

DVOUSTAVOVÉ MODULAČNÍ FORMÁTY V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH

Vladimír TEJKAL¹, Miloslav FILKA¹, Pavel REICHERT¹, Jan ŠPORIK¹

¹ Katedra Telekomunikací, FEKT, VUT v Brně, Purkyňova 116, 612 00 Brno, Česká Republika

xtjeka00@stud.feec.vutbr.cz, filka@feec.vutbr.cz, xreich01@stud.feec.vutbr.cz, xspori01@stud.feec.vutbr.cz

Abstrakt. V článku jsme se zabývali dvoustavovými modulačními formáty a jejich uplatněním v pasivních optických sítích. Pasivní optická síť je charakteristická dělením optického signálu mezi několik koncových účastníků pomocí pasivních splitterů, které přidávají do sítě značný útlum. V simulacích byla zkoumána výkonnost vybraných modulačních formátů v závislosti na vysílacím výkonu za účelem ověření, zda nedochází ke zkreslení signálu. Dále byla zkoumána minimální chybovost celého systému pro každý modulační formát. Cílem bylo najít vhodné modulace, které by umožňovaly prodloužení dosahu a dělicího poměru současných pasivních optických sítí.

Klíčová slova

optická přístupová síť, Q-faktor, bitová chybovost, diagram oka

1. Úvod

Trendem dnešní doby je zvyšování přenosových rychlostí komunikačních systémů. To vede ke zkoumání současných modulačních formátů a jejich vlivu v různých typech sítí. Roste také zájem o nové modulační formáty, které mají zásadní vliv na kvalitu přenosu.

Dříve byla modulace NRZ (non-return-to-zero) hlavním modulačním formátem v optických sítích. Rostoucí požadavky po vyšší přenosové kapacitě vedly k vytváření nových modulačních formátů. V současné době je CSRZ (carrier-suppressed RZ) nejvýhodnější modulací pro vysokokapacitní dálkové přenosové linky [1]. Podobně tomu je u modulace CRZ (chirped RZ), která je speciálním typem modulace RZ (return-to-zero) a je realizovaná rozkmitáním RZ pulsů. Tento modulační formát se obvykle využívá na podmořských přenosových linkách [2]. Dřívější studie se zabývaly právě vlivem modulačních formátů na nelinearity optických vláken na dálkových optických linkách. V tomto článku jsme zkoumali výkonnost modulačních formátů NRZ, 50% RZ, 33% RZ, CSRZ a CRZ v pasivní optické síti. Pasivní optické sítě jsou charakteristické sdílením jednoho portu optického laseru mezi několik koncových uživatelů. Vliv disperzních jevů v pasivní optické síti je menší z důvodu kratší vzdálenosti a nižší přenosové rychlosti, proto nebyly v simulacích uvažovány. Vybrali jsme gigabitovou pasivní optickou síť

dle standardu GPON (Gigabit Passive Optical Network) [3]. Optický signál je rozdělen ve splitteru, který vnáší do optické linky nežádoucí útlum. To vede k omezení vzdálenosti.

Nejprve v článku vysvětlíme zkoumané parametry jako je Q-faktor, chybovost BER (bit error rate) a diagram oka. V další části popíšeme konfiguraci systému a charakteristiky modulací NRZ, 50%RZ, 33%RZ, CSRZ a CRZ. Nakonec jsou uvedeny výsledky simulací a vzájemné porovnání těchto modulačních formátů.

1.1 Q-faktor

Q-faktor vyjadřuje kvalitu analogového signálu s ohledem na jeho odstup signál-šum. Zahrnuje všechna fyzikální zhoršení působící na signál jako je šum, nelineární jevy, disperze (chromatická a polarizační). Tato zhoršení degradují signál a způsobují bitové chyby. Z toho plyne, že vyšší hodnota Q-faktoru znamená vyšší odstup signál-šum a tedy nižší bitová chybovost. V rovnici (1) je uveden způsob výpočtu Q-faktoru optického signálu

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1)$$

kde I_1 je logická úroveň „1“, I_0 je logická úroveň „0“, σ_1 je standardní odchylka logické úrovně „1“ a σ_0 je standardní odchylka logické úrovně „0“ [4].

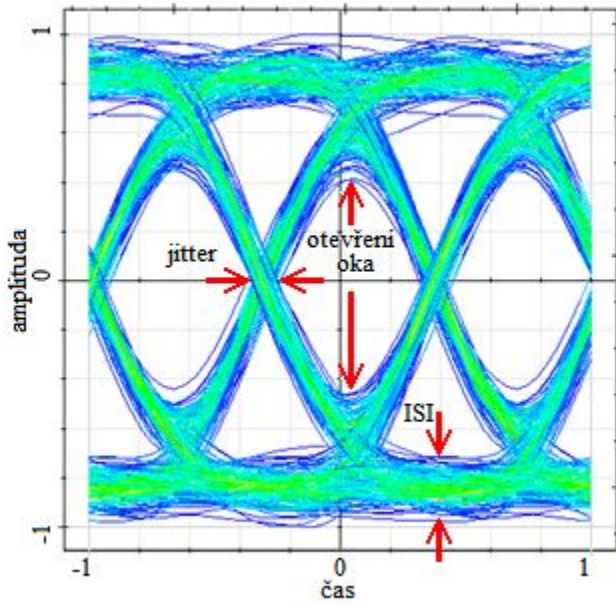
1.2 Bitová chybovost

V reálných digitálních komunikačních systémech je rozhodnutí, v jakém časovém úseku vzorkovat a zda vzorkovaná hodnota reprezentuje hodnotu logické úrovně „1“ nebo „0“, ovlivněno šumem a rušením signálu, což vede k tomu, že je tu nenulová pravděpodobnost chybného rozhodnutí. Proto kvalita přijatého signálu souvisí s bitovou chybovostí, která je hlavním indikátorem kvality celkového systému [5]. Rovnice (2) ukazuje výpočet chybovosti ze znalosti bezrozměrné hodnoty Q-faktoru [6].

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

1.3 Diagram oka

Diagram oka představuje superpozici všech navzájem překrytých bitů v signálu [7]. Obr. 1 ukazuje diagram oka NRZ signálu. Na diagramu oka jsou vidět dva typy nežádoucích efektů. První je efekt mezisymbolových interferencí (ISI – intersymbol interference) a druhý je efekt kolísání zpoždění (jitter). ISI je způsobeno překrýváním jednotlivých modulačních impulsů. Kolísání zpoždění je definováno jako krátkodobá odchylka digitálního signálu z jeho ideální pozice [5]. Větší otevření oka značí menší útlum nebo rušení a tedy vyšší kvalitu signálu.



Obr. 1. Diagram oka s vyznačenými hlavními parametry

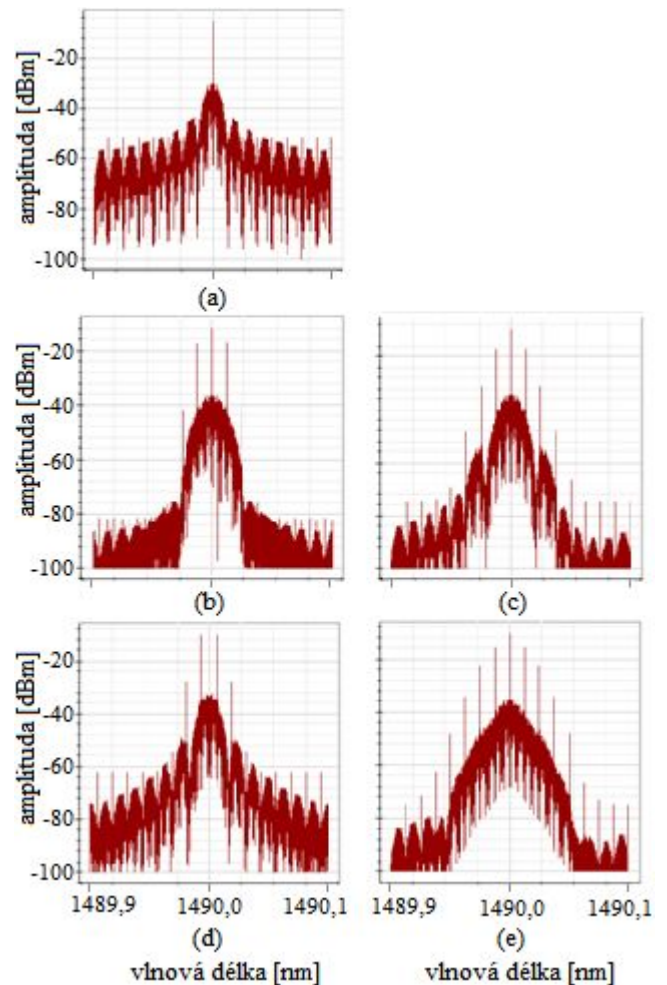
2. Dvoustavové modulační formáty

V následném výčtu budou stručně představeny jednotlivé modulační formáty, které jsme pro simulace použili.

2.1 Non-return-to-zero NRZ

Signál bez návratu k nule je základním modulačním formátem v optických komunikačních systémech, protože má relativně malou elektrickou šířku pásma a také jednodušší konfiguraci vysílačů a přijímačů. U modulačního formátu NRZ zabírá logická úroveň „1“ celý bitový interval a během trvání bitového intervalu nedochází k návratu k nule. Intenzita signálu se mění mezi logickými úrovněmi „1“ a „0“ v závislosti na změně signálu. Fáze logické úrovně „1“ je π a u logické úrovně „0“ je fáze nulová. Obr. 2 (a) ukazuje optické spektrum NRZ signálu, kde si jsou patrné špičky na násobcích bitové rychlosti [7]. NRZ má užší spektrum centrálního laloku v porovnání s jinými modulačními formáty. Nicméně to neznamená, že je NRZ signál více odolný proti křížové modulaci (XPM – cross phase modulation) a čtyř-vlnnému směšování (FWM

– four wave mixing) v systémech s hustým vlnovým multiplexem (DWDM – dense wavelength division multiplexing). NRZ tedy nejspíše nebude nejlepší volbou pro vysokokapacitní optické systémy [8].



Obr. 2. Spektrum optického signálu na výstupu vysílače pro modulační formáty (a) NRZ, (b) 33%RZ, (c) 50%RZ, (d) CSRZ a (e) CRZ

2.2 Return-to-zero RZ

Signál s návratem k nule značí, že jeho šířka impulsu bude kratší než šířka bitového intervalu a potom klesne na logickou úroveň „0“ [8]. RZ modulace je generovaná tak, že NRZ optický signál je přiveden do druhého modulátoru se sinusovou řídicí funkcí. RZ modulace má tři běžně používané formáty: RZ s 50% střídou, RZ s 33% střídou, RZ s 67% střídou (CSRZ). Všechny RZ impulsy mají stejný tvar, který je nezávislý na sousední bitové hodnotě, a v případě ideální modulace jsou fáze všech impulsů identické. Obr. 2 (b) ukazuje optické spektrum signálu 33% RZ, kde je centrální lalok širší než v případě signálu NRZ kvůli užší šířce RZ impulsů. Spektrum 50% RZ na Obr. 2 (c) má v porovnání s 33% RZ jen nepatrně širší centrální lalok [7].

2.3 Carrier-suppressed return-to-zero CSRZ

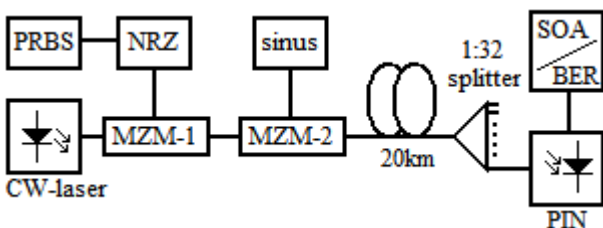
Pro generování signálu CSRZ má sinusové řídicí napětí druhého modulátoru dvojnásobnou frekvenci oproti 50% RZ a kmitá s dvojnásobnou amplitudou. Oproti standardním RZ modulacím je tu podstatný rozdíl. Fáze pulsů se mění o π každou následující bitovou periodu. To vede k destruktivnímu ovlivňování nosné frekvence. Na nosné frekvenci není žádná špička, jak je možné vidět na Obr. 2 (d) a to vede k zlepšení kvality signálu [7].

2.4 Chirped RZ CRZ

Pro generování signálu CRZ se používají stejné parametry jako 50% RZ kromě nového faktoru kmitočtového rozmitání (chirp). Jak je možné vidět na Obr. 2 (e), tak synchronní periodický chirp rozšiřuje spektrální šířku pásma. Centrální lalok je širší než v případě ostatních modulačních formátů, což má nežádoucí vliv na systémy s vlnovým multiplexem. CRZ může zvyšovat kapacitu, dosah systému a výkonnost na dálkových point-to-point optických linkách, jaké jsou v podmorských telekomunikačních systémech [2].

3. Konfigurace systému a popis parametrů

Obr. 3 ukazuje konfiguraci systému. Simulace byly provedeny v programu OptiSystem 9.0 [9]. Pro porovnání modulačních formátů NRZ, RZ, CSRZ a CRZ byla zvolena pasivní optická síť GPON se symetrickou přenosovou rychlostí 1,25 Gb/s a vlnovými délkami 1490 nm pro downstream a 1310 nm pro upstream. Jako zdroj optického signálu je použitý CW (continues wave) laser, který je přiveden na první MZ (Mach-Zehnder) modulátor. Datový signál je generován v PRBS generátoru a je přiveden na vstup NRZ pulzního generátoru, který slouží k řízení prvního MZ modulátoru. Signál je následně upraven v druhém modulátoru, řízeném sinusovým generátorem, na požadovaný modulační formát.



Obr. 3. Blokové schéma konfigurace systému

Signál jde optickou linkou délky 20 km s vláknem G.652 s konstantním měrným útlumem 0,2 dB/km v celém spektru vlnových délek. Na konec trasy je připojen pasivní splitter 1:32 s útlumem 17,3 dB. Pro detekci optického signálu a převod na elektrický signál je použita PIN dioda. Na výstup byl připojen spektrální optický analyzátor a BER tester pro vizualizaci a vyhodnocení přijatého signálu.

4. Výsledky simulací

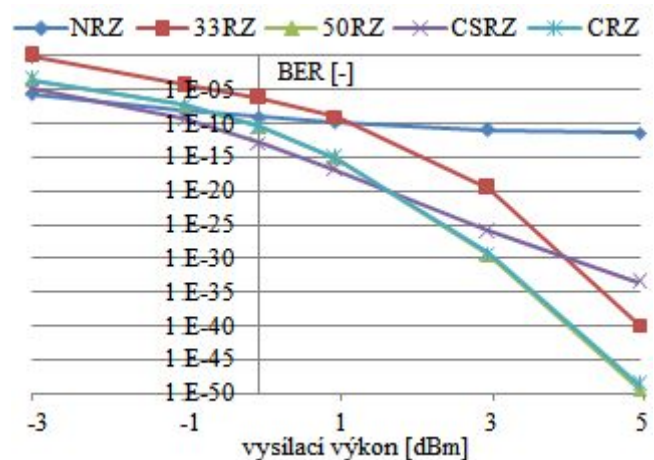
Simulace byly provedeny na trase délky 20 km a při přenosové rychlosti 1,25 Gb/s s splitterem 1:8. Spektrální charakteristiky pro zkoumané modulace jsou uvedeny na Obr. 2 a byly změřeny přímo na výstupu z druhého modulátoru. Centrální lalok je situován ve všech případech na vlnové délce 1490 nm, která byla nastavena pro downstream. NRZ a CSRZ mají podobně úzké výkonové spektrum, ovšem v případě CSRZ není na nosné frekvenci žádná špička a to pomáhá redukovat vzájemné ovlivňování sousedních impulsů. Centrální lalok u modulace CRZ je výrazně širší, než u ostatních modulačních formátů. Širší spektrum vede k redukci použitelnosti formátu pro WDM systémy, ale zvyšuje odolnost proti nelinearitám [1].

Tab. 1 obsahuje porovnání chybovosti a Q-faktoru simulovaných modulačních formátů při základním nastavení, tedy při vysílacím výkonu 0 dBm, délce trasy 20 km a dělicím poměru 1:8. Při základní konfiguraci bylo dosaženo minimální chybovosti u CSRZ modulace. I ostatní modulace mají minimální chybovost na výborné úrovni, v případě modulace 33% RZ je už chybovost vyšší, ale i tak je stále akceptovatelná. Pro ukázkou jsou v tabulce uvedeny hodnoty Q-faktoru odpovídajících chybovostí.

Tab. 1. Hodnoty chybovosti a Q-faktoru získané při základní simulaci: P = 0 dBm, L = 20 km, splitter 1:8

Modulační formát	BER	Q-faktor
NRZ	9,44e-10	6,01
33%RZ	6,10e-07	4,85
50%RZ	3,13e-11	6,54
CSRZ	1,51e-13	7,29
CRZ	3,46e-11	6,52

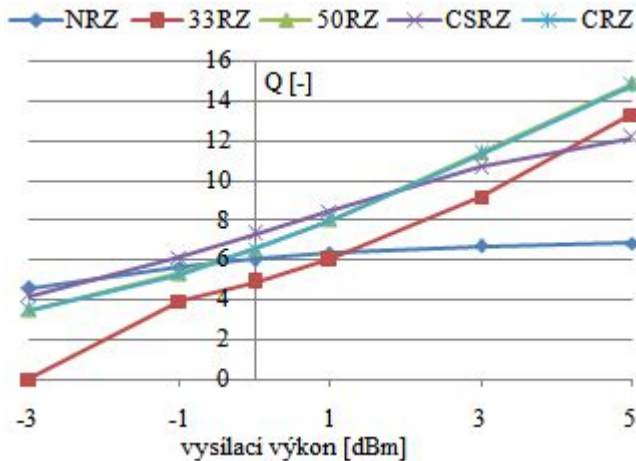
Další simulace byla zaměřena na získání závislosti chybovosti na vysílacím výkonu. Konfigurace systému byla zachována na délce 20 km a dělicím poměru splitteru 1:8. Vysílací výkon jsme nastavovali v rozsahu od -3 dBm do 5 dBm, což jsou doporučené hodnoty pro GPON síť [3]. Obr. 4 ukazuje výsledné hodnoty minimální chybovosti v závislosti na vysílacím výkonu, průběhy 50% RZ a CRZ se zde překrývají.



Obr. 4. Závislost chybovosti na vysílacím výkonu pro zkoumané modulační formáty

S rostoucím vstupním výkonem se podle očekávání chybovost snižovala. Při zvýšení výkonu z minimální hodnoty na maximum, se pro modulační formáty NRZ, 33% RZ, 50% RZ, CSRZ a CRZ chybovost změnila následovně: z 10^{-6} na 10^{-12} , z 1 na 10^{-40} , z 10^{-4} na 10^{-50} , 10^{-5} na 10^{-34} a z 10^{-4} na 10^{-49} , v pořadí jako jsou uvedeny modulační formáty. Jak je možné vidět ze simulovaných průběhů, tak už při výkonu 0 dBm jsou chybovosti v řádu kolem 10^{-10} a tato hodnota značí výborný odstup signál-šum. Proto další zvyšování výkonu pro krátké vzdálenosti s malým dělicím poměrem nemá smysl. Modulace NRZ má průběh nejvíce lineární a dosahuje také nejnižší chybovosti při minimálním výkonu. Na dálkových trasách může vzrůstat chybovost vlivem příliš vysokého výkonu, což je způsobeno nelinearitami [4]. V naší simulaci se neuplatní nelinearity, které by chybovost mohly ovlivňovat, protože trasa délky 20 km je velice krátká.

Na obr. 5 je zobrazena stejná závislost na vysílacím výkonu, ale nyní jsou pro představu zobrazeny výsledné hodnoty Q-faktoru. Průběhy 50% RZ a CRZ se zde překrývají.

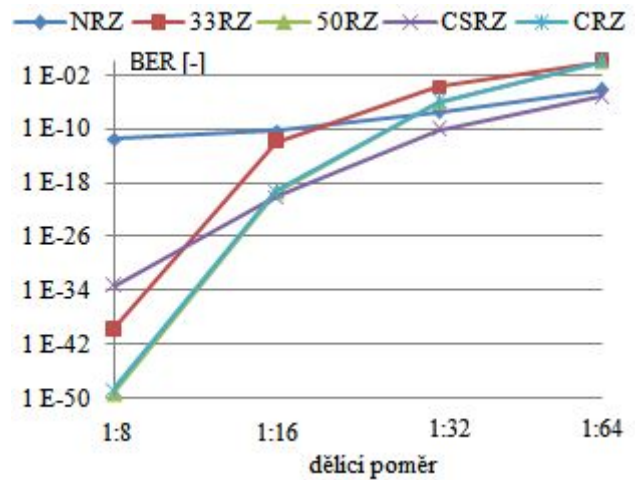


Obr. 5. Závislost Q-faktoru na vysílacím výkonu pro zkoumané modulační formáty

Tady je možné vidět rostoucí hodnotu Q-faktoru při zvyšujícím se výkonu, což odpovídá snižováním chybovosti. Zde je vhodné uvést, že hodnota Q-faktoru 6 odpovídá chybovosti řádově 10^{-10} , kterou hodnotíme již jako vynikající.

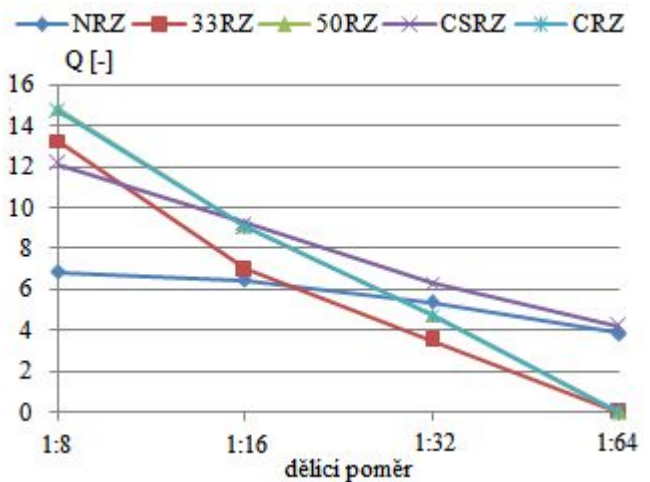
Další simulace byly provedeny pro zvyšující se hodnoty dělicího poměru splitteru. Volili jsme hodnoty běžně používané hodnoty 1:8, 1:16, 1:32, 1:64, které odpovídají doporučení pro GPON a také 1:128, který je možné použít v případě začlenění dopředné opravy chyb [3]. Vysílací výkon jsme nastavili na maximální hodnotu 5 dBm, aby signál překonal i vysoké dělicí poměry. Výsledné hodnoty chybovosti v závislosti na měnícím se dělicím poměru jsou na obr. 6. Podle předpokladu chybovost se vzrůstajícím dělicím poměrem rosla. Při dělicím poměru 1:32 byla chybovost pro většinu modulací nízká v řádu 10^{-10} , ale pro modulaci 33% RZ už byla značně zhoršená. Při dělicím poměru 1:64 už byl systém schopen pracovat pouze při použití modulací NRZ a CSRZ

a to opět za zhoršených podmínek. Při dělicím poměru 1:128 už systém nekomunikoval při žádném modulačním formátu.



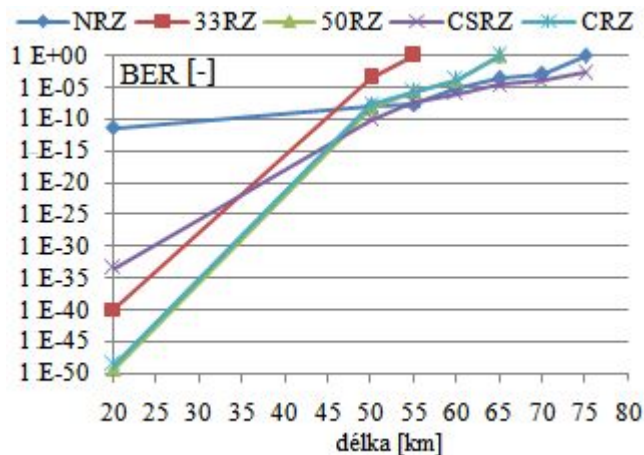
Obr. 6. Závislost chybovosti na dělicím poměru splitteru

Na hodnotách Q-faktoru (obr. 7) je vidět klesající průběh při zvyšování dělicího poměru. Pro dělicí poměr 1:32 se výsledný Q-faktor pro všechny modulace kromě CSRZ dostává pod hodnotu 6, kdy je přijatý signál ještě výborně detekovatelný. Při dělicím poměru 1:64 dosahují nejvyšší hodnoty Q-faktoru pouze modulační formáty CSRZ a NRZ a to 4,2 a 3,58.



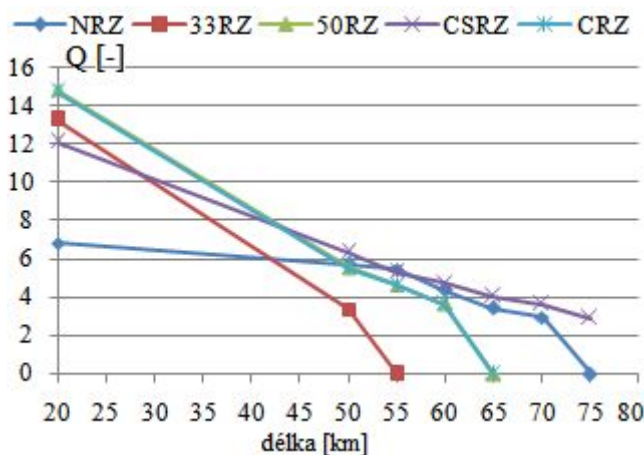
Obr. 7. Závislost Q-faktoru na dělicím poměru splitteru

V poslední simulaci jsme měnili délku trasy s cílem zjistit maximální dosah, na který je systém schopen pracovat s akceptovatelnou chybovostí. Simulace byly provedeny opět při nevyšším vysílacím výkonu 5 dBm a pro splitter 1:8. Na obr. 8 je graf chybovosti pro všechny modulační formáty. Detektor byl schopen přijmout signál 33% RZ s chybovostí v řádu 10^{-4} až do délky 50 km. U ostatních modulací byla vzdálenost vyšší, konkrétně 50% RZ a CRZ byli detekovatelné i po 60 km s chybovostí řádově 10^{-4} . NRZ pracoval na vzdálenost 65 km a CSRZ na vzdálenost 70 km, oba s chybovostí řádově 10^{-3} . Hodnoty chybovosti jsou však pro správné rozpoznání signálu příliš nízké a proto budou reálně dosažitelné vzdálenosti kratší.



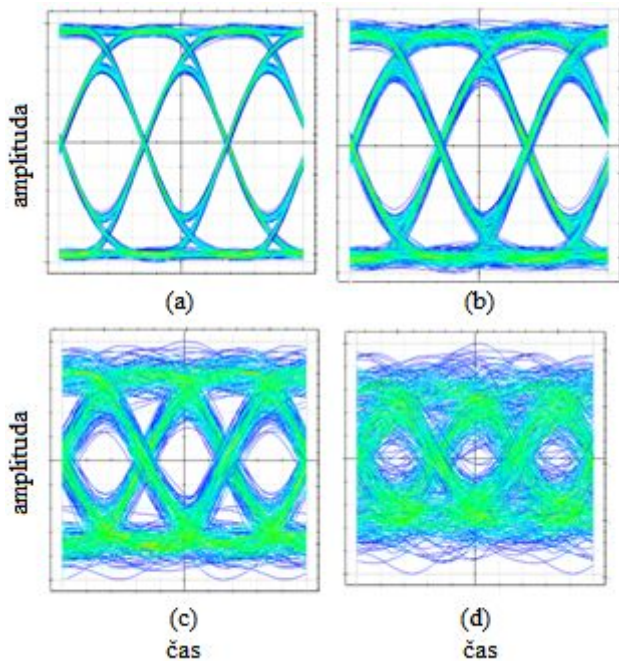
Obr. 8. Závislost chybovosti na délce trasy

Závislost Q-faktoru na měnící se délce trasy je na obr. 9. Ze závislosti Q-faktoru jde vidět v porovnání s grafem chybovosti (obr. 8), že hodnota Q-faktoru menší než čtyři odpovídá chybovosti řádově 10^{-4} a signál s touto chybovostí je již špatně detekovatelný. Pro akceptovatelný příjem by se měla hodnota Q-faktoru pohybovat mezi čtyřmi až pěti, což by odpovídalo chybovostem v řádech od 10^{-5} do 10^{-7} .



Obr. 9. Závislost Q-faktoru na délce trasy

Obr. 10 ukazuje diagram oka pro základní NRZ modulaci (a) s chybovostí 10^{-12} , kterou hodnotíme jako vynikající a odstup signál-šum je natolik velký, že signál není nijak narušen a je možné jej bez sebemenších problémů správně detekovat, (b) signál s chybovostí 10^{-10} , který má výborný odstup signál-šum, dostatečný pro správné určení logických úrovní signálu, (c) s chybovostí 10^{-6} , kterou hodnotíme jako akceptovatelnou, je zde vidět vliv šumu, ale otevření oka je stále dostačující pro správné vyhodnocení přijatého signálu a (d) s chybovostí 10^{-3} , která je už tak vysoká, že vlivem vysokého šumu není možné přesně určit úroveň signálu, oblast otevření oka je tak malá, že už nastává problém jak s časovou synchronizací, tak se správným určením logických úrovní.



Obr. 10. Diagramy oka pro NRZ signál s chybovostí (a) 10^{-12} , (b) 10^{-10} , (c) 10^{-6} a (d) 10^{-3}

5. Závěr

NRZ modulace je v současné době používána modulace pro pasivní optické sítě. Současnou maximální vzdáleností pro pasivní optické sítě je 20 km. V provedených simulacích jsme ověřili, že modulace CSRZ může zvýšit dosah pasivní optické sítě až o 5 km. To znamená, že při simulovaném měrném útlumu vlákna 0,2 dB/km, dojde ke snížení útlumu trasy o 1 dB. Tato rezerva nemusí být nutně použita na prodloužení trasy, ale může být užitečná v případě, kdy musíme přidat další sváry nebo konektory. CRZ je modulace vhodná spíše na dlouhé linky ovlivněné šumem a disperzemi [4] a při našich simulacích se to potvrdilo. Její výsledky byly srovnatelné s modulací 50% RZ. Modulace 33% RZ vykazovala výsledky nejhorší. Nejstabilnějším modulačním formátem je NRZ, u něho se chybovost s měnícími se parametry příliš nelišila od základní konfigurace a veškeré průběhy mají takřka lineární charakter. Její výhodou je jednoduché generování, proto se používá v současných GPON sítích. Ostatní zkoumané modulace nebyly pro tyto typy sítí ideální.

Poděkování

Článek vznikl za podpory projektu MSM1890600 „Elektronické komunikační systémy a technologie nových generací“. Poděkování také patří společnosti Optiwave, která nám poskytla program OptiSystem pro simulaci optických sítí.

Použitá literatura

- [1] WINZER, P. J., ESSIAMBRE, R. J. Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks. *Journal Lightwave Technology*. 2006.
- [2] BERGANO, N., NISSOV, M., PILIPETSKII, A., CAI, J., DAVIDSON, G., BAKHSHI, B. Chirped Return-to-Zero Formats for Ultra Long-Haul Fiber Communications. *IEEE/LEOS Workshop on - Advanced Modulation Formats*. 2004. pp. 1-2.
- [3] ITU-T: *G.984.1 - Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics*. [on line], ITU-T, 2008. [cited 2010-09-18]. Available from: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-1/>>
- [4] MALHOTRA, J., KUMAR, M. Performance analysis of NRZ, RZ, CRZ and CSRZ data format in 10Gb/s optical solution transmission link under the impact of chirp and TOD. *ScienceDirect Optics*. 2008. vol. 120, pp. 614-618.
- [5] NISZANSKÝ, M. Modeling and Optimization of Broadband Electrical Interconnects and Housing for Optical Communication System. Doctoral thesis, Erlangen-Nuremberg, 2005.
- [6] ZHANG, S. Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System.. Master's Thesis. Kansas, 2004.
- [7] MAURO, J., RAGHAVAN, S. Advanced modulation formats for fiber optic communication systems. In *Scientific Modeling and Simulation*. 2008. vol. 15, no. 1-3, pp. 283-312.
- [8] XU, Ch., LIU, X., MOLLENAUER, L., 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*. 2003. vol. 15, no. 4, pp. 617-619.
- [9] www.optiwave.com

technologií. Zabývá se výzkumem krystalických vláken a jejich možnostmi uplatnění ve stávajících optických sítích.

Autorský kolektiv...

Vladimír TEJKAL získal titul Ing. na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně v roce 2009. V současné době je studentem doktorského studia na ústavu telekomunikací. Jeho výzkumné aktivity zahrnují telekomunikační, především optické sítě a nové technologie v pasivních optických sítích.

Miloslav FILKA promoval v roce 1968 na fakultě elektrotechniky VUT v Brně v oboru Sdělovací technika po vedení. V roce 1981 byl jmenován docentem pro obor telekomunikace. V rámci vědecké činnosti se zabývá problematikou nových metod přenosu a optickou komunikací. Je technickým zástupcem České republiky v IEEE Communications Society a členem Komise pro fotoniku.

Pavel REICHERT získal titul Ing. na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně v roce 2008. V současné době je studentem doktorského studia na ústavu telekomunikací. Jeho výzkumné aktivity zahrnují možnosti zlepšení kvality služeb v optických sítích a měřicí metody metalických a optických sítí.

Jan ŠPORIK získal titul Ing. na fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně v roce 2009. V současné době je studentem doktorského studia na ústavu telekomunikací. Jeho výzkumné aktivity zahrnují možnosti přenosu pomocí bezdrátových optických