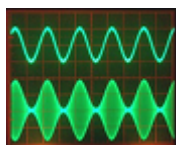


## Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu

Čertík Filip · Elektrotechnika, Informačné technológie, Študentské práce

21.09.2011



Práca sa zaoberá rôznymi typmi modulačných techník a opisom optického prostredia ktoré v ňom používame. V práci je zobrazený návrh a simulovanie najpoužívanejších modulačných techník pri prechode cez optické prenosové prostredie s lineárnymi efektmi, ktoré znehodnocujú prenos. V závere práce je zobrazené vyhodnotenie a porovnanie týchto modulačných metód.

### 1. Úvod

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

Existuje však niekoľko možných modulácií, pričom každá je charakteristická inými parametrami. Keďže každá prenosová cesta má iné parametre, je potrebné pochopiť pre aké parametre je daná modulácia najvhodnejšia, aby sme čo najviac zefektívniili prenos dát. Táto práca sa zaoberá práve moduláciami v optických prenosových systémoch, podrobne rozoberá ich vlastnosti, ktoré sú ďalej použité spolu s parametrami optického vlákna v simulátore.

### 2. Parametre optických vlákien ako prenosového média

Každé optické vlákno predstavuje prenosový systém, ktorý je frekvenčne závislý. Prenos závisí od šírky prenášaného pásma a je znehodnocovaný:

a) *lineárnymi efektmi:*

- Tlmenie
- Disperzia
  - chromatická disperzia (vzhľadom k materiálu, k vlnovej dĺžke a profilu),
  - polarizačná módová disperzia PMD (Polarization Mode Disperzion)

b) *nelineárnymi efektmi:*

- Vlastná fázová modulácia SPM (Self Phase Modulation),
- Krížová fázová modulácia XPM (Cross Phase Modulation),
- Krížová polarizačná modulácia XPolM (Cross Polarization Modulation),
- Štvorvlnové zmiešavanie FWM (Four Wave Mixing),
- Stimulovaný Ramanov rozptyl SRS (Stimulated Raman-Scattering)
- Stimulovaný Brillouinovo rozptyl SBS (Stimulated Brillouin-Scattering)

V našom prípade budeme uvažovať prenos s nasledujúcimi faktormi tlmenie, chromatická disperzia a polarizačná módomá disperzia.

## 2.1 Tlmenie

Najdôležitejšou charakteristikou optických vlákien je tlmenie. Tlmenie predstavuje prenosové straty. Je to vlastne strata výkonu závislá od dĺžky prenosovej cesty. Rozvoj optických vlákien nastal až vtedy, keď ich prenosové straty boli menšie, ako straty koncových vedení (t.j. menej ako 5 dB/km). Celkové tlmenie signálu  $a$  ( dB ) je definované pre určitú vlnovú dĺžku, ktoré sa vyjadruje vzťahom:

$$a(\text{dB}) = 10 \log(P_i/P_0) \quad (1)$$

kde  $P_i$  je vstupný a  $P_0$  je výstupný výkon optickej trasy. Tlmenie optického vlákna v jednotkách dB/km sa označuje  $\alpha$  podľa vzťahu:

$$\alpha(\text{dB/km}) = (10 * \log(P_i/P_0))/L = a/L \quad (2)$$

kde  $L$  - je dĺžka optického vlákna [km]. Tlmenie v optickom vlákne je spôsobené najmä materiálými absorpčnými stratami, lineárnym a nelineárnym rozptylom a stratami spôsobenými ohybom [1],[2].

## 2.1 Disperzia

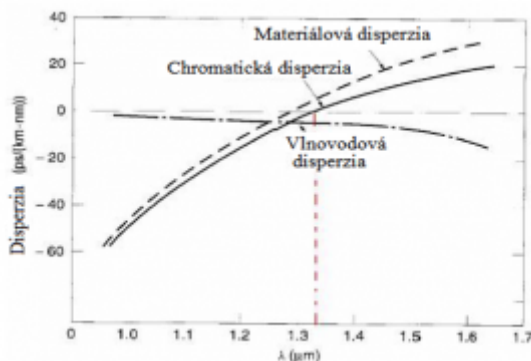
Ďalším zdrojom strát môže byť módomá disperzia, spôsobená nerovnakou dĺžkou prenosových dráh pre jednotlivé módy, a chromatická disperzia. Disperzia je zapríčinená tým, že je nemožné vytvoriť úplne monochromatický zdroj svetla. Chromatická disperzia závisí od frekvenčného pásma svetelného zdroja a čím je menšie toto frekvenčné pásmo, tým je menšia disperzia. Zväčšuje sa pri odlišnej vlnovej dĺžke svetla.

U mnohomódových vlákien nemá chromatická disperzia veľký význam. Tu sa skôr uplatňuje módomá disperzia. Pri módovej disperzii každý lúč dorazí vďaka rozdielnosti ich dĺžky dráh na koniec vlákna v inom časovom okamihu. U jednomódových vlákien sa viac uplatňuje chromatická disperzia, lebo módomá disperzia tam nevzniká. Celkovo je však disperzia v jednomódových vláknach podstatne menšia než u iných typov vlákien [2],[3].

Chromatická disperzia je spôsobená tým, že jednotlivé vlnové dĺžky sa šíria vláknom odlišnou rýchlosťou a závisí od šírky spektra vyžiareného zo zdroja. Impulz šíriaci sa vláknom sa dôsledkom disperzie časovo rozšíri a na konci vlákna sa jednotlivé impulzy začínajú zlievať, vzniká medzysymbolová interferencia ISI (Inter Symbol Interference). Chromatická disperzia sa skladá z

- materiálovej disperzie
- vlnovodovej disperzie

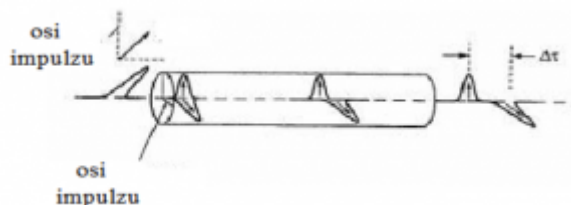
Chromatická disperzia je daná súčtom materiálovej a vlnovodovej disperzie [2],[3],[4]. Priebehy materiálovej a vlnovodovej disperzie sú na obr. 1



Obr. 1. Chromatická disperzia v závislosti od vlnovej dĺžky.

Pri jednomódových vláknach vzniká Polarizačne módová disperzia PMD, ktorá je spôsobená rozložením lúča na dve roviny. To vedie k rozdielnemu skupinovému oneskoreniu DGD (Differential Group Delay) medzi dvoma ortogonálne polarizovanými módmi. PMD je popísaná pomocou parametra DPMD. Parameter DPMD má rozmer [ps/km] a je daný rovnicou:

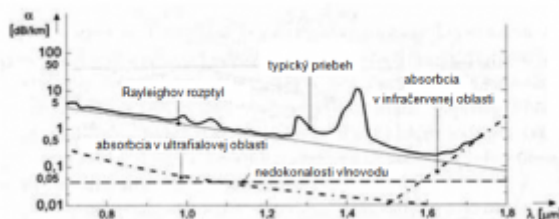
$$\Delta\tau = D_{PMD}\sqrt{L} \quad (3)$$



Obr. 2. Vplyv PMD na časové oneskorenie.

Výsledná disperzia pozostáva z chromatickej disperzie a polarizačnej módovej disperzie [1],[2],[3],[4]. Pre výslednú disperziu platí vzťah:

$$D = \sqrt{D_{ch}^2 + D_{PMD}^2} \quad (4)$$



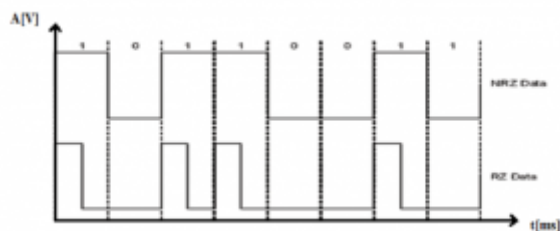
Obr. 3. Priebeh merného tlmenia vlákna a použiteľnej vlnovej dĺžky.

### 3. Modulačné formáty

Tieto formáty popisujú ako sú reprezentované jednotlivé impulzy. Poznáme dva základné modulačné formáty:

- NRZ bez návratu k nule (Non Return To Zero),
- RZ s návratom k nule (Return To Zero).

Názorné porovnanie NRZ a RZ formátov je na obr.4



Obr. 4. NRZ a RZ formát.

### 3.1 Modulačný formát NRZ

NRZ je najjednoduchším modulačným formátom. Pulz NRZ formátu sa generuje počas celej doby trvania jedného bitu. Táto metóda sa používa hlavne pri modulačných formátoch, ktoré pracujú so systémami ASK s priamou detekciou. Dôvodov pre použitie NRZ :

- tento variant nie je citlivý na šum fázy laserového zdroja
- vyžaduje relatívne nízku elektrickú šírku pásma pre vysieláč aj prijímač
- má najjednoduchšiu konfiguráciu vysieláča a prijímača
- impulzy majú úzke optické spektrum
- zredukovaná spektrálna šírka zlepšuje odolnosť voči disperzii
- úzke spektrum NRZ impulzu je výhodné pre lepšiu realizáciu WDM a DWDM systémov

nevýhody:

- zredukovaná spektrálna šírka má za následok nárast ISI medzi jednotlivými impulzmi.
- nie je vhodný pre vysoké rýchlosti a diaľkové prenosy [1],[2].

### 3.2 Modulačný formát RZ

Charakteristická dĺžka trvania intervalu modulačného formátu RZ je polovičná oproti formátu NRZ . Pri unipolárnom formáte RZ je binárna jednotka reprezentovaná ako kladný impulz pre pol periódy  $T_b$  a na druhej pol perióde je nulový (vracia sa k nule). Tento formát je lepší pri signalizácií, ale jeho spektrálna šírka je väčšia ako pri formáte NRZ. Táto spektrálna šírka (optické spektrum) znižuje odolnosť voči disperzii a zároveň klesá spektrálna účinnosť WDM systémov založených na RZ formáte. RZ obsahuje jednosmernú zložku. Výhody RZ:

- umožňuje zvýšenie odolnosti voči nelineárnym efektom
- potlačenie vplyvu ISI
- potlačenie vplyvu účinkom PMD v optickom vlákne.
- formát RZ zlepšuje citlivosť prijímača až o 3 dB.

Vzhľadom k jeho širšiemu spektru režim prevádzky (duty cycle) RZ impulzov je menší ako 1. Zo zredukovania šírky impulzu vyplýva širšie spektrum a práve pre tento fakt nie je tento modulačný formát zaujímavý pre implementáciu v DWDM systémoch.

Vyšší optický výkon na kanál možno tolerovať vo WDM systémoch , čo má za následok maximalizáciu prenosovej dĺžky. RZ modulačný formát je používaný pre diaľkové optické komunikačné systémy pracujúce pri vyšších bitových rýchlostiach [1],[2].

#### 4. Vlastnosti a výsledky vybraných modulačných techník

Pri vyberaní vhodných modulačných techník treba uvažovať ako bude konkrétna modulácia vplývať na prenosovú cestu. Vplyvy týkajúce sa prenosovej cesty:

- dĺžka prenosovej cesty (dĺžka prenosového média v km )
- typ cesty
- zdroj informácií

Pri realizácii reálneho optického vlákna som si vybral 4 typy digitálnych modulácií: DBPSK, DQPSK, OOK, BFSK

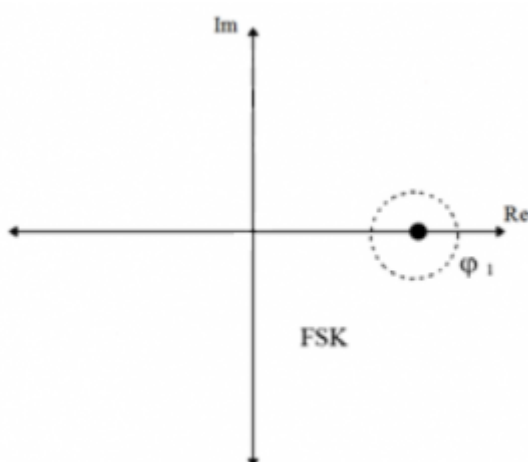
##### 4.1 BFSK (Binary Frequency Shift Keying)

Je to jedna z prvých používaných typov modulácií. Je to univerzálna forma zo schémy FSK. Používa 2 odlišné frekvencie na reprezentáciu binárnej 1 a 0

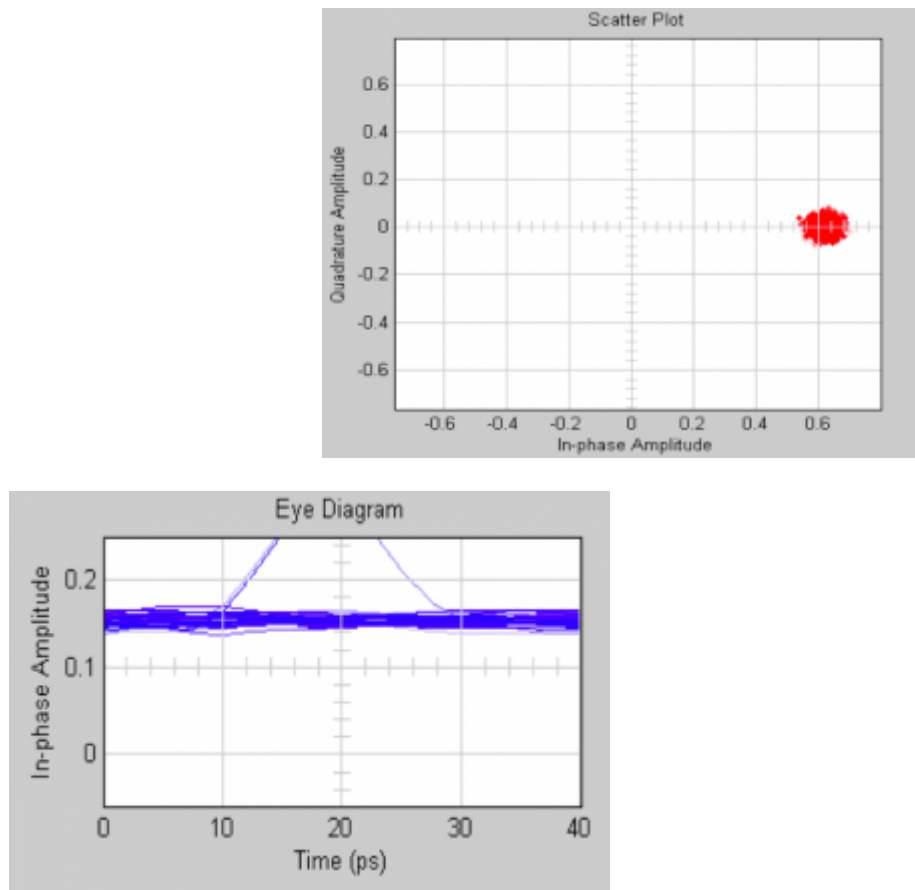
$$\bullet s_1(t) = A\cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), kT_b \leq t \leq (k+1)T_b, \text{ pre } 1 \text{ (5)}$$

$$\bullet s_2(t) = A\cos(2\pi f_2 t + \varphi_2), kT_b \leq t \leq (k+1)T_b, \text{ pre } 0 \text{ (6)}$$

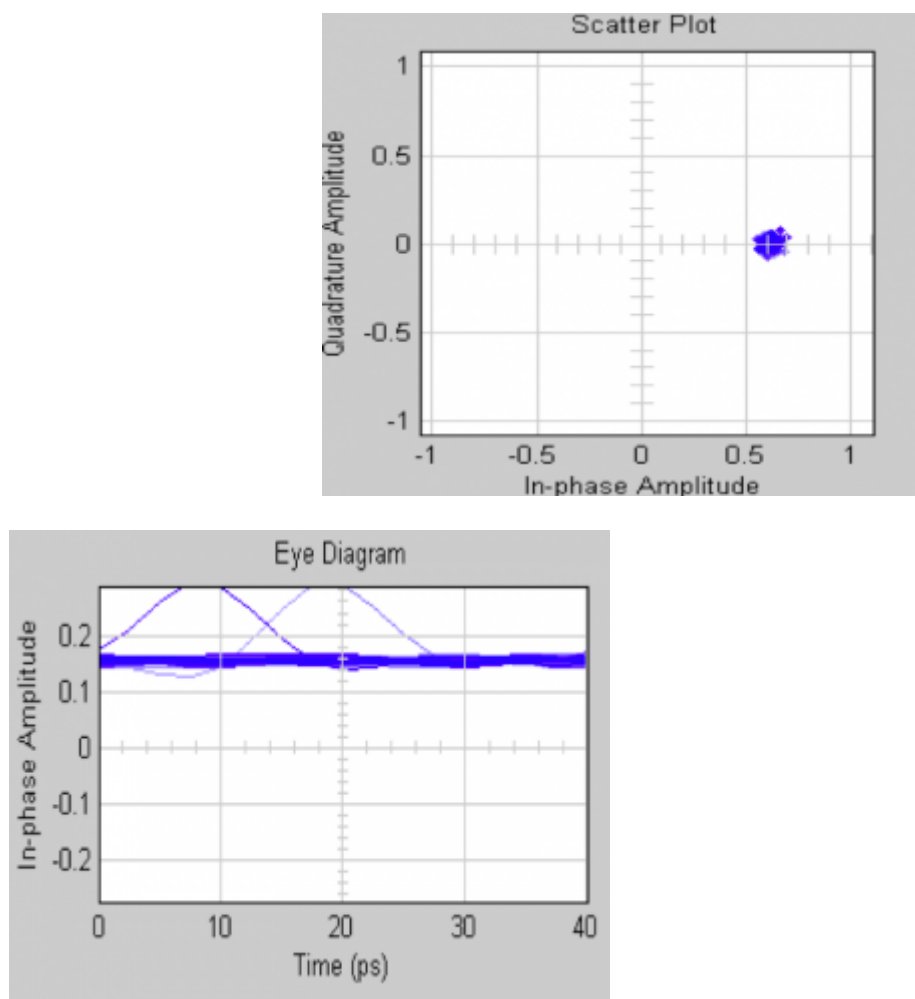
kde  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  sú počiatočné fázy v  $t = 0$ , a  $T_b$  je perióda 1 bitu binárnych dát. Tieto 2 signály nie sú koherentné, pretože  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  nie sú rovnaké. Tvar signálu nie je súvislý pri bitovom prechode. Táto forma FSK je tiež nazývaná nekoherentná ( noncoherent) FSK. Môže byť vytvorená prepínaním modulátorových výstupných liniek medzi dvomi odlišnými oscilátormi. Pre koherentný demodulátor s koherentným FSK signálom sa vyberajú také frekvencie 2 signálov, aby boli ortogonálne. Tým pádom docielime, že prechod medzi jednotlivými úrovňami je plynulý.



Obr. 5. Symbolové rozmiestnenie pre FSK modulácie.



Obr. 6. NRZ FSK simulovaný signál po demodulácii.



Obr. 7. RZ FSK simulovaný signál po demodulácii.

## 4.2 OOK (On-Off Keying)

Je to najjednoduchší typ M-AM modulácií (M-ary Amplitude Modulation). OOK je reprezentovaný 2 signálmi:

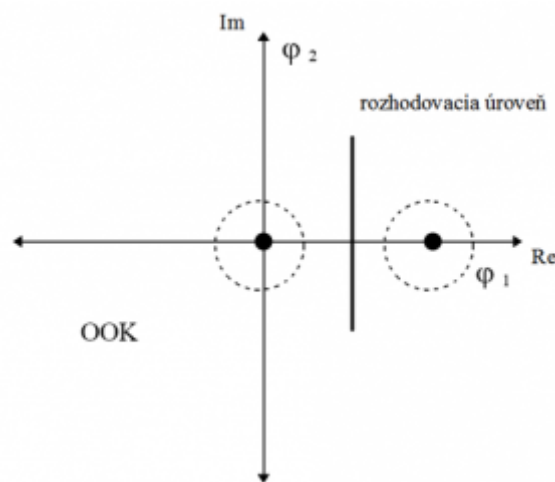
$$\bullet s_1(t) = A \cdot \cos(2\pi f_c t), \text{ pre } a = 1, 0 \leq t \leq T \quad (7)$$

$$\bullet s_2(t) = 0, \text{ pre } a = 0, 0 \leq t \leq T \quad (8)$$

kde  $a$  sú binárne dáta, ktoré sú prijaté nekorigované a s rovnakou pravdepodobnosťou. Komplexná obálka OOK signálu  $s(t)$  na celej časovej osi je rovná:

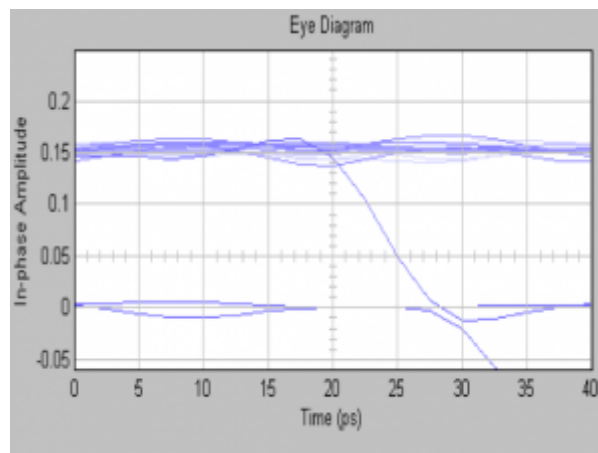
$$s' = \sum A_k p(t - kt), -\infty \leq t \leq \infty \text{ pre } k = \langle -\infty, \infty \rangle \quad (9)$$

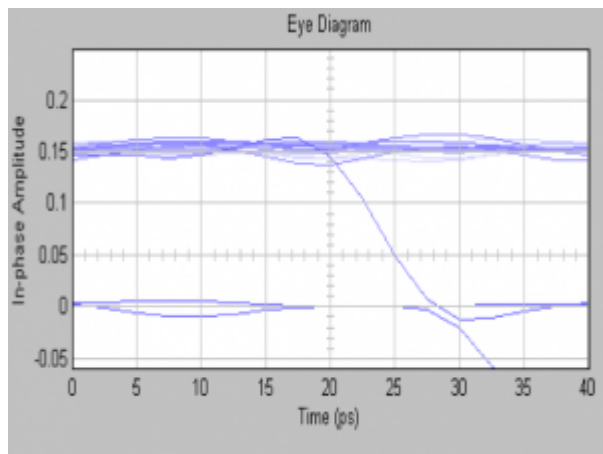
kde  $A_k$  patrí  $\{0, A\}$ ,  $p(t)$  je rektangulárny impulz s jednotkou amplitúdy.



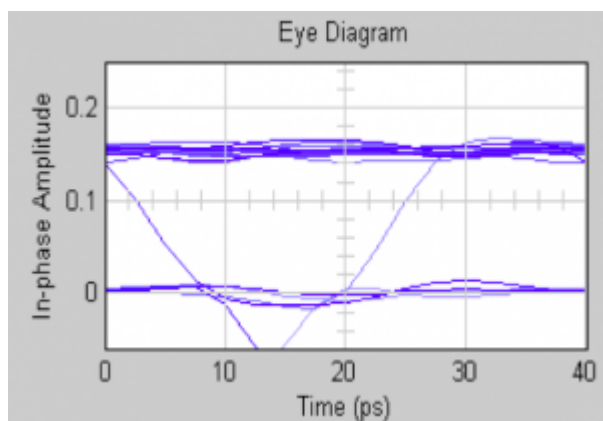
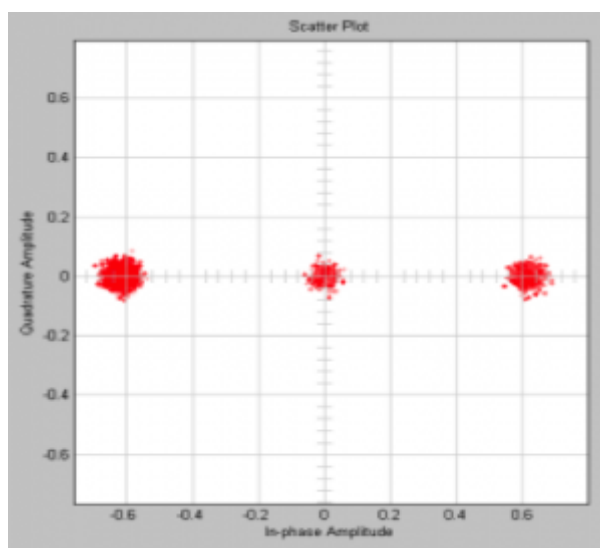
Obr. 8. Symbolové rozmiestnenie pre OOK modulácie.

Z tohto grafu je zrejmé, že voľba nastavenia rozhodovacej úrovni môže byť kritická pre výkon prijímača. OOK prijímač vyžaduje adaptabilné rozhodovanie alebo automatické riadenie zisku (AGC), aby sa zabezpečilo optimálne nastavenie rozhodovacej úrovni.





Obr. 9. NRZ OOK simulovaný signál po demodulácii.



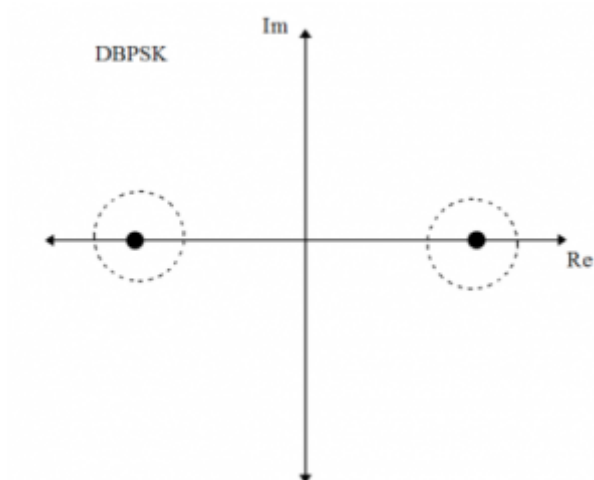
Obr. 10. RZ OOK simulovaný signál po demodulácii.

### 4.3 DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying)

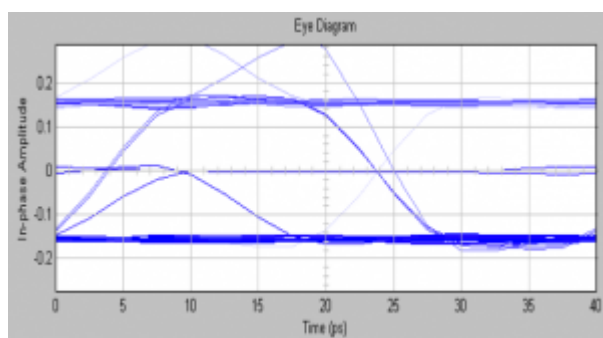
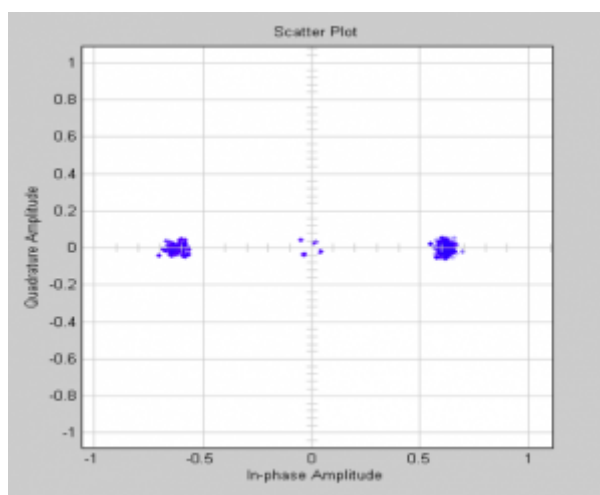
Táto modulácia vzniká použitím diferenciálneho kódovania na BPSK moduláciu. DBPSK môže byť demodulovaný koherentnou demoduláciou alebo diferenciálnou demoduláciou. Ak je signál kódovaný diferenciálne a demodulovaný diferenciálne, tak sa táto modulácia nazýva DBPSK alebo niekedy len DPSK. DBPSK nepotrebuje porovnávací koherentný signál, pretože diferenciálny demodulátor využíva predchádzajúci symbol ako porovnávací pre demoduláciu aktuálneho symbolu. Pri demodulácii je použitý predný pásmový priepustný filter, ktorý znižuje šum, ale zachováva fázu signálu. Keďže DBPSK neposúva fázu, potom jeho imaginárna časť



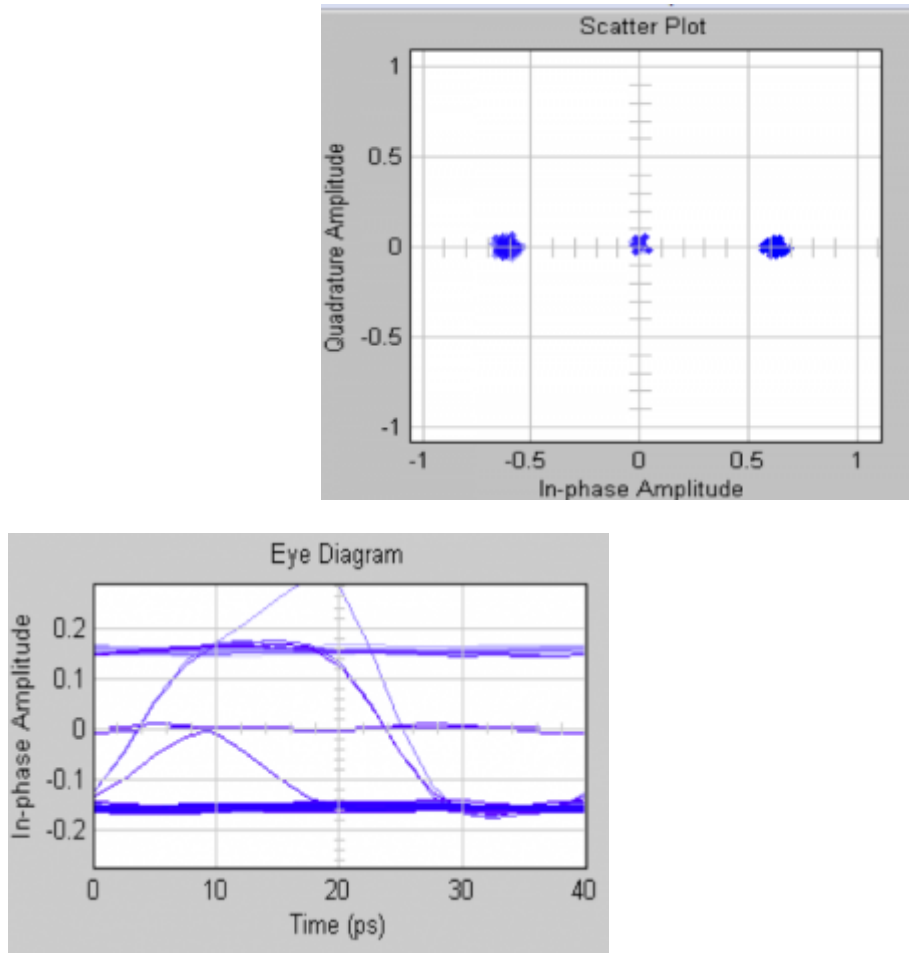
bude čisto reálna.



Obr. 11. Symbolové rozmiestnenie pre DBPSK modulácie.



Obr. 12. NRZ DBPSK simulovaný signál po demodulácii.



Obr. 13. RZ DBPSK simulovaný signál po demodulácii.

#### 4.4 DQPSK (Differential Quaternary Phase Shift Keying)

DQPSK je štvorúrovňová verzia DPSK. DQPSK vysiela dva bity pre každý symbol (bitové kombinácie sú 00, 01, 11 a 10) a má ďalšiu výhodu oproti konvenčným binárnym DPSK. DQPSK má užšie optické spektrum, ktoré toleruje väčší rozptyl (ako chromatickú disperziu aj polarizačne módovú disperziu), umožňuje väčšiu optickú filtráciu a umožňuje nižší odstup kanálov. Ako výsledok, DQPSK je modulačný formát, ktorý umožňuje spracovanie 40 Gbit/s systému. Pri DQPSK, riadiaca elektronika potrebuje iba polovicu šírka pásma prenosovej rýchlosti, takže 40 Gbit/s signály môžu byť generované s 20 Gbit/s zariadeniami.

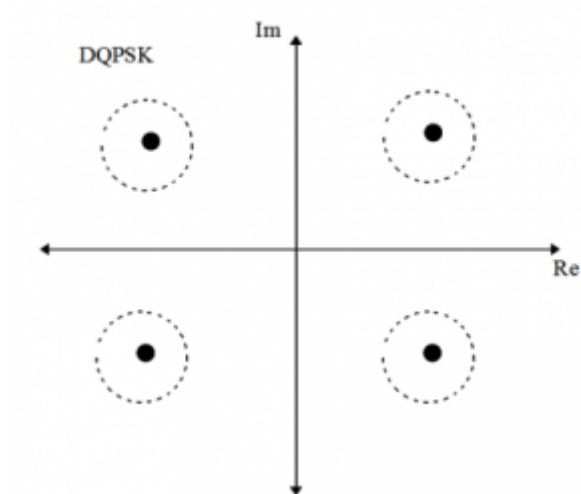
Pri DQPSK modulácií sú informačné dibity reprezentované fázovými rozdielmi  $\Delta\theta_i$  zo symbolu na symbol. Je tu odlišná fáza zariadení medzi  $\Delta\theta_i$  a logickými dibitmi. Je možné si zvoliť rozličnú počiatočnú fázu v zariadení. Platia tu určité kódové pravidlá:

$$u_k = \overline{(I_k \mp Q_k)}(I_k \pm u_{k+1}) + (I_k \pm Q_k)(Q_k \pm v_{k+1}) \quad (10)$$

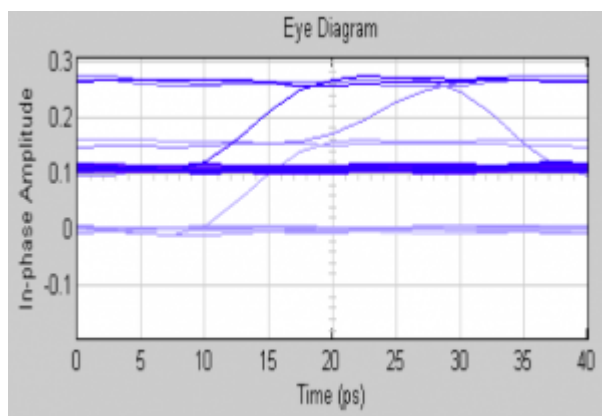
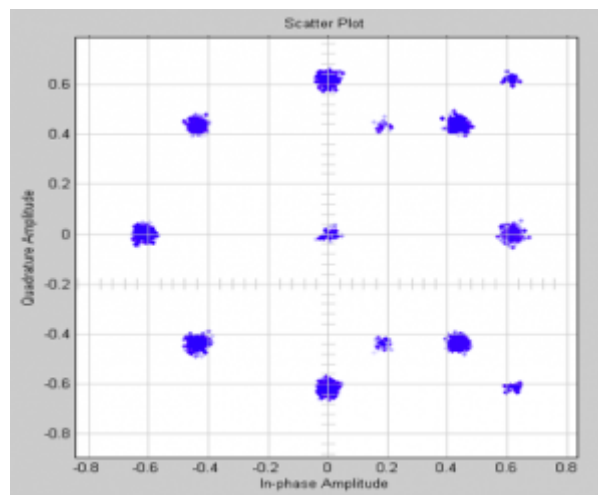
$$v_k = \overline{(I_k \mp Q_k)}(I_k \pm v_{k+1}) + (I_k \pm Q_k)(Q_k \pm u_{k+1}) \quad (11)$$

kde  $\pm$  predstavuje exclusive OR operátora.  $I_k \in (0,1)$  a  $U_k \in (0,1)$  sú nepárne čísla a párne čísla originálnych informačných bitov,  $u_k \in (0,1)$  a  $v_k \in (0,1)$  sú kódované I-kanálovými a Q-kanálovými bitmi. Pár  $(I_k, Q_k)$  a  $(u_{k-1}, v_{k-1})$  sú použité na vytvorenie páru  $(u_k, v_k)$ , ktorý je použitý na riadenie absolútnej fázy nosnej. Modulátor je rovnaký ako QPSK modulátor, ibaže zahŕňa 2 diferenciálne kódery, ktoré musia byť v každom

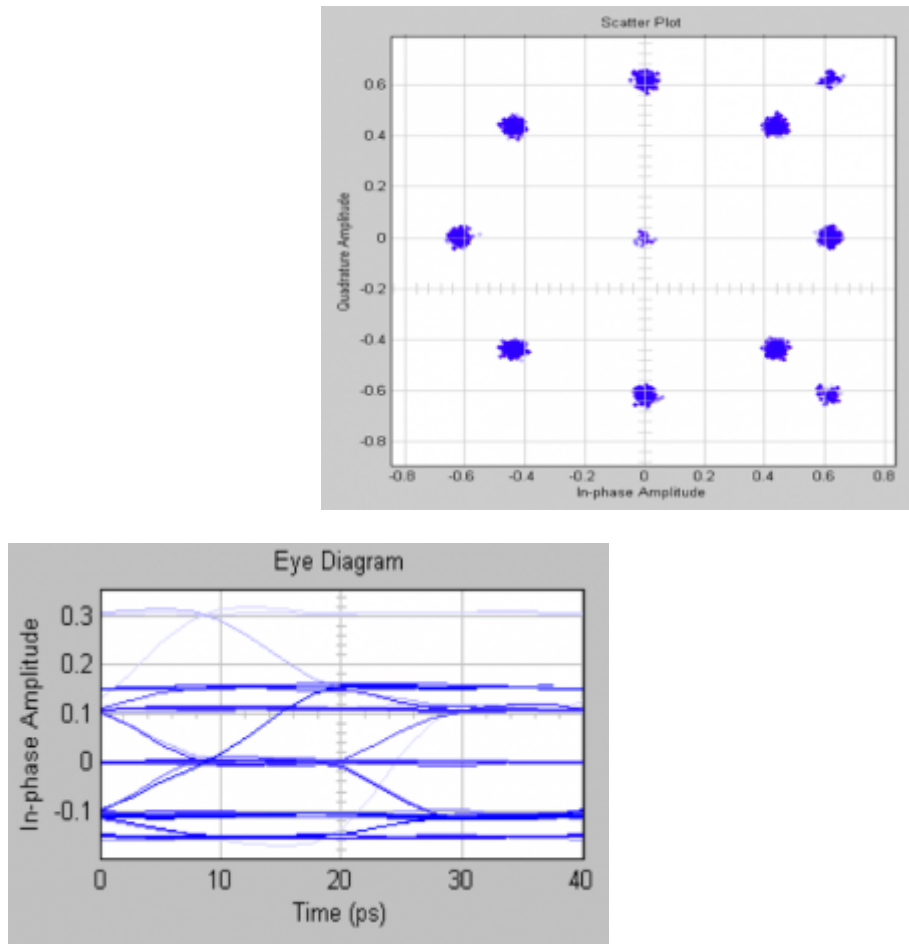
kanáli [1],[7].



Obr. 14. Symbolové rozmiestnenie pre DQPSK modulácie.



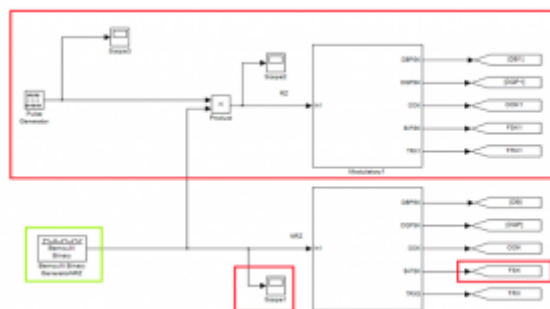
Obr. 15. NRZ DQPSK simulovaný signál po demodulácií.



Obr. 16. RZ DQPSK simulovaný signál po demodulácii.

## 5. Simulovanie vybraných modulačných techník

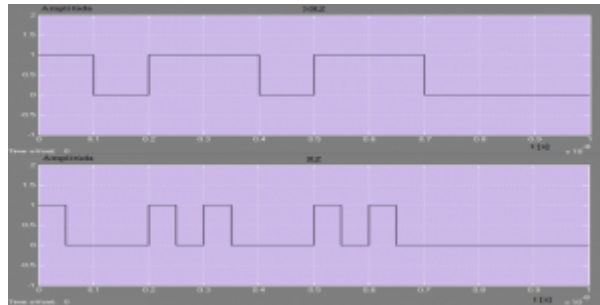
Simulovanie sa uskutočňovalo v prostredí Matlab 2010 Simulink. Pri vytváraní optickej prenosovej cesty som použil Communication Blockset a Communication tools, kde som používal už vopred vytvorené bloky ako sú modulátory, generátory, bloky s funkciou operátorov a meracie prístroje. Tento program však neobsahuje bloky určené na simulovanie optického vlákna, preto sa do simulovania prenosovej cesty nezahrnuli nelineárne parametre. Pri simulovaní sme uvažovali s optickým vláknom s vlnovou dĺžkou 1550 nm pri rýchlosti 1 Gbit/s na vzdialenosť 10 km. Na simulovanie reálneho optického vlákna som použil 3 parametre, ktoré ovplyvňujú prenosovú cestu a sú to tlmenie, šum a disperzia.



Obr. 17. Základný model pre modulačné techniky.

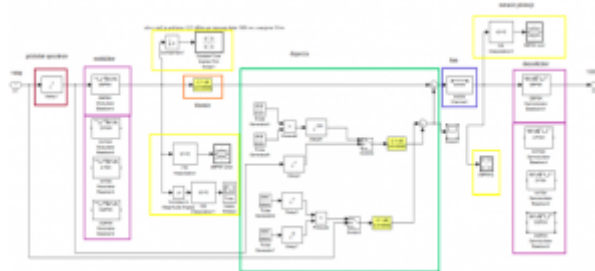
Ako zdroj sme použili Bernoulliho generátor na generovanie 2 stavov impulzov "1" a "0". Pôvodný model tiež používal Bernoulliho generátor, ale použitý v rámcovom

móde, čo prekážalo pri doplnení modelu o disperziu. Ďalej je model doplnený o novú moduláciu FSK a o meracie prístroje, ktoré nám zobrazia signál v reálnom čase. Pôvodný model obsahoval formát NRZ, pričom tento model už obsahuje formát NRZ a RZ.



Obr. 18. Priebeh z generátora impulzov - NRZ a RZ formát.

Oba signály vstupujú do štyroch modulátorov - FSK, DQPSK, DBPSK a OOK. V týchto blokoch je signál upravený a prenášaný cez simulované optické vlákno (tlmenie, disperzia, šum). Podrobné úpravy pre jednotlivé modulácie sú uvedené v predchádzajúcej kapitole. Po prechode je signál demodulovaný príslušným demodulátorom a privedený do bloku BER, ktorý počíta chybovosť jednotlivých modulácií. Celá schéma je pre jednoduchosť rozdelená na jednotlivé podsystémy, pričom sa tieto podsystémy líšia len použitými moduláciami a pri NRZ a RZ príslušným oneskorením.



Obr. 19. Modulácie a simulovanie prenosovej cesty.

Hlavnou úlohou bolo znázorniť chybovosť modulácií. Aby som vedel porovnať modulácie, tak som nastavil konštantný počet symbolov na 10 000 a simulácia vypočítala príslušnú chybovosť BER

Tab. 1. Hodnoty BER rôznych modulácií pre odlišný počet symbolov.

počet symbolov BER:	10	100	1000	10000
NRZ-OOK	0,6	0,46	0,482	v0,4976
NRZ-FSK	0,5	0,36	0,367	0,3959
NRZ-DBPSK	0,6	0,42	0,43	0,4635
NRZ-DQPSK	0,6	0,43	0,492	0,5433
RZ-OOK	0,5	0,33	0,262	0,2525
RZ-FSK	0,5	0,25	0,18	0,1835
RZ-DBPSK	0,5	0,33	0,25	0,24
RZ-DQPSK	0,5	0,33	0,256	0,2498

Z tabuľky je zrejmé, že chybovosť BER je tým dôveryhodnejšia, čím viacej symbolov použijeme na výpočet a po určitých symboloch sa nám ustáli. Ďalším zistením je to, že BER pre RZ formáty je menšia, čo je zapríčinené tým, že impulzy RZ formátu sú užšie a tým nedochádza k ISI a systém je odolnejší voči disperzii. Výsledky z tabuľky ukazujú, že modulácia s najmenšou BER pri použití RZ formátu je FSK modulácia, čo je zapríčinené tým, že FSK modulácia mení frekvenciu a preto disperzia tu má malý vplyv. Pri ďalších moduláciách, DBPSK a DQPSK pri formáte RZ sme zaznamenali nárast chybovosti, pretože na úpravu signálu používajú zmenu amplitúdy a fázy. Modulácia s najvyšším BER pri RZ formáte je OOK modulácia, ktorá upravuje signál len na základe zmeny amplitúdy.

Pri NRZ formáte FSK modulácia dosahovala vyššiu chybovosť ako pri RZ formáte, pretože tu dochádzalo k ISI. Pri DQPSK a DBPSK moduláciách s formátom NRZ nám vysoká ISI spôsobovala posun symbolov komplexnej roviny, kde ich systém nevedel rozpoznať a to malo veľký vplyv na chybovosť. Pre moduláciu OOK pri použití NRZ formátu je ISI oveľa vyššia ako pri RZ formáte, čo malo za dôsledok zmeny tvaru symbolov a preto dochádzalo k zvýšeniu chybovosti.

## 6. Záver

V tejto práci som teoreticky rozpracoval problematiku modulačných techník a navrhol som simulačný systém, ktorý napodobňuje použitie najpoužívanejších modulátorov v simulovanom optickom prenosovom médiu pre danú vlnovú dĺžku. Tento program však neobsahuje nelineárne efekty, ktoré by značne vplývali na výsledný signál. Táto problematika ma zaujala natoľko, že by som chcel v tejto problematike pokračovať aj v ďalšom štúdiu a rozšíriť program o ďalšie funkcie a parametre optického prostredia.

## 7. Literatúra

1. XIONG, F.: Digital Modulation Techniques, 2000
2. Bartovič K. Re: Modulačné techniky v optickom prenosovom médiu I a II. Bratislava : Slovak University of Technology 20. Máj 2009  
<http://www.posterus.sk/?p=131>
3. Černák I., Jenčo M.: T E L E K O M U N I K A Č N É S I E T E IV.  
[http://brco.neonus.sk/download/skola/informatika/telekom\\_siete.pdf](http://brco.neonus.sk/download/skola/informatika/telekom_siete.pdf)
4. Jamil S., Soumadi M.: Dispersion, Kinds, Effects, Control Methods, Safwan Dostupné na internete:  
<http://dar.ju.edu.jo/mansour/optical/>
5. Konkoly K.: Kvalita Služieb v Bezdrôtových Sieťach  
[http://www.cnl.tuke.sk/files/SP2004\\_Konkoly\\_QoS\\_in\\_Wireless.pdf](http://www.cnl.tuke.sk/files/SP2004_Konkoly_QoS_in_Wireless.pdf)
6. Blanchard E.: Introduction to Data Communications  
[http://www.techbooksforfree.com/intro\\_to\\_data\\_com/](http://www.techbooksforfree.com/intro_to_data_com/)
7. John Anthes: OOK, ASK and FSK Modulation in the Presence of an Interfering signal  
<http://www.rfm.com/corp/appdata/ook.pdf>
8. optonex cooperation : Product Description - DQPSK Demodulator  
[http://www.optoplex.com/DQPSK\\_Demodulator.htm](http://www.optoplex.com/DQPSK_Demodulator.htm)

Spoluautorm článku je Doc. Ing Rastislav Róka, PhD., Katedra Telekomunikácií, Fakulta

---

Elektrotechniky a Informatiky, Slovenská Technická Univerzita Ilkovičova 3, 812 19  
Bratislava

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii  
Telekomunikácie III., ISBN 978-80-227-3508-7

---