

Optické komunikácie

KOHERENTNÉ SYSTEMY

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

- n **Využívajú vlnové vlastnosti svetla**

VÝHODY KOHERENTNEJ METÓDY:

- n Možnosť použitia rôznych modulačných metód
- n Podstatné zlepšenie citlivosti prijímača
- n Equalizácia môže kompenzovať vplyv optickej disperzie
- n **Dobrá selektívnosť** optických frekvencií (WDM, resp. OFDM)

Tieto potenciálne výhody sú do značnej miery v praxi ohraňované:

- n **Zlepšením vlastností IM/DD systémov**
- n **Vývojom optických zosilňovačov**
- n **Vývojom úzkopásmových optických filtrov** (WDM, resp. OFDM)
- n **Optickou koherentnou technológiou** je realizovaný aj WDM s hustými intervalmi vlnových dĺžok -
- **Optical Frequency - Division Multiplexing - OFDM**
- n Odstup vlnových dĺžok pre WDM je 100 - 300 nm, pre OFDM je okolo 0,08 nm pri $\Delta f = 10$ GHz
- n Multiplex a výber optickej frekvencie pre OFDM sa robí **interferometrami : Machov - Zehnderov (MZ)
Fabryho - Perotov (FP)**

4. 1 PRINCÍP KOHERENTNÉHO PRENOSU

- n Optické koherentné prenosové zariadenia sú podobné, ako v súčasnosti existujúce prenosové zariadenia rádiových vln
- n **Asynchrónna detekcia** je detekcia obálky signálu
- n **Synchrónna detekcia** využíva referenčný elektrický signál, ktorý je zosynchronizovaný s prenášaným signálom
- n PIN PD (alebo APD) - fotodetektor aj zmiešavač
- n LD - **lokálny oscilátor**

Metódy modulácie digitálnych signálov:

- n **ASK** - Amplitude Shift Keying - modulovaná je amplitúda
- n **FSK** - Frequency Shift Keying - modulovaná je frekvencia
- n **PSK** - Phase Shift Keying - modulovaná je fáza
- n **APSK** - Amplitude Phase Shift Keying - modulovaná je amplitúda aj fáza

FSK so súvislou (nepretržitou) fázou (CPFSK) má charakteristickú fázu nosnej:

- n **MSK** - Minimum Shift Keying
- n **GMSK** - Gaussian - Filtered MSK

APSK:

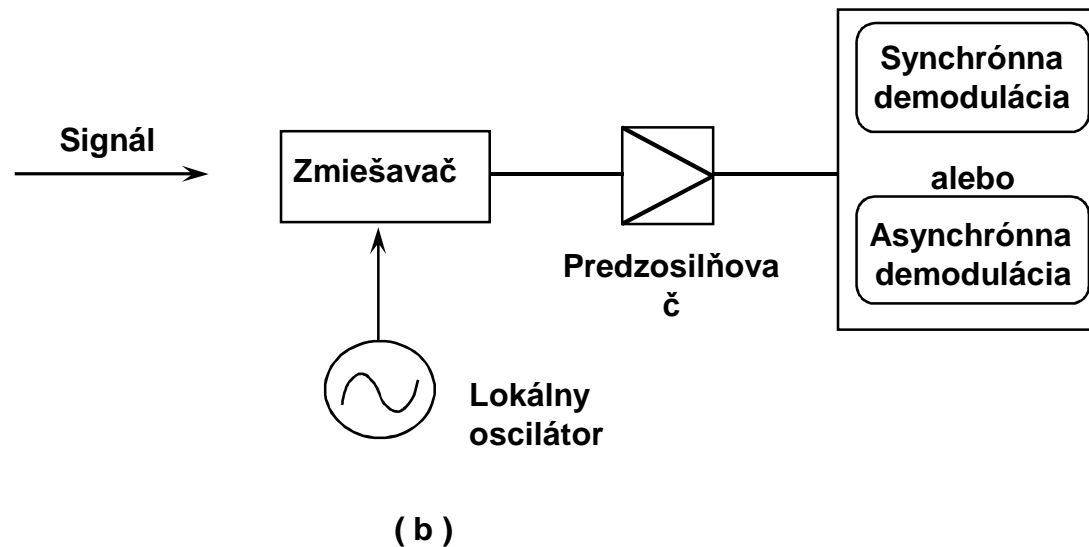
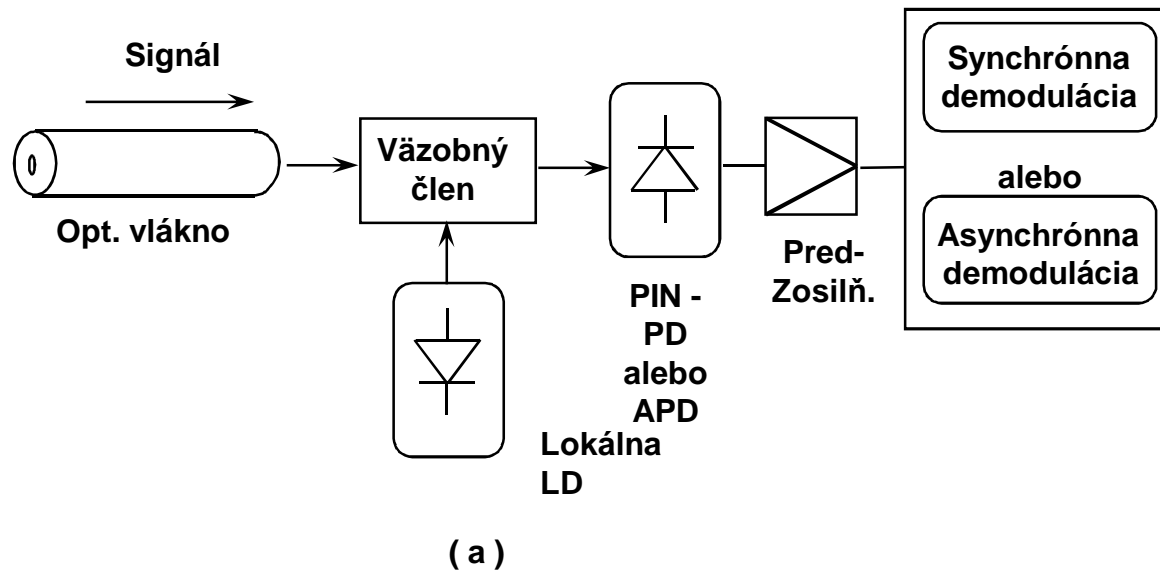
- n **QAM** - Quadrature Amplitude Modulation môže byť:
 - 16 QAM
 - 64 QAM
 - 256 QAM

PSK :

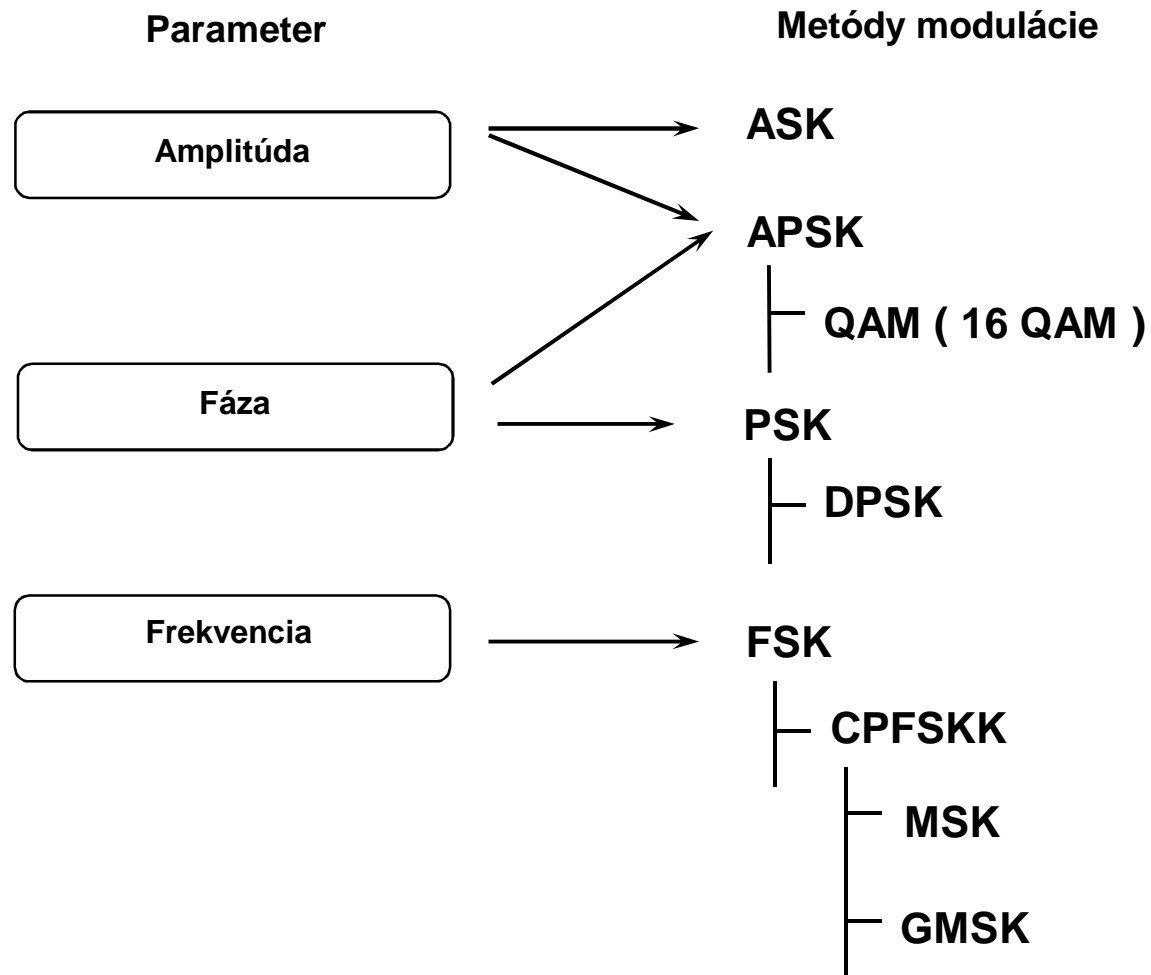
- n **DPSK** - Differential Phase Shift Keying
 - diferenčným kódovaním je vykonaná zmena fázy sekvencií impulzov

- n **Homodynná detekcia**
 - frekvencia lokálneho oscilátora rovnaká s frekvenciou vstupného signálu ($f_L = f_s$) a rozdiel fáz oboch signálov je nemenný

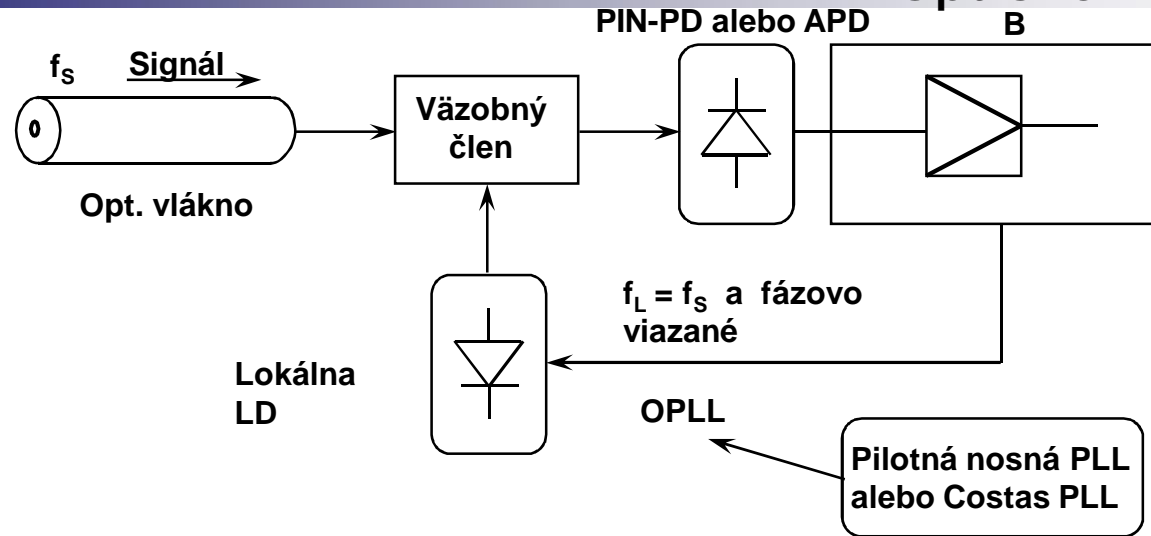
- n **Heterodynná detekcia**
 - frekvencia lokálneho oscilátora je rôzna od frekvencie vstupného signálu



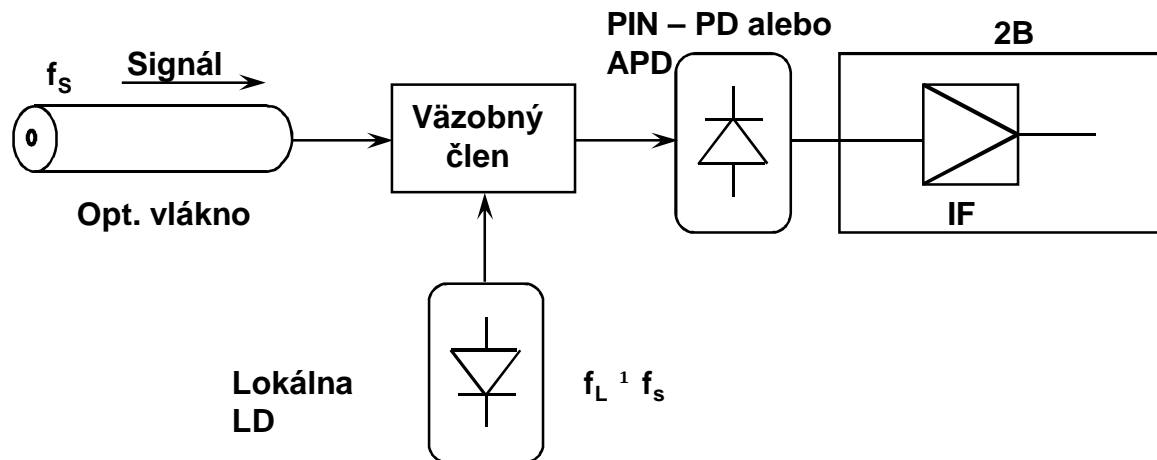
Obr. 4.1 Koherentný prenos : (a) koherentný prenos optickým vláknom
 (b) prenos rádiových vln.
 4. kap. OVKS KEMT FEI TU Košice



Obr. 4.2 Metódy digitálnej modulácie pre mikrovlnové systémy.



(a) Homodýnná detekcia



(b) Heterodýnná detekcia

Obr. 4.3 Homodýnná a heterodýnná detekcia.
4. kap. OVKS KEMT FEI TU Košice

Vstupný signál:

$$S(t) = A \cos(\omega_s t + \varphi_s) \quad (4.1)$$

Signál z lokálneho oscilátora:

$$L(t) = B \cos(\omega_L t + \varphi_L) \quad (4.2)$$

- kde:
- A, B sú amplitúdy
 - ω_s, ω_L sú uhlové frekvencie
 - φ_s, φ_L sú fázy signálov

Okamžitý optický vstupný výkon APD (alebo PIN):

$$\begin{aligned}
 P_{in} &= [A \cos(\omega_s t + \varphi_s) + B \cos(\omega_L t + \varphi_L)]^2 & (4.3) \\
 &= \frac{A^2 + B^2}{2} + AB \cos[(\omega_s - \omega_L)t + (\varphi_s - \varphi_L)] \\
 &\quad + AB \cos[(\omega_s + \omega_L)t + (\varphi_s + \varphi_L)] \\
 &\quad + \frac{A^2 \cos(2\omega_s t + 2\varphi_s)}{2} + \frac{B^2 \cos(2\omega_L t + 2\varphi_L)}{2}
 \end{aligned}$$

APD , PIN detekujú jednosmernú , alebo pomaly meniacu sa zložku signálu , preto pre fotoprúd APD (PIN) platí:

$$i = RM\left\{\frac{1}{2}(A^2 + B^2) + AB \cos [(\omega_s - \omega_L)t + (\varphi_s - \varphi_L)]\right\} \quad (4.4)$$

- Kde
- R je citlivosť fotodetektora
 - M je zisk fotodetektora (pre PIN je $M = 1$)

Stredná hodnota výkonu pre signály $S(t)$ a $L(t)$:

$$P_S = \frac{A^2}{2} \quad , \quad P_L = \frac{B^2}{2} \quad \text{a zároveň} \quad P_L \ll P_S$$

Fotoprúd:

$$i = RM \left\{ P_S + P_L + 2\sqrt{P_S P_L} \cos \left[(\omega_S - \omega_L) t + (\varphi_S - \varphi_L) \right] \right\} \quad (4.5)$$

Homodynná detekcia:

$$\omega_S = \omega_L$$

$$i = RM \left\{ P_S + P_L + 2\sqrt{P_S P_L} \cos (\varphi_S - \varphi_L) \right\} \quad (4.6)$$

Pre ASK signál, kde $j_S = j_L$ je prijatý signál:

$$i_S = 2RM \sqrt{P_S P_L} \quad (4.7)$$

Pre PSK signál je prijatý signál:

$$i_S = \pm 2RM \sqrt{P_S P_L} \quad (4.8)$$

pre $\varphi_S - \varphi_L = 0$ a π

Heterodynná detekcia: $\omega_S \neq \omega_L$

Rozdielová funkcia -

medzifrekvencia (Intermediate Frequency - IF)

$$\omega_{IF} = \omega_S - \omega_L \quad (4.9)$$

Substitúcia : ω_{IF} a $\theta = \varphi_S - \varphi_L$, potom fotoprúd:

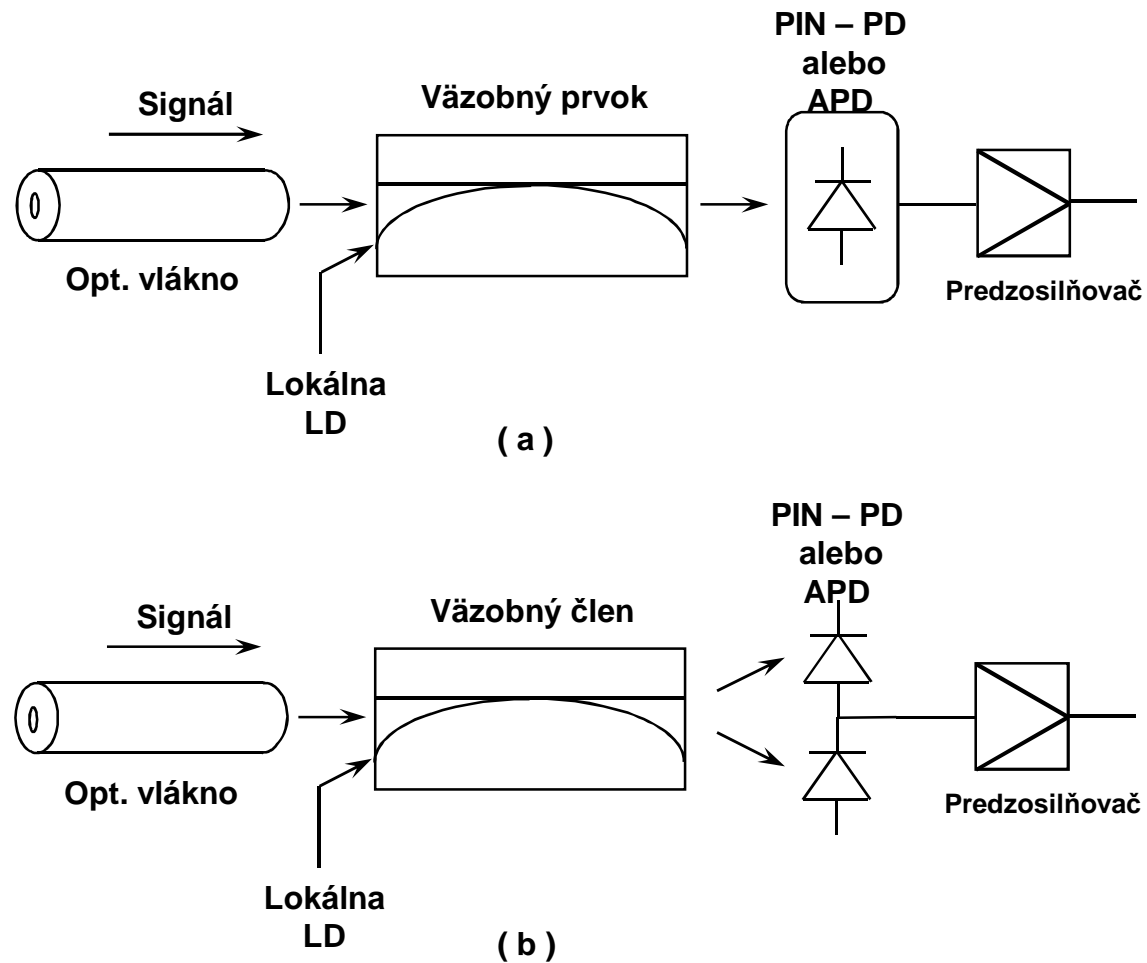
$$i = RM \left\{ P_S + P_L + 2\sqrt{P_S P_L} \cos(\omega_{IF} t + \theta) \right\} \quad (4.10)$$

Prijatý signál:

$$i_S = 2RM \sqrt{P_S P_L} \cos(\omega_{IF} t + \theta) \quad (4.11)$$

q **Šírka pásma** - pre heterodynnú detekciu je 2B

- pre homodynnú detekciu je B

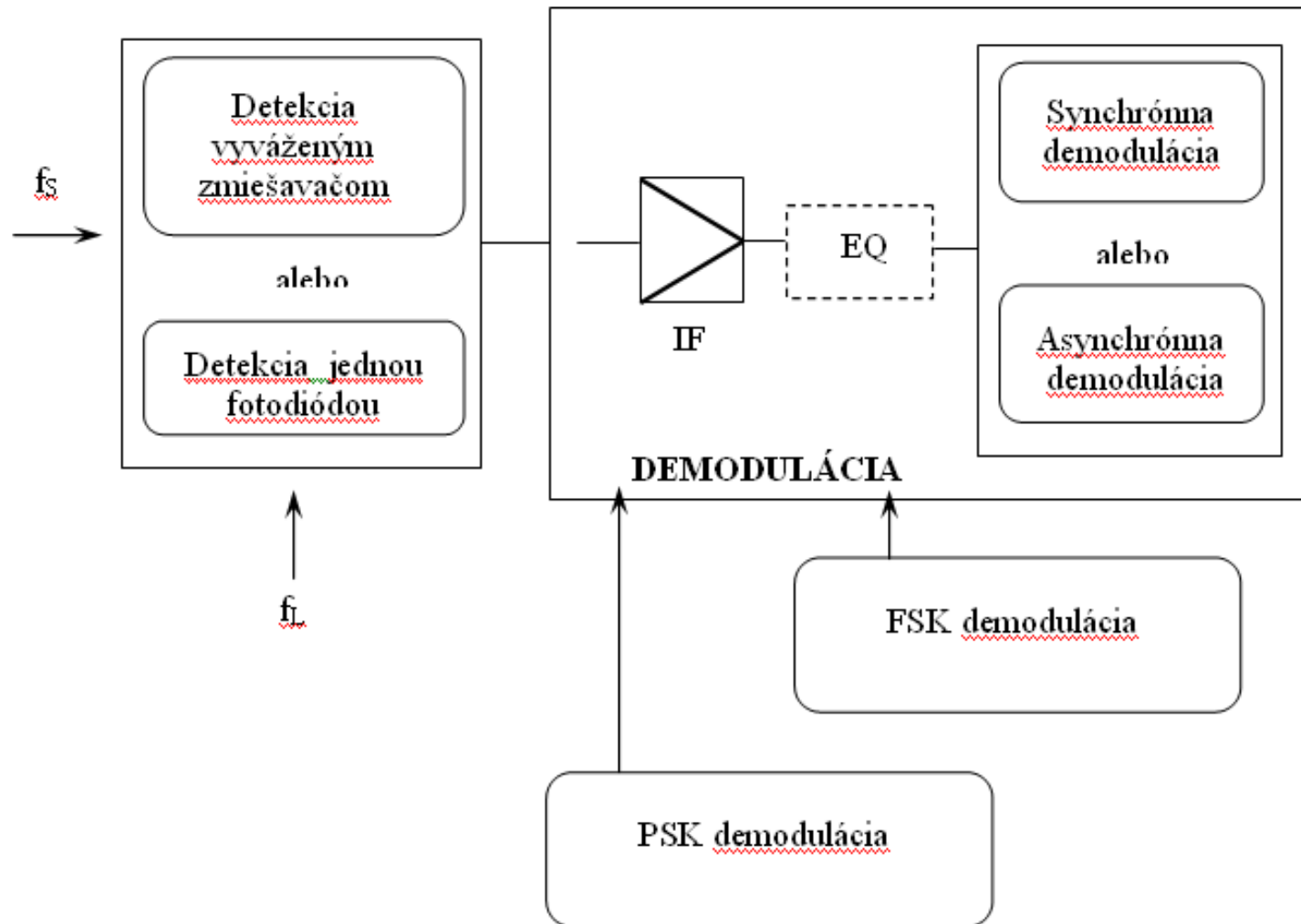


Obr. 4.4 Dva typy detekcie : (a) detekcia jednou fotodiódou,
(b) detekcia vyváženým zmiešavačom.

Stabilita stavu polarizácie svetla je potrebná pre efektívne zmiešavanie optického signálu so signálom z oscilátora (lasera)

Pre dodržanie stability sa používajú tieto metódy:

- n Polarizáciu zachovávajúce vlákna
- n Prvky v prijímači, ktoré sú schopné kontrolovať polarizačný stav
- n Polarizačne mnohotvárne prijímače
- n Polarizačne zmiešavacia technika



Obr. 4.5 Prijímač pre heterodynnu detekciu.

4.2 KONFIGURÁCIE PRIJÍMAČOV A ICH CHYBOVOSŤ

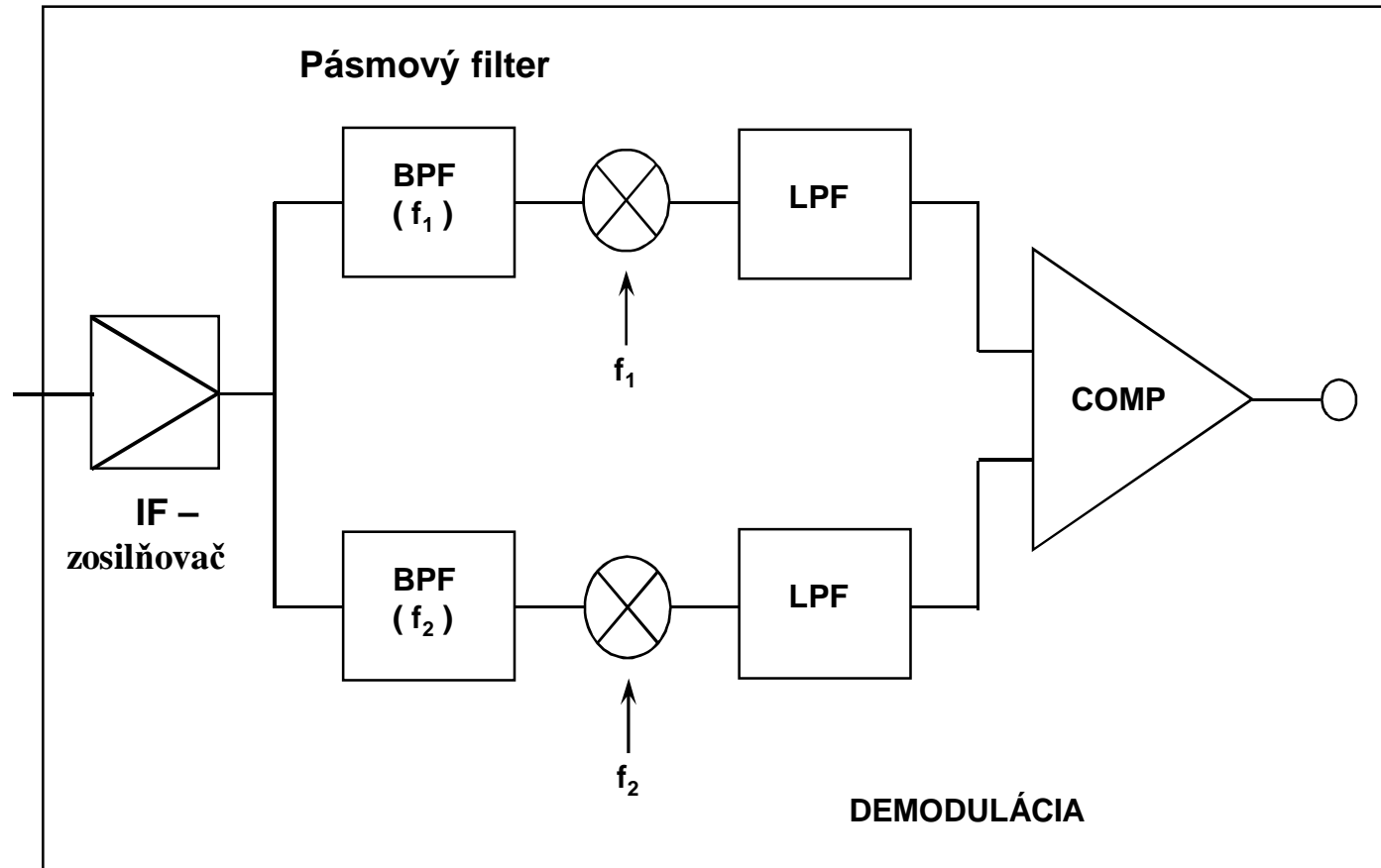
Synchrónna demodulácia - prichádzajúci elektrický signál sa zmiešava s elektrickým signálom z lokálneho oscilátora

Konfigurácie pre FSK asynchrónnu detekciu:

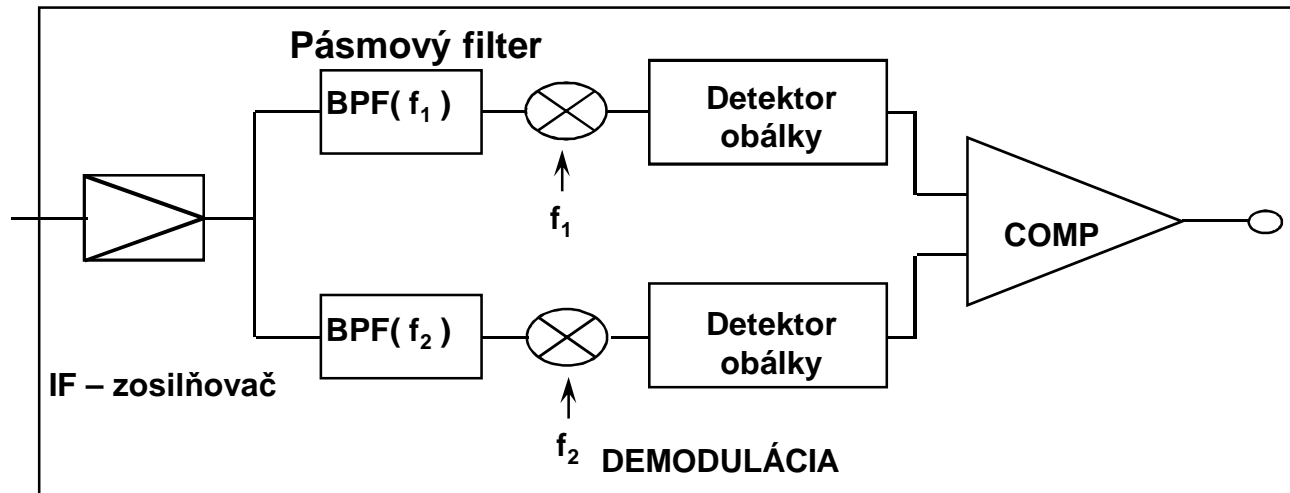
- n **Detekcia obálky** s použitím jedného, alebo duálnych filtrov
- n **Detekcia s použitím diskriminátora**

Rozlišujeme PSK synchrónnu a asynchrónnu demoduláciu

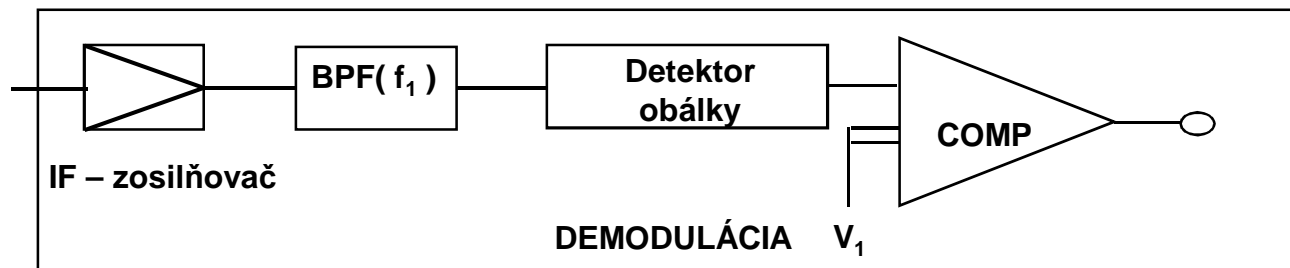
Chybovosť prijímača závisí od spôsobu detekcie a demodulácie



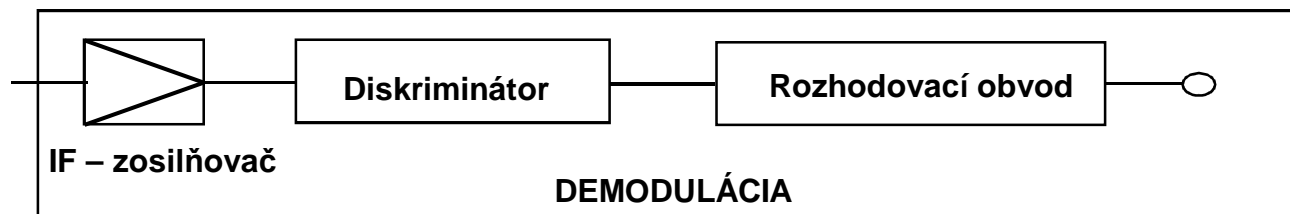
Obr. 4.6 FSK synchrónna demodulácia.



(a)

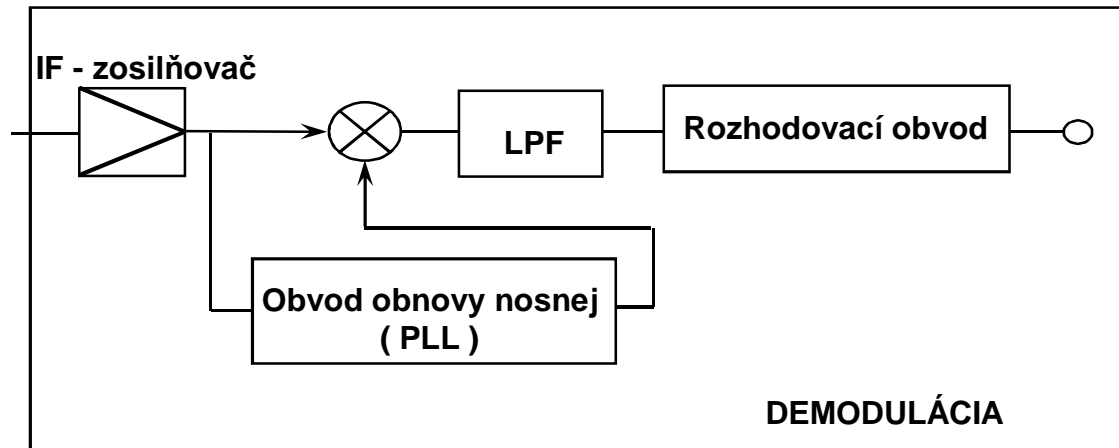


(b)

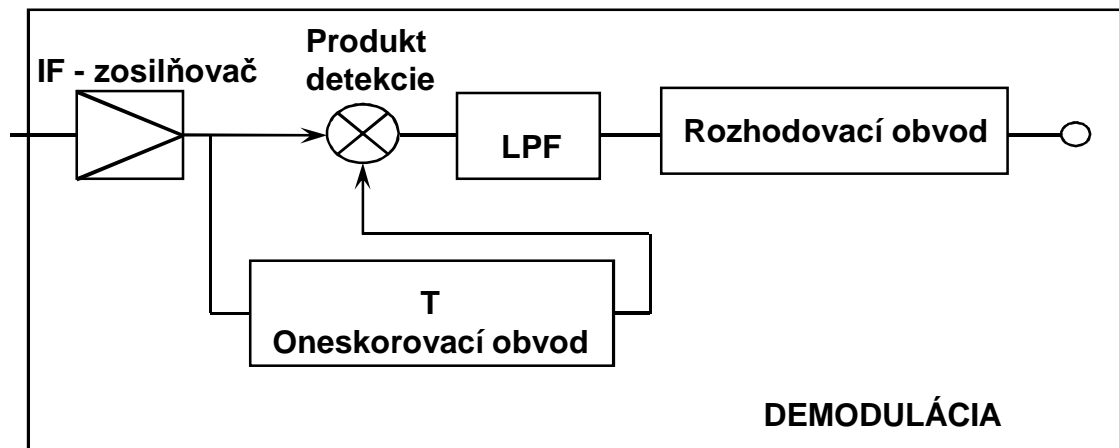


(c)

Obr. 4.7 FSK asynchrónna demodulácia: (a) detekcia obálky s duálnymi filtermi, (b) detekcia obálky s jedným filterom, (c) detekcia diskriminátorom.



(a)



(b)

Obr. 4.8 PSK synchrónna a asynchrónna demodulácia:
 (a) PSK synchrónna demodulácia,
 (b) DPSK asynchrónna demodulácia.

Prúd signálu po fotodetekcii pre demodulácie:

Heterodynná :

$$i_s = 2RM\sqrt{P_S P_L} \cos(\omega_{IF} + \theta) = K \cos(\omega_{IF} + \theta) \quad (4.12)$$

ASK homodynná:

$$i_s = 2RM\sqrt{P_S P_L} = K \quad (4.13)$$

PSK homodynná:

$$i_s = \pm 2RM\sqrt{P_S P_L} = \pm K \quad \text{kde} \quad K = 2RM\sqrt{P_S P_L} \quad (4.14)$$

Pre šum platí:

$$\sigma^2 = \langle i_s^2 \rangle + \langle i_d^2 \rangle + \langle i_L^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle \quad (4.15)$$

kde • $\langle i_L^2 \rangle$ je stredná kvadratická hodnota šumu lokálneho lasera

Predpokladajme rozdiel výkonov $P_L \gg P_s$, zanedbáme $\langle i_s^2 \rangle$, potom pre šum platí:

$$\sigma^2 = \langle i_d^2 \rangle + \langle i_L^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle \quad (4.16)$$

kde • $s_1 = s_0$

Šumový príspevok z lokálneho lasera - oscilátora :

PIN heterodynné: $\langle i_L^2 \rangle = 2eRP_L(2B) \quad (4.17)$

PIN homodynné: $\langle i_L^2 \rangle = 2eRP_L(B) \quad (4.18)$

APD heterodynné: $\langle i_L^2 \rangle = 2eRP_L \langle M \rangle^{2+x} (B) =$ (4 .19)

$$= 2eRP_L M^{2+x} (B)$$

APD homodynné: $\langle i_L^2 \rangle = 2eRP_L \langle M \rangle^{2+x} (2B) =$ (4 .20)

$$= 2eRP_L M^{2+x} (2B)$$

Pre jednoduchosť : $\langle M \rangle = M$

4.2.1 ASK HETERODYNNÁ SYNCHRÓNNA DETEKCIA A DEMODULÁCIA

Výpočty sú **podobné ako pre konfiguráciu IM/DD**

Rozhodovacia úroveň a hodnota Q:

(4 .21)

$$D = \frac{(S_0 + S_1)}{2}, \quad Q_0 = Q_1 = Q = \frac{(S_1 - D)}{s} = \frac{S_1}{2s}$$

kde • $S_0 = 0$ a $S_1 = 2RM\sqrt{P_s P_L} = K$

Chybovosť systému:

$$P_e = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma \int_D^{\infty} \exp\left\{-\frac{(i - S_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\} di + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma \int_{-\infty}^D \exp\left\{-\frac{(i - S_1)^2}{2\sigma_1^2}\right\} di}{2}$$

$$= \frac{\operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}}}{2} = \frac{\operatorname{erfc} \frac{S_1}{2\sqrt{2}\sigma}}{2} = \frac{\operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{\gamma}}}{2}$$

(4 . 22)

kde • g je pomer SNR - signál/šum:

$$\gamma = \frac{S_1^2}{2\sigma^2} = \frac{K^2}{2\sigma^2} \quad (4 . 23)$$

4.2.2 ASK HETERODYNNÁ ASYNCHRÓNNA DEMODULÁCIA

Chybovosť systému:

$$\begin{aligned}
 P_e &= \frac{1 - \int_D \left(\frac{x}{\sigma^2 I_0}\right) \left(S_1 \frac{x}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + S_1^2}{2\sigma^2}\right) dx}{2} \\
 &+ \frac{\int_D \left(\frac{y}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) dy}{2} \approx \frac{\exp\left(-\frac{K^2}{8\sigma^2}\right)}{2} \\
 &= \frac{\exp\left(-\frac{1}{4\gamma}\right)}{2}
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

Aproximácia je pre $\gamma \gg 1$

4.2.3 FSK HETERODYNNÁ SYNCHRÓNNA DETEKCIA A DEMODULÁCIA

Chybovosť počítame, ak je úroveň šumu väčšia ako úroveň signálu

Platí:

$$S_0 = 0 \quad S_1 = 2RM\sqrt{P_S P_L} = K \quad (4.25)$$

$$P_e = P_{rob}(y > x) = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma \exp[-(S_1 - x)^2] \left\{ \int_{y=x}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)\right] dy \right\} dx$$

$$= \frac{\operatorname{erfc} \frac{S_1}{2\sigma}}{2} = \frac{\operatorname{erfc} \frac{K}{2\sigma}}{2} = \frac{\operatorname{erfc} \frac{\sqrt{y}}{2}}{2}$$

(4.26)

4.2.4 FSK HETERODYNNÁ ASYNCHRÓNNA DETEKCIA A DEMODULÁCIA

Platí:

$$S_0 \quad S_1 = 2RM\sqrt{\frac{P_P}{S_L}} = K \quad (4.27)$$

Chybovosť systému:

$$\begin{aligned} P_e &= P_{rob}(y > x) \\ &= \int_0^{\infty} \left(\frac{x}{\sigma^2 I_0}\right) \left(S_1 \frac{x}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + S_1^2}{2\sigma^2}\right) \left\{ \int_{y=x}^{\infty} \left(\frac{y}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) dy \right\} dx \\ &\approx \frac{\exp\left(-\frac{K^2}{4\sigma^2}\right)}{2} = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\gamma}\right)}{2} \end{aligned} \quad (4.28)$$

4.2.5 PSK HETERODYNNÁ SYNCHRÓNNA DETEKCIA A DEMODULÁCIA

Platí: $S_0 = -K$ $S_1 = K$ (4. 29)

Potom: $D = 0$ $Q = \frac{K}{\sigma}$ (4. 30)

Chybovosť systému: (4. 31)

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{K\sigma}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma})$$

4.2.6 ASK HOMODYNNÁ DETEKCIA A DEMODULÁCIA

Platí: $S_0=0 \quad S_1=2RM\sqrt{\frac{PP}{S_L}}=K$ (4 .32)

$$D=\frac{K}{2} \quad (4 .33)$$

Pretože šum je polovičný oproti prípadu heterodynnej detekcie , γ vo vzťahu (4 .31) nahradíme 2γ a chybovosť systému je:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{2\gamma}) \quad (4 .34)$$

Odvođené rovnice sú vyjadrené pre γ (SNR) úrovne , 1 '

Odvodíme minimálny požadovaný výkon pre pravdepodobnosť chyby 10^{-9} , pri ideálnych podmienkach, ale len pre FSK heterodynnú asynchrónnu detekciu, pre ostatné metódy je výpočet podobný

- n V ideálnom prípade, uvažujeme len výstrelový šum lokálneho lasera a optického signálu ($P_L \gg P_s$, potom $\langle i_L^2 \rangle \gg \langle i_s^2 \rangle$)

Predpokladáme : $M = 1$ (PIN) a $\eta = 1$

Celkový šum:

$$\sigma^2 \approx \langle i_L^2 \rangle = 4 e R P_L B \quad (4 .35)$$

$K^2 = 4R^2 P_S P_L$, potom:

$$\gamma = \frac{K^2}{2\sigma^2} = \frac{R P_S}{2eB} = \frac{P_S}{2\hbar\omega B} \quad (4.36)$$

Chybovosť ideálneho systému:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{1}{2}\gamma\right) \quad - \text{kvantový limit} \quad (4.37)$$

Z výrazu (4.36) si vyjadríme:

$$P_S = 80 \hbar \omega B \quad \text{alebo} \quad \frac{P_S}{2B} = 40 \hbar \omega \quad (4.38)$$

- n Pre prenos so šírkou frekvenčného pásma B a prenosovou rýchlosťou $2B$ bit/s , **potrebujeme 40 fotónov / bit**

Porovnanie systémov

	Detekcia	
Modulácia	Homodynná (fotón / bit)	Heterodynná (fotón / bit) *
ASK	40 (20) #	~ 80 (~ 40) #
FSK	-	~ 40
PSK	9	~ 20

* Synchronná a asynchronná demodulácia sú takmer rovnaké .
 (Presnejšie povedané , o niečo menej fotónov je požadovaných
 pri synchronnej demodulácii) .
 # Počet fotónov na bit pri strednej hodnote
 výkonu .

Najlepšia modulačná metóda pre ideálny prípad je PSK homodynná detekcia

V predchádzajúcom sme predpokladali
laser s nulovou šírkou spektrálnej čiary

Pre určitú prenosovú rýchlosť sa dá vypočítať maximálna prípustná
šírka spektrálnej čiary D_u :

- n Homodynná: $D_u < 5 \cdot 10^{-4} R_b$
- n PSK heterodynná synchronná: $D_u < 3 \cdot 10^{-3} R_b$
- n PSK heterodynná asynchrónna: $D_u < 5 \cdot 10^{-3} R_b$
- n FSK , ASK heterodynná:
asynchrónna: $D_u < 0,1 R_b$

kde • R_b je prenosová rýchlosť

Pre PSK heterodynný prenosový experiment s využitím vyváženého zmiešavača sa dosiahlo :

78 fotónov/bit pre $R_b = 560 \text{ Mb/s}$ a

132 fotónov/bit pre $R_b = 1,2 \text{ Gb/s}$

V tomto prípade je degradácia oproti kvantovému limitu (limit výstrelového šumu) o 6dB

Parametre PIN spôsobujúce degradáciu:

n	Kvantová účinnosť	o 1,6 dB
n	Tepelný šum	o 0,7 dB
n	Šum lasera	o 0,4 dB
n	Elektrické skreslenie v zosilňovačoch a filtroch	o 3 dB

4.3 APLIKÁCIE KOHERENTNÉHO PRENOSU V PRÍSTUPOVEJ SIETI

n **Výhody:**

Citlivosť prijímača

Optická frekvenčná selektivita

Ekvivalizácia na IF

- n Typické aplikácie zvyšujú počet kanálov vo video rozvodoch, alebo zvyšujú počet vetiev v pasívnych optických sieťach

Výhoda	Výsledky	Príklady aplikácií	
		Prístupová sieť	Transportná sieť
Citlivosť prijímača	Zväčšenie predpokladanej vzdialenosti	Zväčšenie počtu vetiev v PON	Veľká prenosová vzdialenosť bez opakovačov
Optická frekvenčná selektivita (selektivita vlnovej dĺžky)	Zväčšenie počtu multiplexných kanálov vo WDM	Viac - kanálový video prenos	Zvýšenie kapacity kanálov Optická MUX
Ekvivalizácia na IF	Kompenzácia skreslenia impulzov		Veľká prenosová rýchlosť (Kompenzácia disperzie optického vlákna)