [2].



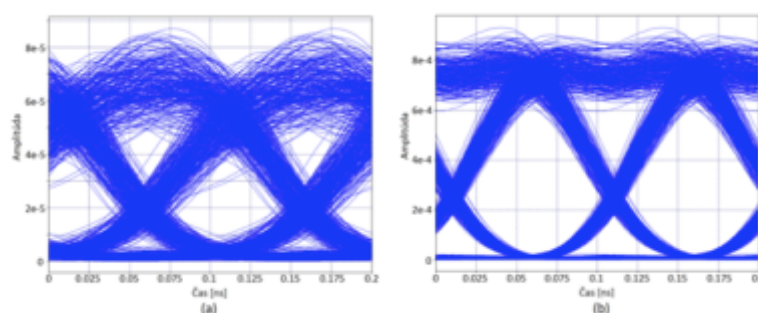
Obr. 7 Generovanie QAM-16 pomocou dvoch QPSK signálov

### 3. Výsledky experimentov

Z pohľadu použitia sa musíme pozeráť na prenosový systém z viacerých pohľadov. Keďže pri väčších vzdialenostiach sa v OVKS prejavujú aj ďalšie parazitné javy, je nutné výber modulácie prehodnotiť. Je tiež nutné pozrieť sa na vstupný formát signálu, ktorý sa bude modulovať. V nasledujúcich kapitolách sa budeme venovať prenosovým systémom založených na QPSK a QAM moduláciách a taktiež aj NRZ RZ.

#### 3.1 Quadrature PSK

Experimenty ukazujú, že pre QPSK moduláciu je lepšie použiť NRZ. NRZ má lepšie spektrálne vlastnosti, keďže hlavné výkonové zložky sú sústredené okolo hlavnej zložky. RZ má širšie spektrum postranných frekvencií. Po modulácii sa ukazuje, že z pohľadu prenosu je lepší signál NRZ (Obr. 8). Prechod medzi stavmi je plynulejší ako pre RZ.



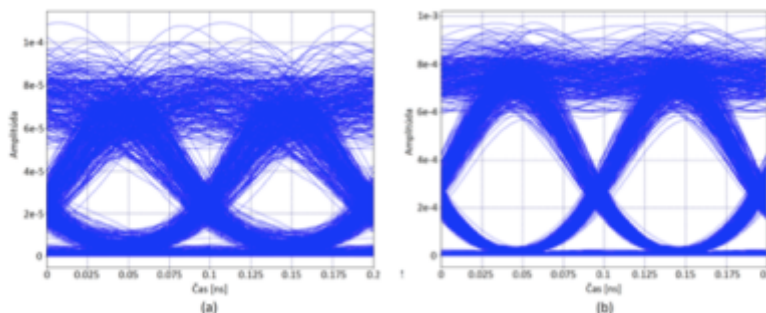
Obr. 8 Diagram oka a) RZ, b) NRZ

#### 3.2 QAM

Pri vyššej prenosovej rýchlosti je menšia úspešnosť rozpozitia szmbolu na výstupe prenosového systému. To má za následok vyššie požiadavky na prenosový kanál napríklad SNR. Z Obr. 9 je zrejmé, že pre odlišné prenosové rýchlosti nastávajú viditeľné zmeny. To má vplyv aj na celkový prenos systému. Po zakomponovaní bloku, ktorý odstraňuje "interleaving" by malo dôjsť k zlepšeniu chybovosti systému. Ani po aplikácii bloku odstránenia prekryvania symbolov sme nedosiahli veľmi veľké



zlepšenie. Dalo by sa povedať, že nenastala takmer žiadna zmena.



Obr. 9 Diagram oka QAM-16 a) 30 Gbaud, b) 15 Gbaud

#### 4. Záver

Z uskutočnených simulácií a výpočtov vyplýva, že použitím modulácie vieme vo veľkej miere zvýšiť bitovú rýchlosť prenosu. Cenou za toto zrýchlenie pre vyššie rády modulácie sú však zvýšené nároky na prenosový kanál. Pre BPSK a QPSK to však tak celkom neplatí. Pri QPSK dosahujeme dvojnásobnú bitovú rýchlosť oproti BPSK, pričom bitová chybovosť sa takmer nemení. Preto sa QPSK používa pomerne často.

V najmodernejších systémoch sa používajú skôr kombinácie modulácií a prístupových metód. BPSK/QPSK sú použiteľné v prenosových kanáloch, kde je aj pomerne veľký šum oproti vysielanému signálu. Do tejto kategórie však nespádajú optické vláknové spoje keďže rušenie je tam o dosť menšie ako vo FSO. Pre vyššie rády PSK a QAM potrebujeme veľký odstup signálu od šumu, preto ju vieme aplikovať v systémoch metalického a optického káblového spojenia. V týchto systémoch vieme pomerne dobre minimalizovať šum. Z teoretického výpočtu vyplýva, že najvhodnejšia modulácia pre OKS je 64 PSK a 256 QAM. Avšak teoretické a simulované výsledky sa líšia. Z odsimulovaných výsledkov je zrejmé, že pri rovnakých vstupných parametroch vybraná modulácia nedosahuje očakávanú spektrálnu účinnosť pri známom SNR. S narastajúcim rádom modulácie sa samozrejme zvyšuje aj náročnosť fyzickej realizácie obvodov. Čo je tiež jeden z faktorov pri výbere modulácie a jej aplikácie.

#### Literatúra

1. E. Foresteri, "Optical Communication Theory and Techniques," Springer, ISBN 978--387-23136-5, 2005.
2. K. I. A. Sampath and K. Takano, "Optical VSB Modulation Based on Phase-shift Method and its PAPR Characteristics for Optical BPSK Transmission", OECC/ACOFT, Melbourne, 2014.
3. L. N. Binh, "DWDM VSB modulation-format optical transmission: Effects of optical filtering and electrical equalization," Optics Communications, Volume 281, Issue 19, p. 4862-4869, oct. 2008.
4. R Hui, S. Zhang, B. Zhu, R. Huang, C. Allen and D. Demarest, "Advanced Optical Modulation Formats and Their Comparison in Fiber-Optic Systems ," The University of Kansas and Sprint Corporation, ITTC-FY2004-TR-15666-01, 2004.
5. J. M. Kahn, H. Keang-Po, "Spectral efficiency limits and modulation/detection techniques for DWDM systems," in Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of , vol.10, no.2, pp.259-272, March-April 2004.



- 
6. T. Kawanishi and M. Izutsu, "Optical Frequency Shift Keying Modulator," Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, Vol.53, No.3, 2006.
- 

Spoluautorom článku je Ing. Ľuboš Ovseník, PhD., Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií, FEI TUKE, Slovenská republika

---