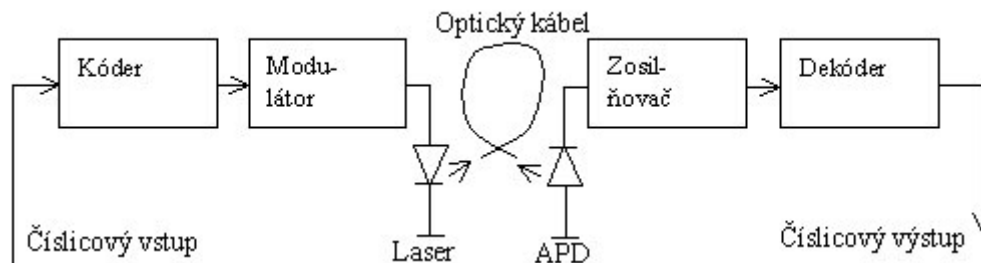


OPTICKÝ VLÁKNOVÝ SPOJ

Bloková schéma číslicového optického vláknového komunikačného systému je na obr. 1.



Obr.1 Bloková schéma číslicového OVKS

Pravdepodobnosť chyby v číslicovom optickom vláknovom komunikačnom systéme

$$P(e) = P(1)P(0|1) + P(0)P(1|0) \quad (1)$$

kde

$$P(0|1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{|i_{\text{sig}} - i_D|}{\sqrt{i_N^2} \sqrt{2}} \right\} \quad (2)$$

$$P(1|0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{|i_D|}{\sqrt{i_N^2} \sqrt{2}} \right\} \quad (3)$$

pričom

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_U^{\infty} \exp(-z^2) dz \quad (4)$$

je tzv. doplnková (komplementárna) chybová funkcia a i_{sig} je signálový prúd, i_N – aditívny šumový prúd a i_D – rozhodovacia úroveň. Po dosadení do (1) a pre binárny kód s $P(1)=P(0)=1/2$ je

$$P(e) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc} \left\{ \frac{|i_{\text{sig}} - i_D|}{\sqrt{i_N^2} \sqrt{2}} \right\} + \operatorname{erfc} \left\{ \frac{|i_D|}{\sqrt{i_N^2} \sqrt{2}} \right\} \right] \quad (5)$$

Pre symetrickú rozhodovaciu hladinu $i_D = i_{\text{sig}}/2$

$$P(e) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{i_{sig}}{2\sqrt{i_{N0}^2} \sqrt{2}} \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{\sqrt{S}}{2\sqrt{N}} \right\} \quad (6)$$

Vo všeobecnom prípade je

$$P(1|0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{|i_{sig1} - i_D|}{\sqrt{i_{N1}^2} \sqrt{2}} \right\} \quad (7)$$

$$P(1|0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{|i_D - i_{sig0}|}{\sqrt{i_{N0}^2} \sqrt{2}} \right\} \quad (8)$$

kde i_{sig0} a i_{sig1} sú signálové prúdy v stavoch “1” a “0” a $\overline{i_{N1}^2}, \overline{i_{N0}^2}$ sú zodpovedajúce stredné kvadratické hodnoty šumových prúdov, ktoré zahrňujú výstrelový aj tepelný šum. Priemerný počet fotónov požadovaných pre detekciu binárnej jednotky v čase τ pri určitom pomere S/Š.

$$z_m = \frac{2B\tau F(M)}{\eta} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (9)$$

Pre kosínusovú spektrálnu charakteristiku ($B\tau \cong 0,6$)

$$z_m = \frac{1,2F(M)}{\eta} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (10)$$

Požadovaný optický výkon dopadajúci na fotodetektor

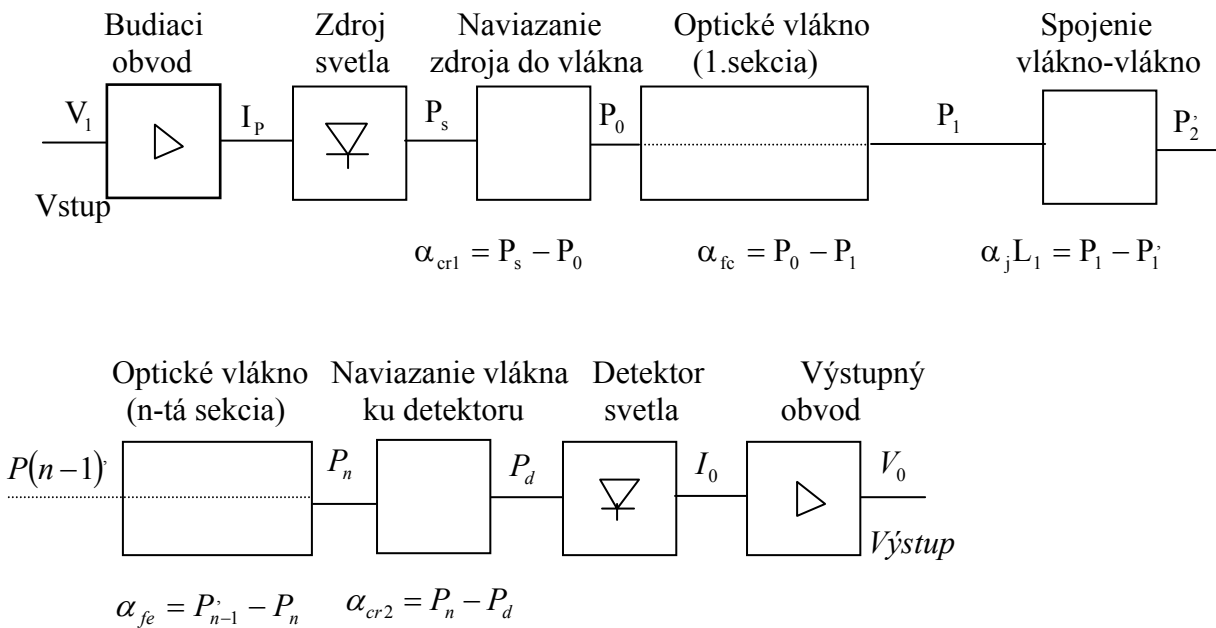
$$P_0 = \frac{E_0}{2\tau} = \frac{z_m hf}{2\tau} = \frac{z_m hf B_T}{2} \quad (11)$$

kde $B_T = 1/\tau$ je prenosová rýchlosť kanálu. Príspevky k celkovému tlmeniu prenosovej trasy optického vláknového spoja sú znázornené na obr. 2. Celkové tlmenie prenosovej trasy bez uvažovania disperzných ekvivalentných strát

$$C_L = (\alpha_{fc} + \alpha_j)L + \alpha_{cr} \quad (12)$$

s uvažovaním ekvivalentných disperzných strát

$$C_L = (\alpha_{fc} + \alpha_j)L + \alpha_{cr} + D_L \quad (13)$$



Obr. 2 Príspevky k celkovému tmeniu prenosovej trasy optického vláknového spoja

kde α_{dc} je tmenie optického kábla, α_j je ekvivalentné tmenie spojok vlákno –vlákno, α_{cr} - tmenie konektorov, L- dĺžka optického kábla a ekvivalentné disperzné straty sú

$$D_L(\text{dB}) = 2 \left(\frac{\tau_e}{\tau} \right)^4 = 2 (2\sigma B_T \sqrt{2})^4 \quad (14)$$

kde uvažujeme Gaussove impulzy, pričom τ_e je rozšírenie impulzu vplyvom disperzie prenosovej trasy, τ - čas trvania jedného bitu, σ - disperzia impulzov a B_T - prenosová rýchlosť. Celkový čas nárastu impulzu v OVKS.

$$T_{\text{sys}} = 1,1 \sqrt{T_s^2 + T_N^2 + T_c^2 + T_D^2} \quad (15)$$

kde T_s, T_n, T_c, T_D sú časy nárastu impulzu pre vysielač, OV vplyvom medzividovej (chromatickej) disperzie a pre prijímač. Maximálna prenosová rýchlosť pre systém s RZ kódom

$$B_T(\text{max}) = \frac{0,35}{T_{\text{sys}}} \quad (16)$$

pre systém s NRZ kódom

$$B_T(\text{max}) = \frac{0,7}{T_{\text{sys}}} \quad (17)$$

Výkonová bilancia optického vláknového spoja

$$P_i(\text{dB}) = P_0(\text{dB}) + C_L(\text{dB}) + M_a(\text{dB}) \quad (18)$$

kde P_i je stredná hodnota optického výkonu naviazaného do OV, P_0 je stredná hodnota optického výkonu, požadovaná na vstupe optického prijímača, C_L je celkové tlmenie prenosovej trasy (ak uvažujeme aj ekvivalentné disperzné straty, potom využijeme veličinu C_{LD}) a M_a je bezpečnostný okraj. Po dosadení zo vzťahu (12) dostaneme

$$P_i(\text{dB}) = P_0(\text{dB}) + C_L(\text{dB}) + M_a(\text{dB}) \quad (19)$$

prípadne s uvažovaním vzťahu (2.1.39) je

$$P_i(\text{dB}) = P_0(\text{dB}) + C_L(\text{dB}) + M_a(\text{dB}) + D_L \quad (20)$$

Pomer S/N pre analógový koaxiálny systém

$$\left(\frac{S}{N}\right)_c = \frac{v^2 \exp(-\alpha_{Tc})}{z_v 5kTB} \quad (21)$$

kde v je hodnota výstupného napätia, α_{Tc} je celkové tlmenie prenosovej trasy (t.j. tlmenie trasy medzi vysielačom a prijímačom), z_v je vlnový odpor koaxiálneho kábla, k je Boltzmannova konštanta, T je absolútna teplota a B je efektívna šírka frekvenčného pásma systému. Pomer S/N pre analógový OVKS

$$\left(\frac{S}{N}\right)_f = \frac{\eta P_0}{2\hbar\omega B} = \frac{P_i \exp(-\alpha_{Tf})}{2hfB} \quad (22)$$

Priama intenzitná modulácia (D-IM):

Časová závislosť optického výkonu

$$P_{\text{opt}}(t) = P_i(1 + m(t)) \quad (23)$$

Modulačný signál

$$m(t) = m_a \cos \omega_m t \quad (24)$$

kde m_a je modulačný index a ω_m je frekvencia modulačného signálu. Pomer S/N pre optický prijímač sa APD

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{rms}} = \frac{i_{\text{sig}}^2}{i_N^2} = \frac{\frac{1}{2}(m_a M I_P)^2}{2eB(I_P + I_d)M^2 F(M) + \frac{4dTBF_n}{R_L}} \quad (25)$$

a pre optický prijímač s fotodiódou PIN

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{rms} = \frac{\frac{1}{2}(m_a I_p)}{2eB(I_p + I_d) + \frac{4kTBF_n}{R_L}} \quad (26)$$

Pri uvažovaní výkonu obrazového signálu špička-špička

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{P-P} = \frac{(2m_a I_p b)^2}{2eB(I_p + I_d) + \frac{4kTBF_n}{R_L}} \quad (27)$$

Optický výkon pri D-IM

$$P_0 = \frac{4\hbar\omega B}{m_a^2 \eta} \left(\frac{S}{N}\right)_{rms} \quad (28)$$

pre dominantný kvantový šum a

$$P_0 = \frac{\hbar\omega\sqrt{B}}{e\eta m_a^2} \sqrt{\frac{8kTF_n}{R_L} \left(\frac{S}{N}\right)_{rms}} \quad (29)$$

pre dominantný tepelný šum.

Intenzitná modulácia subnosnej vlny:

Všeobecný vzťah pre pomer S/N pre D-IM signál

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{N}\right)_{rms} &= \frac{\overline{i_{sig}^2}}{i_N^2} = \frac{(I_p M)^2 P_m}{2eB_m(I_p + I_d)M^2 F(M) + \frac{4kTBF_n}{R_L}} = \\ &= \frac{I_p^2 P_m}{2B_m e(I_p + I_d)F(M) + \frac{4dTBF_n}{R_L}} = \frac{(RP_0)^2 P_m}{2B_m N_0} \end{aligned} \quad (30)$$

kde

$$N_0 = e(I_p + I_d)F(M) + \frac{4kTBF_n}{M^2 R_L} \quad (31)$$

$$P_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-2\pi B_m}^{2\pi B_m} S_m(\omega) d\omega \quad (32)$$

$S_m(\omega)$ je spektrálna hustota signálu $m(t)$. Obojstranná intenzitná modulácia subnosnej vlny:
Modulačný signál

$$m(t) = A_c a(t) \cos \omega_c t \quad (33)$$

kde A_c je amplitúda, ω_c je frekvencia subnosnej vlny, $a(t)$ – informačný signál. Optický signál

$$P_{\text{opt}}(t) = P_i (1 + a(t) \cos \omega_c t) \quad (34)$$

Pomer S/N na vstupe DSB-IM systému

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{rms}}^{\text{in DSB}} = \frac{(RP_0^2) P_a / 2}{4B_a N_0} = \frac{(RP_0)^2 P_a}{8B_a N_0} \quad (35)$$

a na výstupe DSB-IM systému

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{rms}}^{\text{ort DSB}} = 2 \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{rms}}^{\text{in DSB}} = \frac{(RP_0)^2 P_a}{8B_a N_0} \quad (36)$$

Frekvenčná modulácia subnosnej vlny:

Modulačný signál

$$m(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + k_f \int_0^t a(\tau) d\tau \right] \quad (37)$$

kde k_f je frekvenčná odchýlka.

Carsonov vzťah

$$B_m \cong 2(D_f + 1)B_a \quad (38)$$

kde f_d je maximálna frekvenčná odchýlka a B_a je šírka frekvenčného pásma informačného signálu $a(t)$.

Pomer S/N na vstupe FM-IM systému

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{rms}}^{\text{in FM}} = \frac{(RP_0)^2 (A_c / 2)}{2B_m N_0} \quad (39)$$

a na výstupe FM-IM systému

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{rms}^{out FM} = 6D_f^2(D_f^2 + 1) \frac{P_a (RP_0)^2 (A_c^2 / 2)}{2B_m N_0} = \frac{3D_f^2 P_a (RP_0)^2 A_c^2}{4B_a N_0} \quad (40)$$

Fázová modulácia subnosnej vlny:

Modulačný signál

$$m(t) = A_c \cos[\omega_c t + k_p a(t)] \quad (41)$$

kde k_p je koeficient fázovej odchýlky.

Carsonov vzťah

$$B_m \cong 2(D_p + 1)B_a \quad (42)$$

kde

$$D_p = \frac{f_d}{B_a} \quad (43)$$

je pomer maximálnej frekvenčnej odchýlky f_d subnosnej vlny a šírky frekvenčného pásma B_a informačného signálu. Pomer S/N na vstupe PM-IM systému.

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{rms}^{in PM} = \frac{(RP_0)^2 A_c^2}{4B_m N_0} \quad (44)$$

a na výstupe PM-IM systému

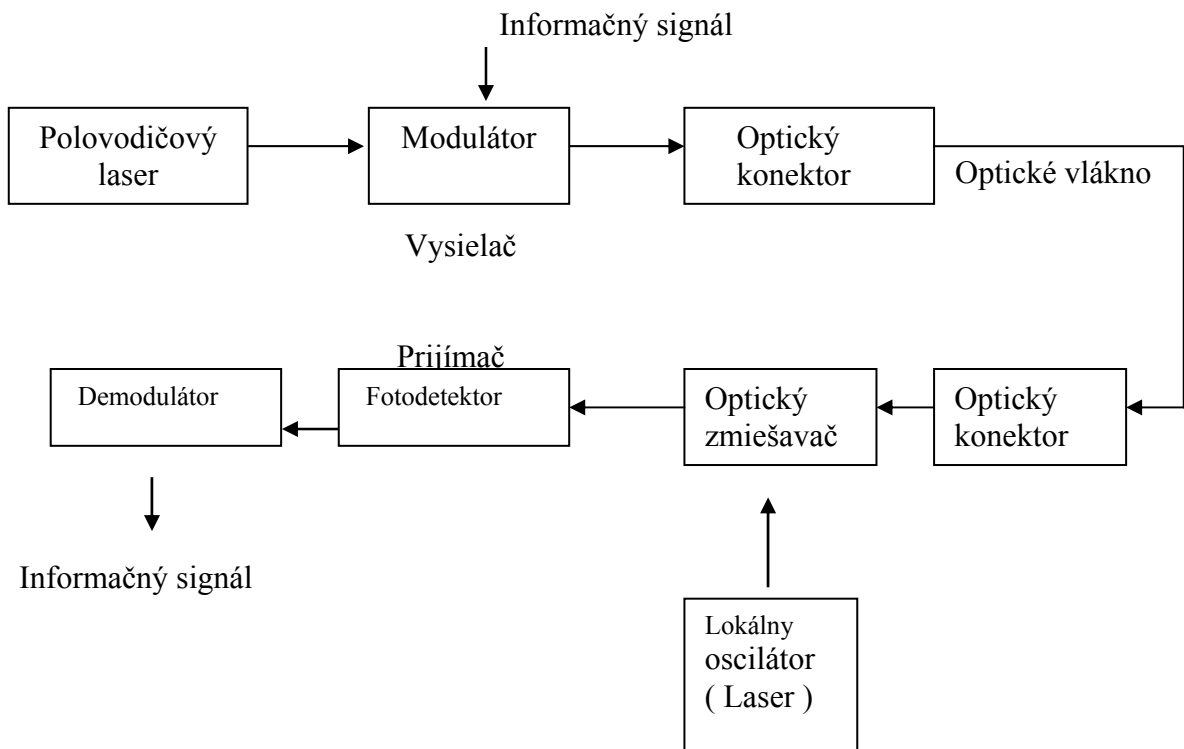
$$\left(\frac{S}{N}\right)_{rms}^{out PM} = \frac{D_p^2 P_a (RP_0)^2 A_c^2}{4B_a N_0} \quad (45)$$

Pulzne frekvenčná modulácia (PFM) :

Pomer S/N na výstupe PFM-IM systému

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{p-p} = \frac{3(T_0 f_D M R P_{po})^2}{(2\pi T_R B)^2 i_N^2} \quad (46)$$

kde T_0 je nominálna hodnota periódy impulzov (je ekvivalentná prevrátenej hodnote frekvencie impulzov f_0), f_D je maximálna frekvenčná odchýlka, R je citlivosť fotodiódy, M je multiplikačný koeficient fotodiódy, P_{po} je maximálna hodnota prijatého optického výkonu, T_R je doba nárastu impulzov na výstupe regeneračného obvodu, B je šírka frekvenčného pásma a i_N^2 je stredná kvadratická hodnota šumového prúdu optického prijímača. Na obr. 3 je bloková schéma koherentného optického vláknového komunikačného systému.



Obr. 3 Bloková schéma koherentného OVKS

PRÍKLADY

Príklad 1 V optickom prijímači širokopásmového binárneho optického vláknového komunikačného systému PCM je použitá dobrá lavínová fotodióda (APD). Rozhodovacia úroveň je položená uprostred medzi úrovňou signálu nuly a jednotky. APD má kvantovú účinnosť 80 %, pomer ionizačných koeficientov je 0,02 a pracuje s multiplikačným faktorom 100. Optický prijímač pracuje pri vlnovej dĺžke $1 \mu\text{m}$. Uvažujte kód s rovnakou hustotou „jednotiek“ a „núl“. Vypočítajte požadovanú výkonovú úroveň optického signálu (W,dB,dBm) dopadajúceho na APD na registráciu binárnej jednotky pre priemerný počet dopadajúcich fotónov = 864 a chybovosť 10^{-9} pri prenosovej rýchlosti : (a) 10 Mbits^{-1} ; (b) 140 Mbits^{-1} .

((a) $P_0 = 858,2 \text{ pW} = -90,7 \text{ dB} = -60,7 \text{ dBm}$, (b) $P_0 = 12,015 \text{ pW} = -79,2 \text{ dB} = -49,2 \text{ dBm}$)

Príklad 2 Optický vláknový komunikačný systém pracuje s optickým vysielačom osadeným elektroluminiscenčnou diódou (LED). Do optického kábla je pri vlnovej dĺžke $0,8 \mu\text{m}$ z tohto vysielača naviazaný optický výkon $300 \mu\text{W}$. Optický kábel vrátane optických

spojok má priemerné tlmenie 4 dBkm^{-1} . V systéme použitý optický prijímač osadený lavínovou diódou (APD) vyžaduje na detekciu binárnej jednotky pri chybovosti $\text{BER}=10^{-10}$ dopad 1200 fotónov. Vypočítajte maximálnu prekenuateľnú vzdialenosť týmto optickým vláknovým komunikačným systémom (bez opakovačov) pre prenosovú rýchlosť 1 Mbits^{-1} a 1 Gbits^{-1} tak, aby chybovosť $\text{BER}=10^{-10}$ zostala zachovaná.

$$\text{(a) } P_o = \frac{z_m hc B_T}{2\lambda} \quad P_0 = 149 \text{ pW} \quad , \quad L(\text{max}) = \frac{10 \cdot \log \frac{P_i}{P_o}}{\alpha} \quad L(\text{max}) = 15,76 \text{ km}; \quad \text{(b) } P_0 = 149 \text{ nW} \quad , \quad L(\text{max}) = 8,26 \text{ km}$$

Príklad 3 Optický vláknový spoj dĺžky 4 km je vybudovaný z optického kábla s tlmením 5 dBkm^{-1} . Tlmenie spojok použitých v trase je 2 dBkm^{-1} a tlmenie konektorov na pripojenie zdroja a detektora optického žiarenia je 3,5 a 2,5 dB. Ak zanedbáte vplyv disperzie optického kábla vypočítajte celkové tlmenie prenosovej trasy tohoto optického vláknového spoja.

$$(C_L = (\alpha_{fc} + \alpha_j)L + \alpha_{cr} = 34 \text{ dB})$$

Príklad 4 Optický vláknový spoj používa optický kábel s tlmením 7 dBkm^{-1} . Priemerná hodnota vloženého tlmenia spojok v tomto poli je $1,5 \text{ dBkm}^{-1}$. Vložené tlmenie konektorov pre zdroj a fotodetektor je 4 dB. Za predpokladu, že bezpečnostný okraj nemusí byť uvažovaný, sú celkové povolené straty na optický vláknový spoj 37 dB. Predpokladajte, že vlastnosti systému sú ohraňované predovšetkým jeho tlmením, vypočítajte maximálnu vzdialenosť prekenuateľnú týmto optickým vláknovým spojom.

$$(C_L = (\alpha_{fc} + \alpha_j)L + \alpha_{cr} \Rightarrow L = \frac{C_L - \alpha_{cr}}{\alpha_{fc} + \alpha_j} = \frac{37 - 4}{7 + 1,5} = 3,88 \text{ km})$$

Príklad 5 Optický vláknový komunikačný systém pracuje bez opakovačov na dĺžku 8 km. Časy nárastu impulzu pre jednotlivé prvky systému sú:

Zdroj (LED)	8 ns
Vláknó: medzividová disperzia	5 nskm^{-1}
vnútrovidová disperzia	1 nskm^{-1}
Detektor (fotodióda PIN)	6 ns.

Vypočítajte celkový čas nárastu impulzu pre celý systém a maximálnu prenosovú rýchlosť za predpokladu použitia NRZ binárneho kódu.

$$(T_{\text{sys}} = 1,1 \cdot \sqrt{T_S^2 + T_N^2 + T_C^2 + T_D^2} = 46,2 \text{ ns}, B_T(\text{max}) = \frac{0,7}{T_{\text{sys}}} = 15,2 \text{ Mbits}^{-1}; \text{Celkový čas nárastu dovoľuje}$$

pre systém maximálnu prenosovú rýchlosť 15,2 Mbits⁻¹, čo pre NRZ kód je ekvivalentné 3 dB optickej šírke frekvenčného pásma 7,6 MHz (pretože NRZ formát má 2 bitové intervaly na vlnovú dĺžku))