

Optické komunikácie

Digitálne systémy

Dr.h.c. Prof. RNDr. Ing. Ján Turán, DrSc., KEMT FEI TU Košice

Číslicové a analógové prenosové technológie:

- q Intenzitná modulácia/Priama detekcia
(Intensity Modulation/Direct Detection - IM/DD)
- q Koherentný prenos
- q Multiplex subnosných vln

Technológia koherentného prenosu:

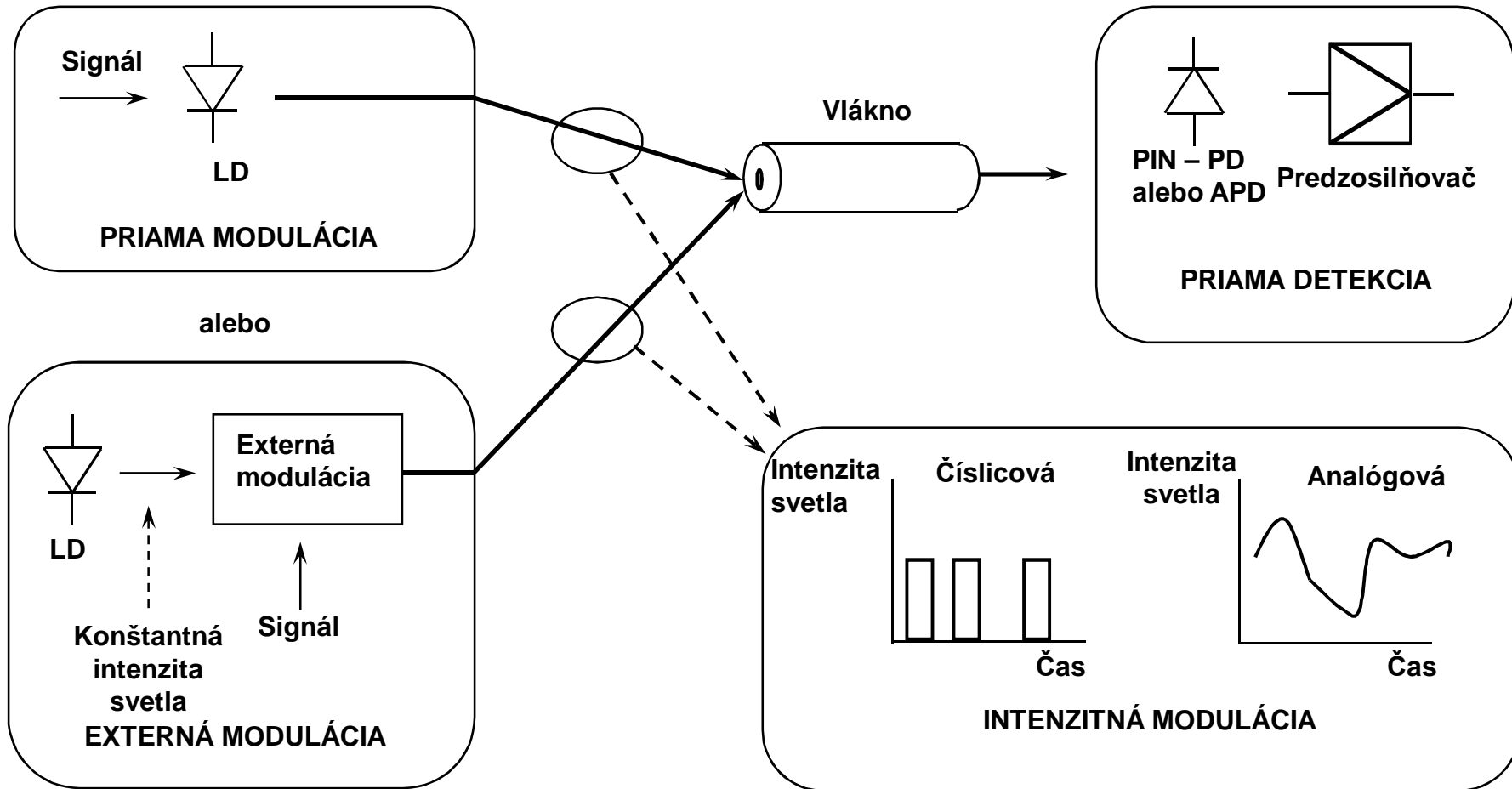
- n Využíva vlnový charakter koherentného žiarenia (fáza, frekvencia)
- n Modulačné metódy FSK, PSK
- n Heterodynná detekcia a homodynná detekcia
- n Väčšie prenosové vzdialenosti bez použitia opakovačov
- n Jednovidový prenos

3.1 INTENZITNÁ MODULÁCIA A PRIAMA DETEKCIA

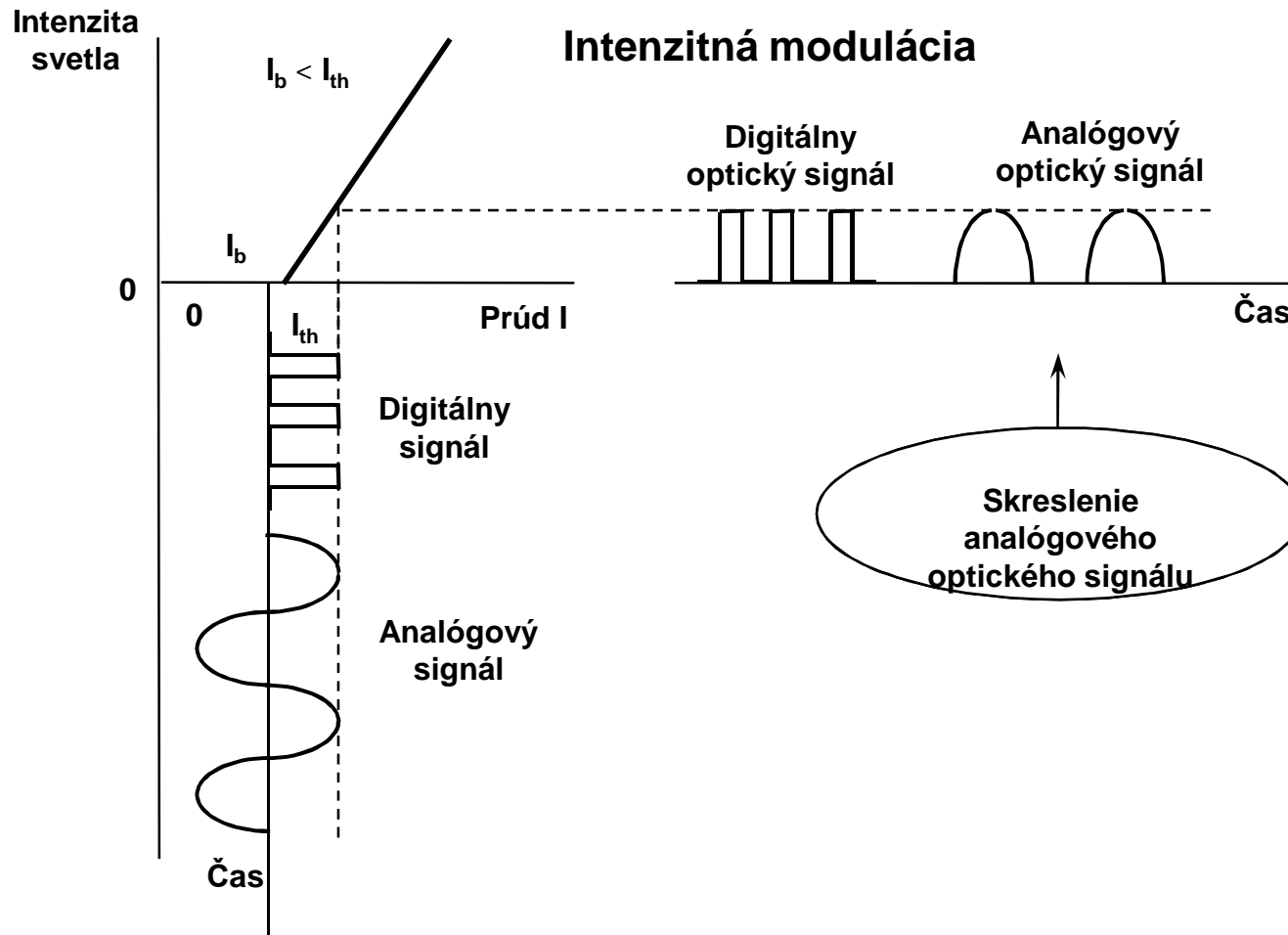
- n Využitie hlavne v optických užívateľských systémoch

3.1.1 INTENZITNÁ MODULÁCIA

- n Komerčne dostupné laserové diódy
- n Prahová hodnota prúdu : $I_{th} = 10 - 20 \text{ mA}$
- n V laboratóriách skúšané LD s $I_{th} < 1 \text{ mA}$
- n Predpoklady pre vývoj LD s veľmi malou I_{th}

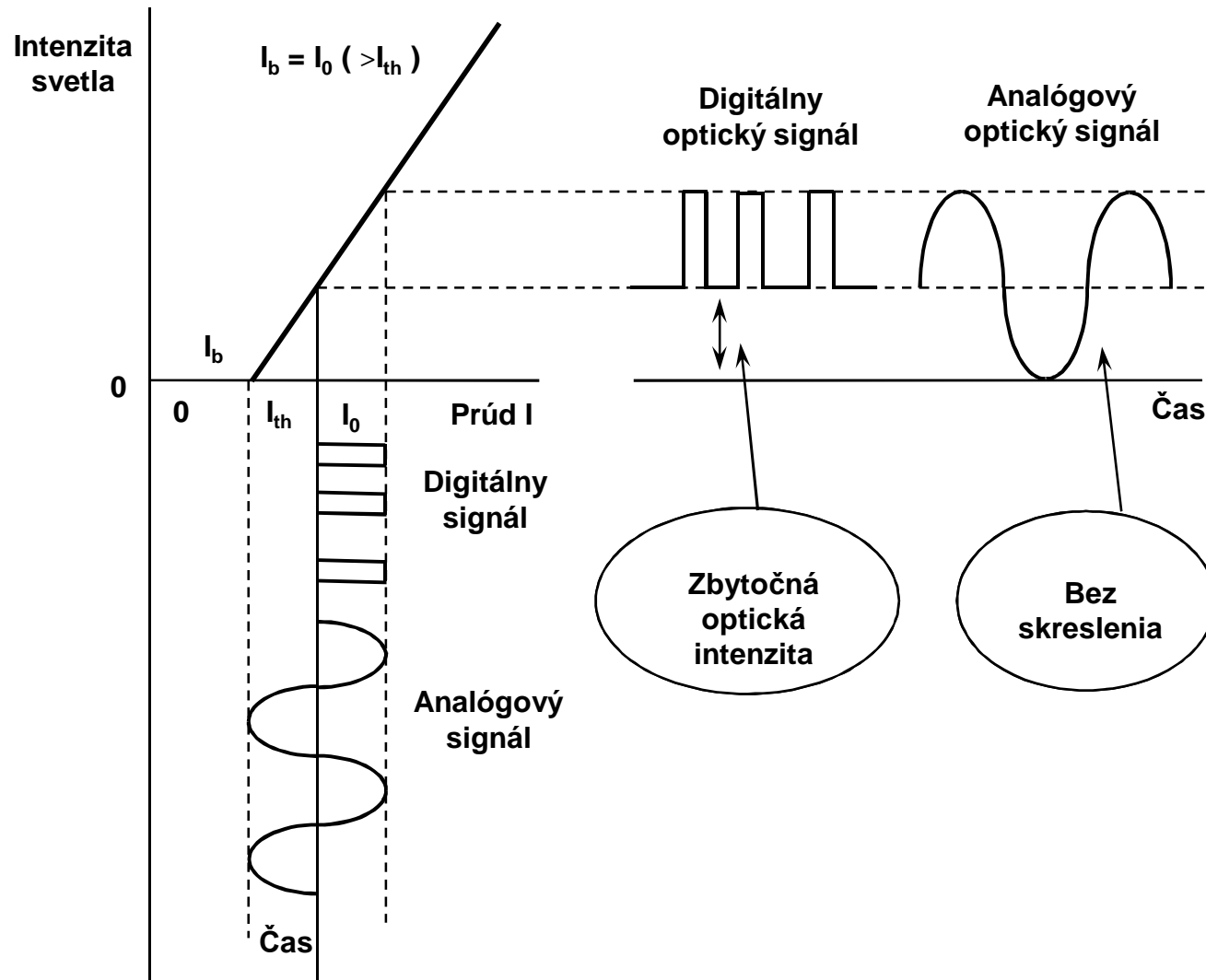


Obr.3.1 Princíp IM / DD



Obr.3.2 LD budená s $I_b < I_{th}$

Intenzitná modulácia

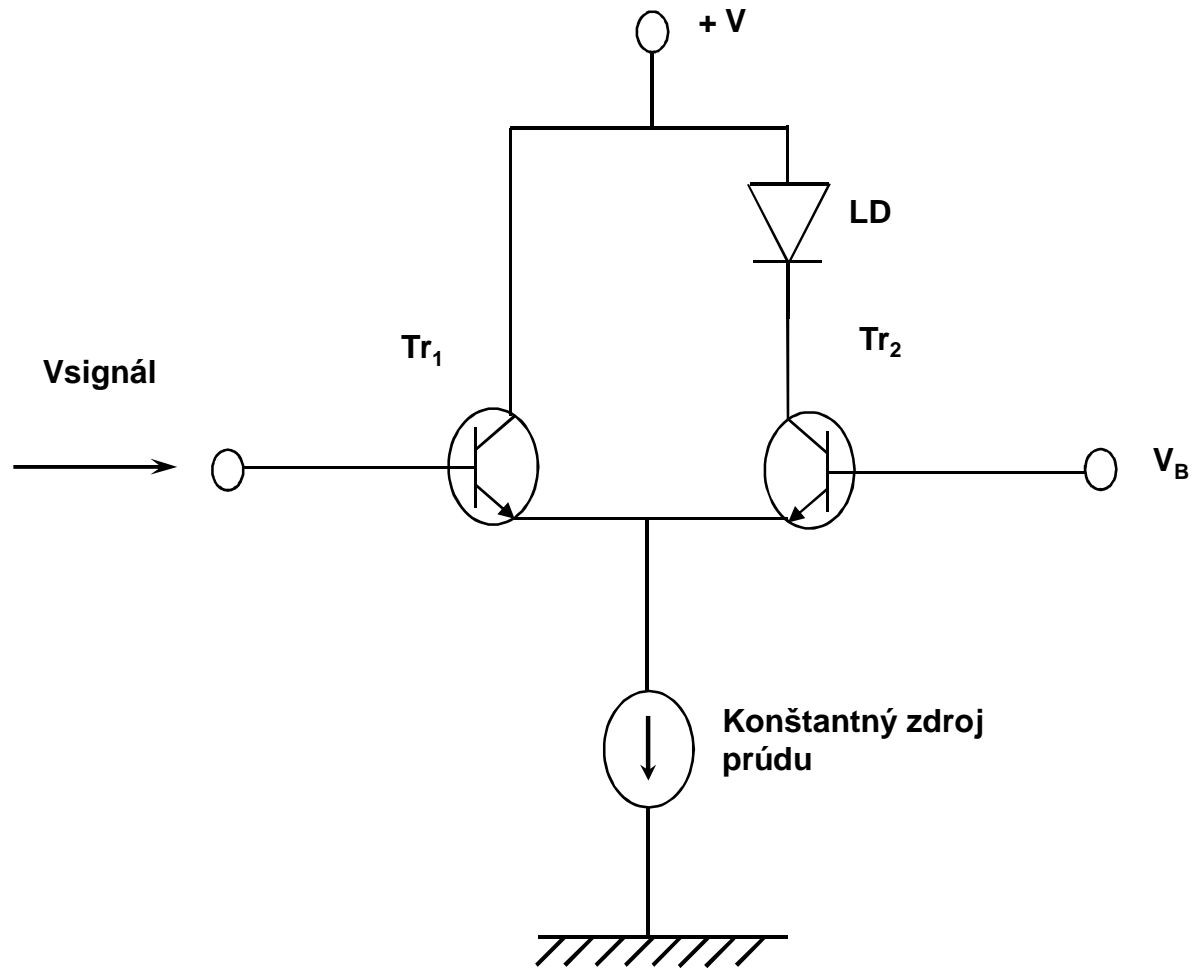


Obr.3.3 LD buďená s $I_b = I_0$ ($I_0 > I_{th}$)

Prahový prúd I_{th} je závislý od teploty:

$$I_{th} = I_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (3.1)$$

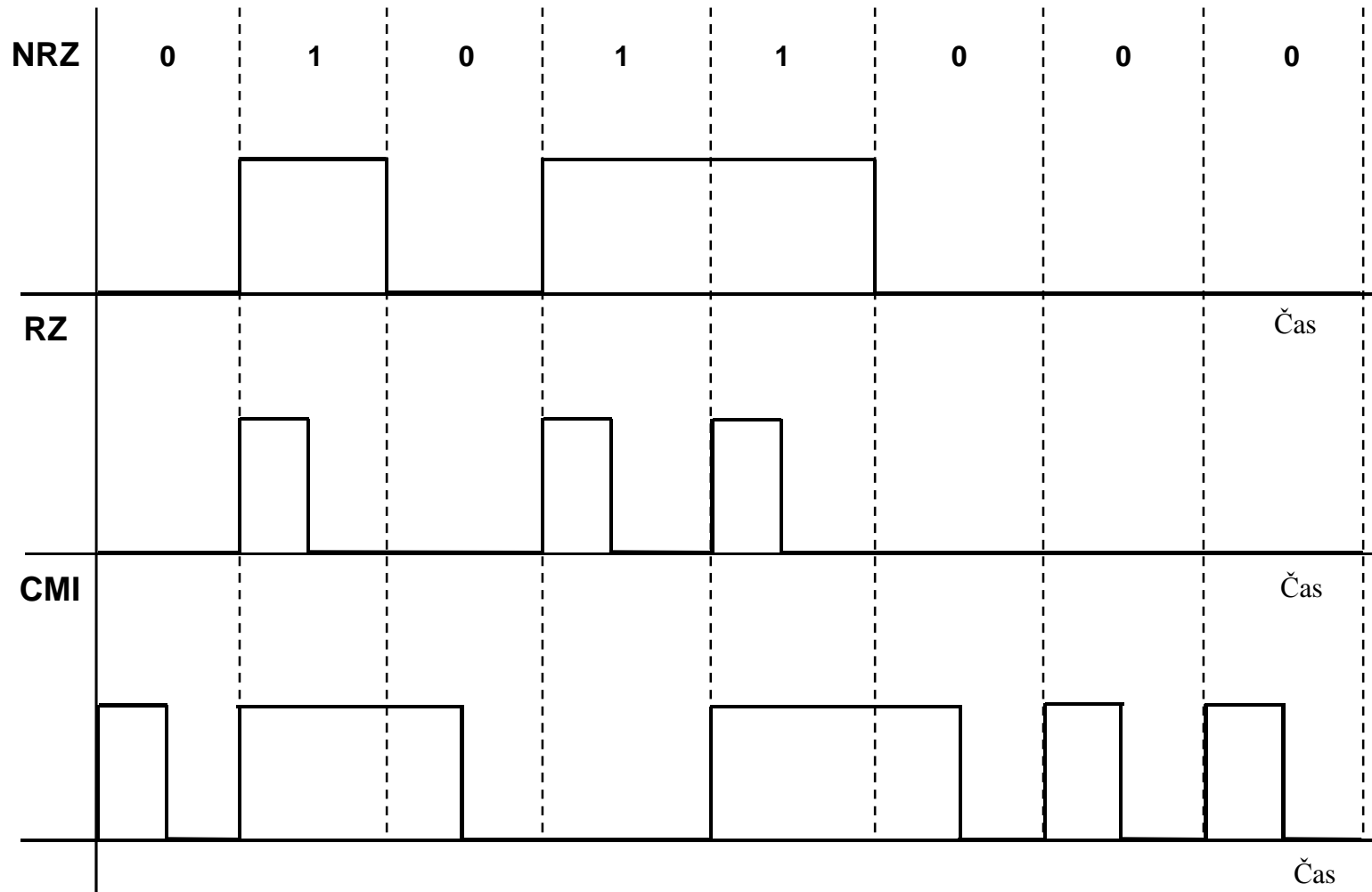
- Kde
- I_0 je konštantný prúd
 - T_0 je špecifická teplota (InGaAsP lasery: T_0 od 40°C do 50°C)
 - T je okamžitá teplota



Obr. 3.4 Príklad obvodu modulácie LD

Vplyv zmien teploty možno **stabilizovať** dvoma spôsobmi:

- 1.) **Automatická kontrola riadenia** - monitorovací fotodetektor (PD) , monitoruje optický výkon vysielaný zdrojom
- 2.) **Automatická kontrola teploty**
 - tepelný senzor
 - termistor v kombinácii s Peltierovým chladiacim článkom
 - relatívne veľká spotreba prúdu



Obr. 3.5 Linkové kódy.

3.1.2 PRIAMA DETEKCIA

Priama detekcia digitálneho signálu

Šum σ^2 v optickom prijímači:

$$\sigma^2 = \langle i_s^2 \rangle + \langle i_d^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle \quad (3.2)$$

- kde
- $\langle i_s^2 \rangle$ - je stredná kvadratická hodnota šumu výstrelového prúdu
 - $\langle i_d^2 \rangle$ - je stredná kvadratická hodnota šumu prúdu za tmy
 - $\langle i_t^2 \rangle$ - je stredná kvadratická hodnota prúdu tepelného šumu a šumu predzosilňovača

Tepelný šum so šumom predzosilňovača:

$$\langle i_t^2 \rangle = \frac{4kTFB}{R_L} \quad (3.3)$$

- Kde
- k je Boltzmannova konštanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J / K)
 - T je absolútna teplota
 - F je šumové číslo príslušného predzosilňovača
 - B je šírka pásma

Šum σ^2 v optickom prijímači s lavínovou fotodiódou APD:

$$S^2 = 2e \left[he \left\{ \frac{P_s}{\hbar\omega + I_m} \right\} \langle M \rangle^{2+x} + I_n \right] + \frac{4kTFB}{R_L} \quad (3.4)$$

kde • I_m a I_n sú konštanty

Šum σ^2 v optickom prijímači s PIN fotodiódou:

$$S^2 = 2e \left[\frac{heP_s}{hw + I_d} \right] B + \frac{4kTFB}{R_L} \quad (3.5)$$

Úroveň signálu , 0 ' $S_1^2 = \langle i_{s1}^2 \rangle + \langle i_d^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle$ (3.6)

Úroveň signálu , 1 ' $S_0^2 = \langle i_{s0}^2 \rangle + \langle i_d^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle$ (3.7)

Signál detekovaný fotodiódou:

$$i_s = \eta e \langle M \rangle \left(\frac{P_s}{h\omega} \right) \quad (\text{APD}) \quad (3.8)$$

$$i_s = \eta e \left(\frac{P_s}{h\omega} \right) \quad (\text{PIN}) \quad (3.9)$$

- n Šum optického prijímača závisí od úrovne vstupného signálu
- n Prúdová úroveň S_1 je definovaná pre úroveň $, 1'$,
potom $P_s = P_1$
- n Úroveň S_0 je definovaná úrovňou $, 0'$,
potom $P_s = P_0$

Chybovosť systému závisí od pravdepodobnosti výskytu symbolov:

$$P_e = P_r(0)P_e(0) + P_r(1)P_e(1) = \frac{P_e(0) + P_e(1)}{2} \quad (3.10)$$

- kde
- P_r je pravdepodobnosť symbolu (, 0 ' alebo , 1 ')
 - P_e je pravdepodobnosť prijatia chybného symbolu

Pre jednoduchosť : $P_r(0) = P_r(1) = 1/2$

Priebeh pravdepodobnosti výskytu symbolu vyhovuje Gaussovej krivke, preto pre výpočet chybovosti systému možno využiť **Gaussovú aproximáciu**:

$$P_e = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{2p}S_0} \int_D^{\infty} \exp\left\{-\frac{(i-S_0)^2}{2S_0^2}\right\} di + \frac{1}{\sqrt{2p}S_1} \int_{-\infty}^D \exp\left\{-\frac{(i-S_1)^2}{2S_1^2}\right\} di \right] \quad (3.11)$$

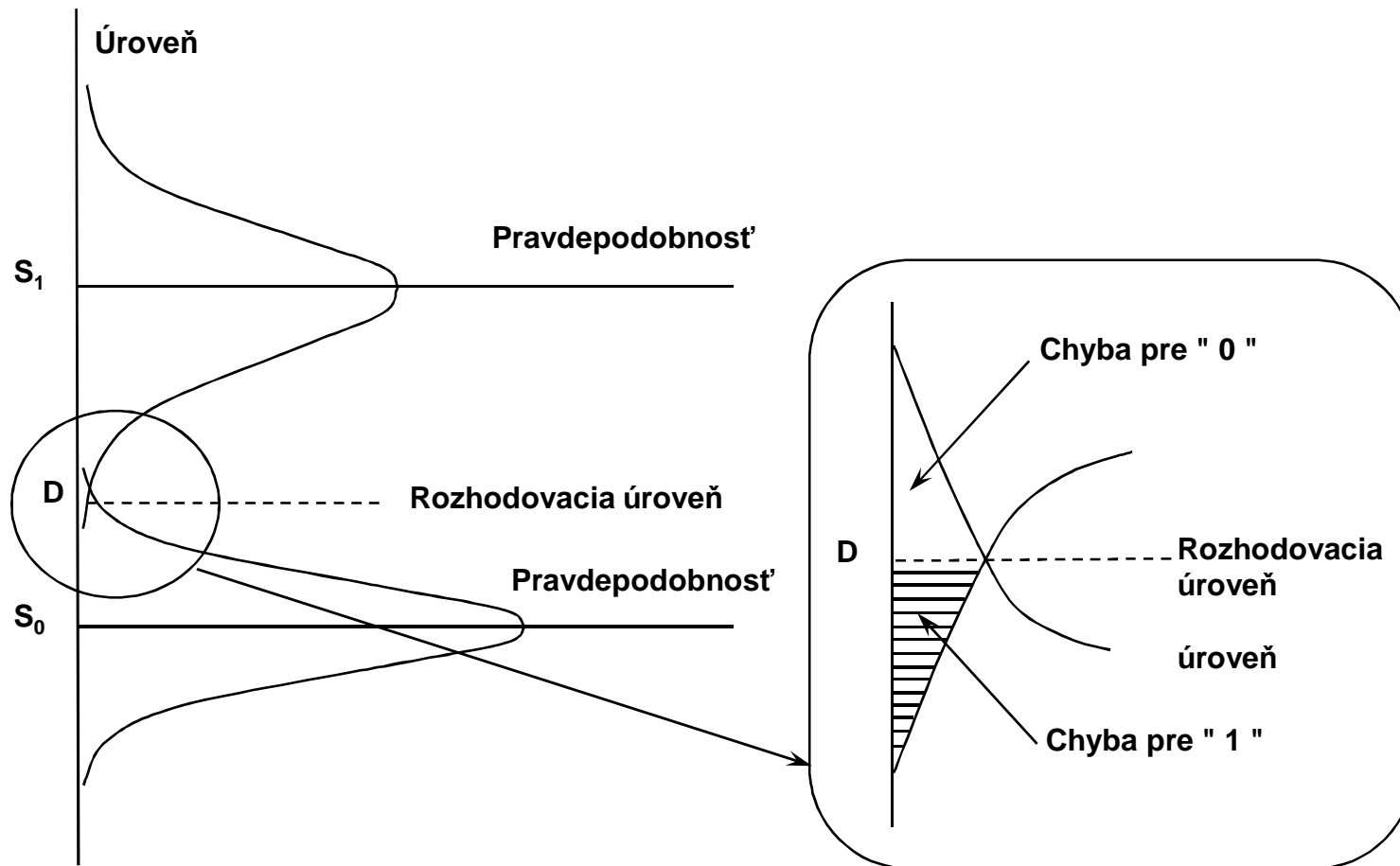
$$= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{Q_0}^{\infty} \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right) dx + \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{Q_1}^{\infty} \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right) dx \right]$$

kde :

$$Q_0 = \frac{D - S_0}{S_0} \quad (3.12)$$

$$Q_1 = \frac{S_1 - D}{S_1} \quad (3.13)$$

n D je rozhodovacia úroveň



Obr. 3.6 Rozhodovacia úroveň pre IM/DD.

Ak určíme D pre $P_e(0) = P_e(1)$, potom $Q_0 = Q_1 = Q$

Potom:

$$Q = \frac{S_1 - S_0}{S_1 + S_0} \quad \text{kde } S_1 \neq S_0 \quad (3.14)$$

$$D = \frac{S_0 S_1 - S_1 S_0}{S_1 + S_0}$$

Pravdepodobnosť chyby, tzv. **chybovosť** systému ako funkcia Q :

$$P_e(Q) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_Q^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.15)$$

kde • erfc je **komplementárna chybová funkcia**

Komplementárna chybová funkcia:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{p}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt = \frac{2}{\sqrt{2p}} \int_{\sqrt{2x}}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (3.16)$$

Aproximácie pre zjednodušený výpočet chybovosti systému P_e :

$$n \quad 1.A \quad P_e \approx \left\{ \frac{1}{Q\sqrt{2p}} \left(1 - \frac{0.7}{Q^2} \right) \right\} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right) \quad (3.17)$$

$$n \quad 2.A \quad P_e \approx \left\{ \frac{1}{Q\sqrt{2p}} \right\} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right) \quad (3.18)$$

POROVNANIE PRESNEJ HODNOTY A APROXIMÁCIÍ PRE VÝPOČET CHYBOVOSTI

Q	1	2	3	4	5	6
Presná hodnota	0,1587	0,0227	0,00135	$3,16 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-7}$	$9,9 \cdot 10^{-10}$
Aproximácia 1 (vzťah 3.17)	0,0726	0,0223	0,00136	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$2,89 \cdot 10^{-7}$	$9,9 \cdot 10^{-10}$
Aproximácia 2 (vzťah 3.18)	0,242	0,027	0,00148	$3,35 \cdot 10^{-5}$	$2,97 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$

Vzťah medzi pomerom signál/šum a chybovosťou pre pomer výkonu signálu ku šumu pre úroveň , 1 ':

$$S/N = \frac{\frac{1}{2} S_1^2 R_L}{\frac{1}{2} S_1^2 R_L} = \frac{S_1^2}{S_1^2} \quad (3.19)$$

kde • R_L je zaťažovacia impedancia

Predpokladajme:

- 1.) Ak je úroveň , 0 ' , svetelný signál sa neprenáša ($S_0 = 0$).
- 2.) Ak $\sigma_1 = \sigma_0$, hoci v skutočnosti $\sigma_1 > \sigma_0$ ($\sigma_1 \neq \sigma_0$).

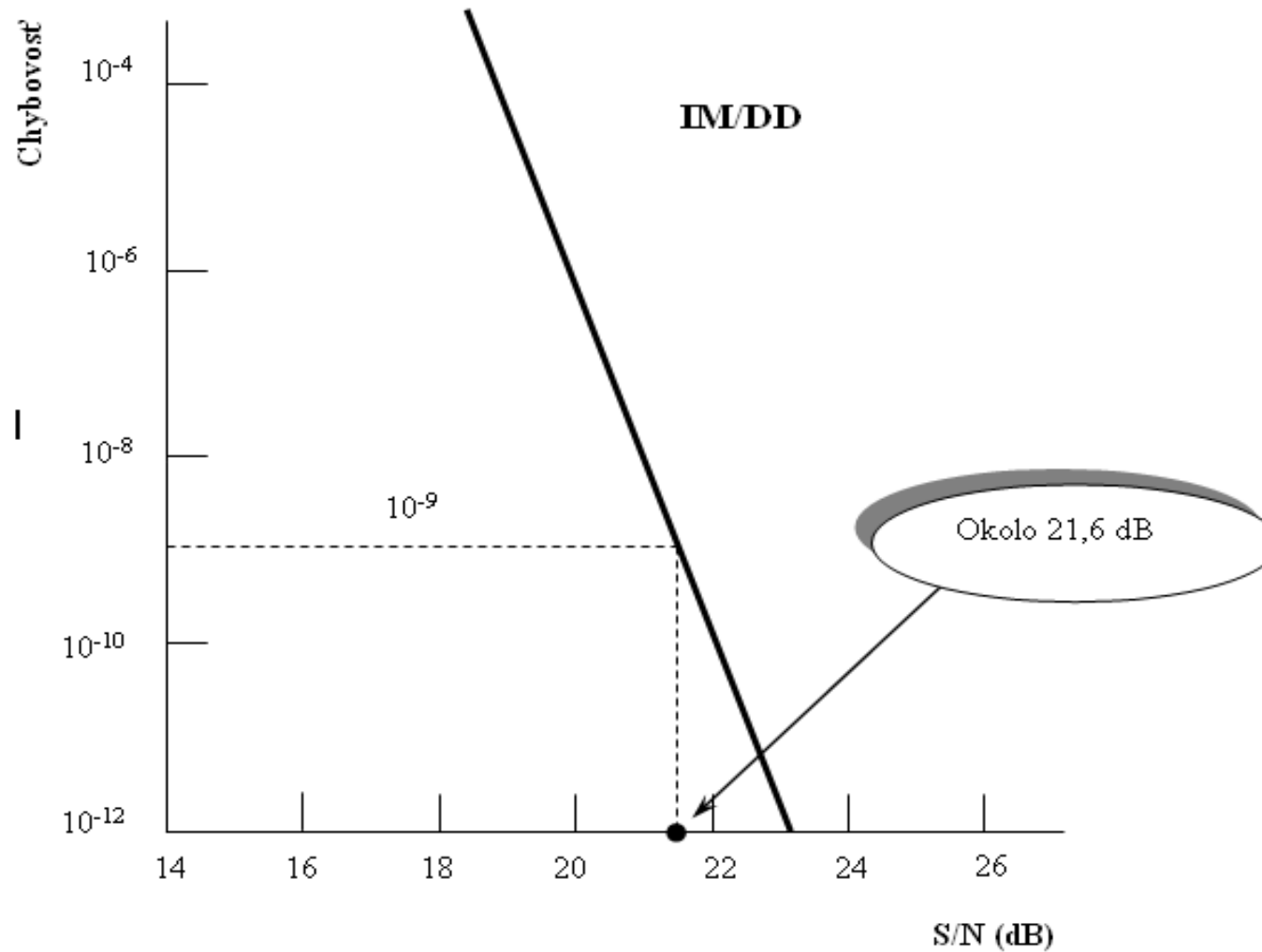
Potom:

$$Q = \frac{S_1}{2S_1} = \frac{1}{2} \sqrt{S/N} \quad (3.20)$$

Dosadením do vzťahu (3.15) dostaneme:

$$P_e(S/N) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{\frac{1}{2}\sqrt{S/N}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (3.21)$$

Typická chybovosť pre optické spoje : $P_e = 10^{-9}$ je pre $Q = 6$
Výpočtom dostaneme $S/N = 21,6$ dB



Obr. 3.7 Závislosť chybovosti od pomeru S/N pre IM/DD systém.

3.2 CITLIVOSŤ PRIJÍMAČA S POUŽITÍM PIN DIÓDY

Definovaná ako minimálny vstupný optický výkon prijímača pre žiadanú chybovosť (obyčajne $P_e = 10^{-9}$)

Hlavný šumový príspevok prijímača je **tepelný šum predzosilňovača**

$$S_1 = S_0 = \sqrt{\langle i_t^2 \rangle}$$

Extičný pomer E_x :

$$E_x = \frac{P_1}{P_0} \quad (3.22)$$

kde • P_1, P_0 je výkon reprezentovaný symbolom , 1 ' resp. (, 0 ')

Parameter Q s využitím Ex:

$$Q = \frac{S_1 - S_0}{S_1 + S_0} = \frac{heP_1 \left(1 - \frac{1}{E_x}\right)}{2\hbar\omega \sqrt{\langle i_t^2 \rangle}} \quad (3.23)$$

Z výrazu (3.23) vyjadríme P_1 :

$$P_1 = \frac{2\hbar\omega Q \sqrt{\langle i_t^2 \rangle}}{he \left(1 - \frac{1}{E_x}\right)} \quad (3.24)$$

Priemerný výkon P, potrebný na dosiahnutie určitej chybovosti

$$P = \frac{P_1 + P_0}{2} = \frac{P_1}{2} \left(1 + \frac{1}{E_x}\right) = Q \frac{E_x + 1}{E_x - 1} \left(\frac{\hbar\omega}{he}\right) \sqrt{\langle i_t^2 \rangle} \quad (3.25)$$

Ak $E_x \gg 1$

$$P = Q \frac{hw}{he} \sqrt{\langle i_t^2 \rangle} \quad (3.26)$$

Degradácia citlivosti prijímača vplyvom E_x :

$$\Delta P = 10 \log \left(\frac{E_x + 1}{E_x - 1} \right) [dB] \quad (3.27)$$

Požadovaný vstupný optický výkon je zväčšený o ΔP
 Napr. pre $E_x = 10$ je $\Delta P = 0,87$ dB

3.3 PRIJÍMAČ S LAVÍNOVOU FOTODIÓDOU - APD

- n So zväčšovaním M sa zlepšuje citlivosť prijímača zmenšovaním tepelného šumu
- n Pre S/N neplatí aproximácia $\sigma_1^2 \approx \langle i_t^2 \rangle$

Šum v prijímači APD vzrastá s $\langle M \rangle^{2+x} + C$,

- C je konštanta - termálny šum

Existuje **optimálna hodnota** $M = M_{opt}$, pre ktorú je S/N maximálny

Ak je termálny šum prevládajúci:

$$h_{APD} P_{APD} = \frac{2}{\langle M_{opt} \rangle} h_{PIN} P_{PIN} \quad (3.28)$$

kde • h_{APD} , h_{PIN} sú kvantové účinnosti pre APD a PIN - PD

n Ctlivosť prijímača s APD sa zvýši o 17 dB pre $M_{opt} = 100$,

ak $h_{APD} = h_{PIN}$

n Ctlivosť prijímača Si APD sa zlepši o 10-15 dB pre $M_{opt} = 30 - 100$

n Pre prijímače InGaAs sa zlepši o 5 - 10 dB pre $M_{opt} = 5 - 35$

3.4 PRESNÁ ANALÝZA CITLIVOSTI PRIJÍMAČA S APD

n **S . D . Personick** - jeho výsledky sú:

Výstrelový šum zodpovedajúci signálu:

$$\langle i_s^2 \rangle = 2e \left(\frac{he}{hw} \right) \langle M \rangle^{2+x} P_s B I_1 \quad (3.29)$$

Prúd za tmy:

$$\langle i_d^2 \rangle = 2e \left(I_m \langle M \rangle^{2+x} + I_n \right) B I_2 \quad (3.30)$$

kde • I_1 , I_2 , I_m , I_n sú konštanty.

Ďalší rozbor citlivosti prijímača s APD závisí od predzosilňovača

Pre FET tranzistory:

$$\langle i_t^2 \rangle = \left[\frac{4kT}{R_L} \left(1 + \left\{ \frac{\Gamma}{g_m R_L} \right\} + 2eI_g \right) \right] BI_2 + 4kT \Gamma \left[\frac{(2pC_T)^2}{g_m} \right] B^3 I_3 \quad (3.31)$$

kde

- I_g je hradlový zvodový prúd
- g_m je zisk tranzistora
- G je numerický faktor pre FET, ktorý závisí od materiálu (pre Si FET je $\Gamma = 0,7$ a pre GaAs FET je $\Gamma = 1,1$)
- C_T je celková kapacita (kapacita púzdra tranzistora, ako aj samotného tranzistora)

Pre bipolárne tranzistory:

$$\begin{aligned} \langle i_t^2 \rangle = & 2eI_b BI_2 + \frac{2eI_c}{g_m^2} \left[\left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{r_{bc}} \right)^2 BI_2 + (2pC_T)^2 B^3 I_3 \right] \quad (3.32) \\ & + 4ktr_{bb} \left[\frac{BI_2}{R_L^2} + 4p^2 (C_t + C_s)^2 B^3 I_3 \right] \end{aligned}$$

Kde

- I_b je bázový prúd
- I_c je prúd kolektora
- g_m je zisk tranzistora
- r_{bb} je bázová rezistancia
- r_{be} je rezistancia báza - emitor
- C_T je celková kapacita
- C_t je kapacita medzi báza - emitor a báza - kolektor
- C_s je kapacita prívodov
- I_1, I_2, I_3 sú konštanty odvodené Personickom a ich typické hodnoty sú:
 - $I_1 = 0,5$
 - $I_2 = 0,4 - 0,5$
 - $I_3 = 0,03 - 0,09$

3.4.1 IDEÁLNA DETEKCIA PRE DIGITÁLNE SIGNÁLY PRE IM/DD

- q Uvažujme **ideálny prípad**: neexistuje tepelný šum, ani prúd i_d a $\eta = 1$, zdrojom šumu je len výstrelový šum signálového prúdu i_s
- q Impulz svetla zodpovedajúci vyššej úrovni ($, 1 \prime$) je tvorený ΔT fotónmi,
kde
 - L je počet fotónov
 - T je čas periódy
- q Svetlo pre úroveň ($, 0 \prime$) nie je emitované
- q Chybovosť vyjadrujeme len pre $, 1 \prime$, pretože pre $, 0 \prime$ šum neexistuje

Pravdepodobnosť chyby pre úroveň , 1 ě v zmysle Poissonovej distribúcie:

$$P(1) = \exp(-\Lambda T) \quad (3.33)$$

Pravdepodobnosť chyby pre ideálny prípad pre obe úrovne, ak $P(0) = P(1) = 1/2$:

$$P_e = \frac{\exp(-\Lambda T + 0)}{2} = \frac{\exp(-\Lambda T)}{2} \quad (3.34)$$

Kvantový limit:

Pre $P_e = 10^{-9}$ je $\Lambda T = 20$ a priemerný optický výkon

$P = (20 + 0) / 2 = 10$, čo zodpovedá **10 fotónom na bit**

Minimálny výkon pre bitovú rýchlosť R_b pre IM/DD systém:

$$P_{QL} = 10 h \nu R_b \quad (3.35)$$

CITLIVOSŤ PRIJÍMAČOV pre IM /DD

	Fotón / bit	Degradácia
Ideálna hodnota	10	0
Súčasná možnosť		
InGaAs PIN - PD	6.000 – 20.000	28 - 33
InGaAs APD	500 - 2.000	17 - 23
EDFA + InGaAs PIN - PD	147	11,7