

Optické komunikácie

Analógové systémy

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

5 ANALÓGOVÉ SYSTÉMY

n **Prenos :**

zvukového signálu, videosignálu, multiplexovaných zvukových, video a dátových signálov (CATV), telemetrie a diaľkového ovládania

n **Vyžaduje:**

- .. Veľký odstup signálu od šumu (40 až 70 dB)
- .. Dobrá linearita prenosu

Vlastnosti prenášaných analógových signálov ovplyvňujú:

- n Linearita prenosovej charakteristiky zdroja svetla
- n Šum fotodetektora
- n Šum LD
- n Vidový šum optického vlákna

Porovnanie S/N dosiahnuteľného pre analógový OVKS a analógový komunikačný systém s využitím koaxiálneho kábla

Predpoklad: Tlmenie koaxiálneho kábla je konštantné a nezávisí od frekvencie, potom S/N pre analógový koaxiálny systém:

$$(S/N)_c = \frac{V^2 \exp(-a_{TC})}{Z_v 4kTB} \quad (5.1)$$

- n kde V je hodnota výstupného napätia
- n a_{TC} je celkové tlmenie prenosovej trasy
- n Z_v je vlnový odpor koaxiálneho kábla
- n k je Boltzmannova konštanta
- n T je teplota
- n B je efektívna šírka frekvenčného pásma systému

Pomer S/N pre analógový OVKS:

$$(S/N)_f = \frac{h P_0}{2 h w B} \quad (5.2)$$

Prijímaný optický výkon P_0 vyjadríme pomocou vstupného optického výkonu P_i a celkového tlmenia optickej vláknovej prenosovej trasy α_{Tf} :

$$P_0 = P_i \exp(-a_{Tf}) \quad (5.3)$$

Dosadením do vzťahu (5.2):

$$(S / N)_f = P_i \frac{\exp(-a_{Tf})}{2hfB} \quad (5.4)$$

- n **Optické vláknové systémy majú o 40 až 60 dB menší pomer S/N, ako koaxiálne systémy s rovnakým tlmením**

Modulačné metódy na prenos signálov v analógových OVKS:

Najjednoduchší spôsob prenosu:

PRIAMA INTENZITNÁ MODULÁCIA

- (*D-IM - Direct Intensity Modulation*)

- Informačný signál sa prenáša priamo v základnom frekvenčnom pásme
- Možno využiť kombinované modulačné metódy, kde sa signál pred **D - IM** moduluje na vhodnú elektrickú subnosnú:

využitím amplitúdovej, fázovej, alebo frekvenčnej modulácie

5.1 PRIAMA INTENZITNÁ MODULÁCIA

Časová závislosť prenášaného optického výkonu:

$$P_{opt}(t) = P_i [1 + m(t)] \quad (5.5)$$

- kde
- P_i je stredná hodnota prenášaného optického výkonu (t.j. optický výkon prenášaný nemodulovaným nosným signálom)
 - $m(t)$ je intenzitne modulovaný signál

Kosínusový modulačný signál:

$$m(t) = m_a \cos w_m t \quad (5.6)$$

- kde
- m_a je modulačný index
 - w_m je frekvencia modulačného signálu

Dosadením (5.6) do (5.5) dostaneme:

$$P_{opt}(t) = P_i (1 + m_a \cos w_m t) \quad (5.7)$$

Výstupný prúd (tzv. sekundárny fotoprúd) $I(t)$ generovaný optickým prijímačom s APD:

$$I(t) = I_p M (1 + m_a \cos \omega_m t) \quad (5.8)$$

- kde
- M je multiplikačný faktor
 - I_p je primárny fotoprúd:

$$I_p = \frac{h e P_0}{h \nu} \quad (5.9)$$

Stredná kvadratická hodnota signálového prúdu:

$$\langle i_{sig}^2 \rangle = \frac{1}{2} (m_a M I_p)^2 \quad (5.10)$$

Celkový príspevok výstrelového šumu :

$$\langle i_{SA}^2 \rangle = 2eB(I_p + I_d)M^2 F(M) \quad (5.11)$$

Stredná kvadratická hodnota šumového prúdu:

$$\langle i_N^2 \rangle = 2eB(I_p + I_d)M^2 F(M) + \left(\frac{4kTBF_n}{R_L} \right) \quad (5.12)$$

Pomer S/N pre optický prijímač s APD:

$$(S/N)_{rms} = \frac{\langle i_{sig}^2 \rangle}{\langle i_N^2 \rangle} = \frac{\left[\frac{1}{2} (m_a M I_p)^2 \right]}{\left[2eB(I_p + I_d)M^2 F(M) + \left(\frac{4kTBF_n}{R_L} \right) \right]} \quad (5.13)$$

kde • **index rms** označuje, že pomer **S/N** je počítaný zo stredných kvadratických hodnôt signálového a šumového prúdu

Pomer S/N pre optický prijímač s PIN fotodiódou:

$$(S/N)_{rms} = \frac{\left[\frac{1}{2} (m_a I_p)^2 \right]}{\left[2eB(I_p + I_d) + \left(\frac{4kTBF_n}{R_L} \right) \right]} \quad (5.14)$$

Výstrelový šum (keď zanedbáme šum prúdu za tmy) prevláda pri veľkých hodnotách signálového prúdu I_p .

Ak S/N je veľké, potom pre PIN PD vzťah (5.14) sa zjednoduší:

$$(S/N)_{rms} = \frac{m_a^2 I_p}{4eB} \quad (5.15)$$

Zo vzťahu (5.15) použitím vzťahu (5.9) pre výkon P_0 platí:

$$P_0 \approx \frac{4\mathbf{h}wB}{m_a^2 h \left(\frac{S}{N} \right)_{rms}} \quad (5.16)$$

Dominantný tepelný šum (S/N je malé), potom je I_p malé a pre PIN PD sa (5.14) zjednoduší:

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{rms} = \frac{\left(m_a I_p \right)^2 R_L}{8kTBF_n} \quad (5.17)$$

Použitím (5.9) pre výkon P_0 :

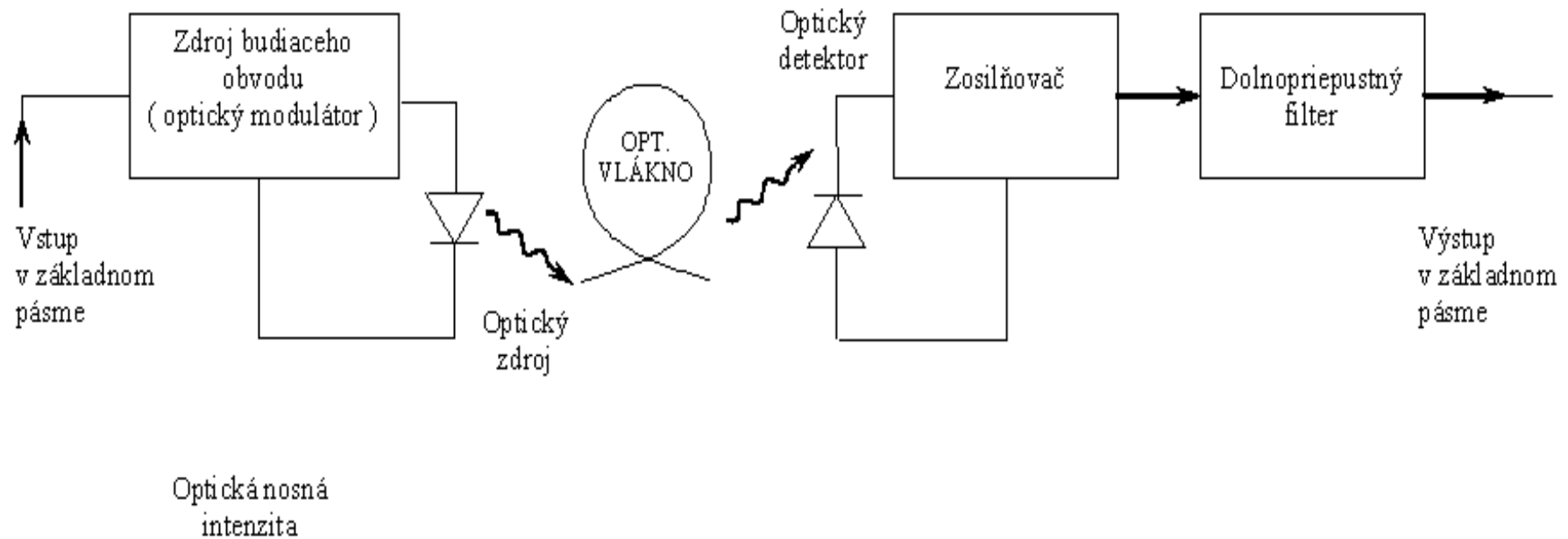
$$P_0 \approx \left[\frac{hw\sqrt{B}}{em_a^2h} \right] \sqrt{\frac{8kTF_n \left(\frac{S}{N} \right)_{rms}}{R_L}} \quad (5.18)$$

Časová odozva analógových systémov je počítaná podobne ako pre číslicové systémy

Maximálne dovolená 3 dB optická šírka frekvenčného pásma:

$$B_{opt}(\max) = \frac{0,35}{T_{syst}} \quad (5.19)$$

kde • T_{syst} je čas nárastu impulzu v systéme z 10 do 90% nominálnej hodnoty



Obr. 5.1 Analógový optický vláknový systém využívajúci priamu intenzitnú moduláciu

5.2 IDEÁLNA DETEKCIA V D – IM SYSTÉME

Detekcia optického analógového signálu je vždy jednoduchšia, ako v prípade obyčajného elektrického signálu

Modulovaný optický signál:

$$P(t) = P_0 [1 + m(t)] \quad (5.20)$$

kde $m(t)$ je modulačný analógový signál (AM, FM) so šírkou pásma B , pričom:

$$|m(t)| \leq 1 \text{ a } \langle m(t) \rangle = 0,$$

P_0 je priemerná amplitúda dopadajúceho optického výkonu

Pre AM je modulovaná amplitúda $m(t)$,
pre FM je modulovaná frekvencia $m(t)$

Nosná prijímača:

$$i = h e \left(\frac{P_0}{h\nu} \right) \quad (5.21)$$

Pomer nosnej (carrier) ku šumu (C/N):

$$C/N = \frac{i^2}{S^2} \quad (5.22)$$

Závislosť medzi C/N a S/N závisí od spôsobu modulácie

Uvažujme ideálny prípad:

neexistuje šum obvodu, ani šum prúdu za tmy a jediným zdrojom šumu je výstrelový šum $\langle i_s^2 \rangle$ optického signálu

Požadovaná nosná a šum sú:

$$i = he \left(\frac{P_0}{\mathbf{h}\omega} \right) \quad (5.23)$$

$$S^2 = \langle i_s^2 \rangle = 2e \left[he \left(\frac{P_0}{\mathbf{h}\omega} \right) \right] B \quad (5.24)$$

Pomer nosnej ku šumu:

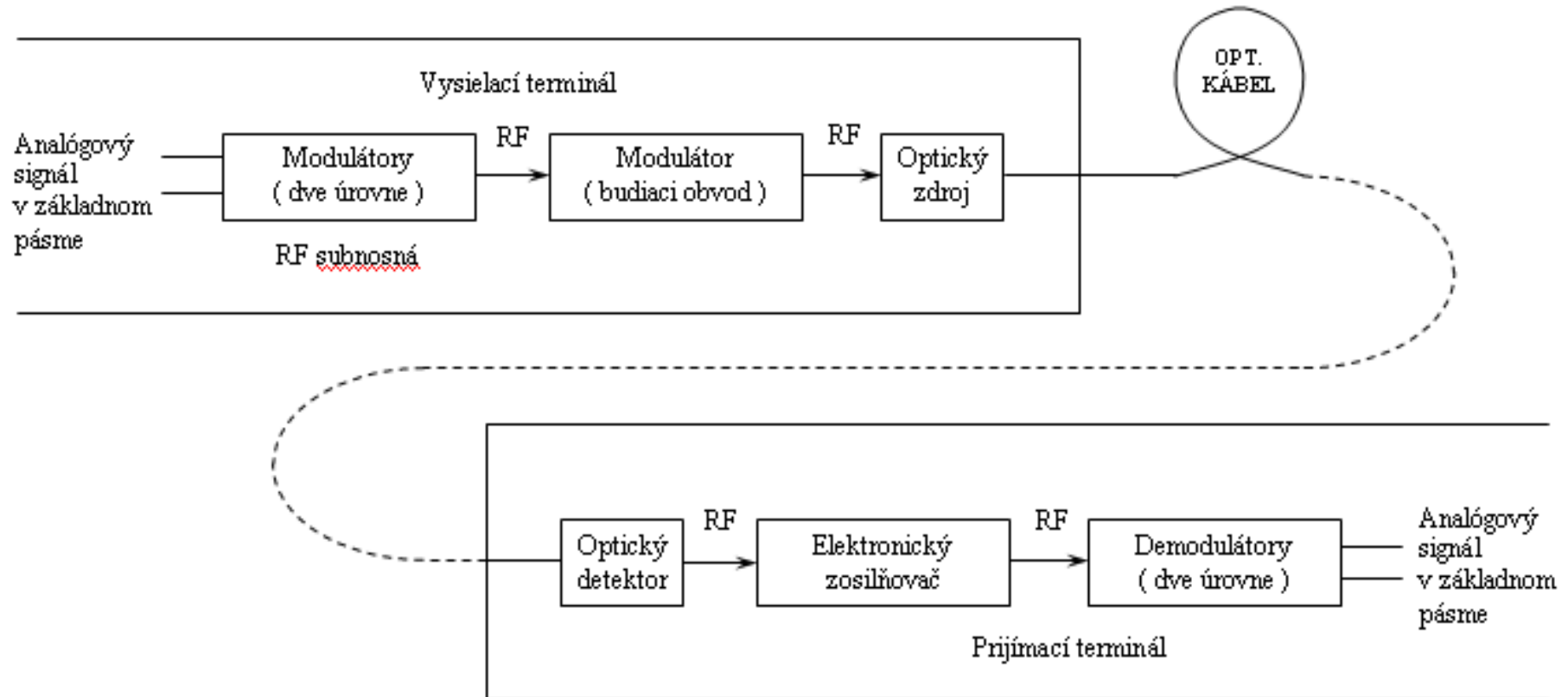
$$C/N = \frac{i^2 R_L}{S^2 R_L} = h \frac{P_0}{2h\nu B} \quad (5.25)$$

Pre **AM** so šírkou pásma $B = 6$ MHz, $P_0 = -37,4$ dBm, pre vlnovú dĺžku $1,3 \mu\text{m}$ a kvantovú účinnosť $\eta = 1$ dostaneme pomer **$C/N = 50$ dB**

5.3 INTENZITNÁ MODULÁCIA SUBNOSNEJ VLNY

- n Prenos analógového signálu **zo základného frekvenčného pásma**
- n Vzhľadom na **využitie veľkej šírky frekvenčného pásma OV** je niekoľko analógových signálov zo základného frekvenčného pásma multiplexovaných do jedného optického vláknového spoja
- n Využíva sa **multiplex vo frekvenčnej oblasti (FDM)**
- n Výhodou intenzitnej modulácie subnosnej vlny je možnosť **zlepšenia S/N** v procese demodulácie subnosnej vlny

Optické komunikácie



Obr. 5.2 Systém intenzitnej modulácie subnosnej vlny pre analógový optický vláknový prenos

- n **Prenášaný optický výkon má časovú závislosť:**

$$P_{opt}(t) = P_i [1 + m(t)] \quad (5.26)$$

- n **Sekundárny fotoprúd pre optický prijímač APD:**

$$I(t) = I_p M [1 + m(t)] \quad (5.27)$$

- n **Stredná kvadratická hodnota signálového prúdu:**

$$\langle i_{sig}^2 \rangle = (I_p M)^2 P_m \quad (5.28)$$

- n kde • P_m je celkový výkon signálu $m(t)$

Použitím spektrálnej hustoty $S_m(\omega)$ signálu $m(t)$ a jeho šírky frekvenčného pásma B_m možno vyjadriť P_m :

$$P_m = \frac{1}{2p} \int_{-2pB_m}^{2pB_m} S_m(\omega) d\omega \quad (5.29)$$

Pomer S/N D - IM signálu:

$$\begin{aligned}
 (S/N)_{rms} &= \left\langle \frac{i_{sig}^2}{i_N^2} \right\rangle = \frac{(MI_p)^2 P_m}{\left[2eB_m (I_p + I_d) M^2 F(M) + \left(\frac{4kTBF_n}{R_L} \right) \right]} = \\
 &= \frac{I_p^2 P_m}{\left[2eB_m (I_p + I_d) F(M) + \left(\frac{4kTBF_n}{M^2 R_L} \right) \right]} = \\
 &= \frac{(RP_0)^2 P_m}{2B_m N_0}
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

kde N_0 je vyjadrené vzťahom:

$$N_0 = e \left(I_p + I_d \right) F(M) + \left(\frac{4kTBF_n}{M^2 R_L} \right) \tag{5.31}$$

5.4 OBOJSTRANNÁ INTENZITNÁ MODULÁCIA SUBNOSNEJ VLNY

- n Intenzitná modulácia subnosnej vlny s dvoma postrannými pásmami (DSB - Double Sideband Modulation)

Jednoduchý spôsob modulácie subnosnej vlny $A_c \cos \omega_c t$ s informačným signálom $a(t)$ má tvar súčinu týchto signálov:

$$m(t) = A_c a(t) \cos \omega_c t \quad (5.32)$$

- kde
- A_c je amplitúda
 - ω_c je frekvencia subnosnej vlny

Pre kosínusový modulačný signál je intenzita elektrického poľa subnosnej vlny:

$$E_m(t) = \frac{A_c}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t] \quad (5.33)$$

kde • ω_m je modulačná frekvencia

Prenášaný optický DSB modulovaný signál:

$$P_{opt}(t) = P_i [1 + a(t) \cos \omega_c t] \quad (5.34)$$

Aby nedošlo k premodulovaniu, je $|a(t)| \leq 1$

DSB modulovaná elektrická subnosná vlna má šírku frekvenčného pásma $B_m = 2 B_a$ a pre jednotkovú amplitúdu subnosnej vlny je $P_m = P_a / 2$

S/N DSB modulovaného signálu na vstupe:

$$(S/N)_{rms}^{inDSB} = \frac{\left[\frac{(RP_0^2) P_a}{2} \right]}{4B_a N_0} = \frac{(RP_0^2) P_a}{8B_a N_0} \quad (5.35)$$

Ideálny DSB demodulátor dáva zlepšenie pomeru S/N o 2 až 3 dB:

$$(S/N)_{rms}^{outDSB} = 2(S/N)_{rms}^{inDSB} = \frac{\left[(RP_0^2) P_a \right]}{4B_a N_0} \quad (5.36)$$

- n **DSB - IM** signál pri rovnakých podmienkach ($B_m = B_a$, $P_m = P_a$, fotoprúd a šum) poskytuje o 3 dB horší pomer S/N ako D - IM
pre OVKS málo efektívne
- n **Výhodnejšie: FM - IM a PM - IM**

5.5 FREKVENČNÁ MODULÁCIA SUBNOSNEJ VLNY

Modulačný signál:

$$m(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + k_f \int_0^t a(t) dt \right] \quad (5.37)$$

kde • k_f je **frekvenčná odchýlka** v rad/s na jednotku $a(t)$

Šírka frekvenčného pásma modulačného signálu je daná **Carsonovým vzťahom:**

$$B_m = 2(D_f + 1)B_a \quad (5.38)$$

kde • D_f je **relatívna frekvenčná odchýlka**:

$$D_f = \frac{f_d}{B_a} \quad (5.39)$$

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

Maximálna frekvenčná odchýlka:

$$f_d = k_f \max |a(t)| \quad (5.40)$$

S/N FM modulovanej subnosnej vlny na vstupe:

$$(S/N)_{rms}^{in FM} = \frac{\left[(RP_0)^2 \left(\frac{A_c^2}{2} \right) \right]}{2B_m N_0} \quad (5.41)$$

Po demodulácii:

$$(S/N)_{rms}^{out FM} = \frac{6D_f^2 (D_f^2 + 1) \left[P_a (RP_0)^2 \left(\frac{A_c^2}{2} \right) \right]}{2B_m N_0} \quad (5.42)$$

Po dosadení zo vzťahu (5.39):

$$\left(S/N\right)_{rms}^{out FM} = \frac{3D_f^2 P_a (RP_0)^2 A_c^2}{4B_a N_0} \quad (5.43)$$

- n Použitím FM - IM: **výrazné zlepšenie S/N až o ~ 40 dB**
- n Nevýhodou je **podstatné zväčšenie šírky frekvenčného pásma**

5.6 FÁZOVÁ MODULÁCIA SUBNOSNEJ VLNY

V systémoch s využitím **PM - IM je modulačný signál:**

$$m(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + k_p a(t) \right] \quad (5.44)$$

kde • k_p je koeficient fázovej odchýlky v rad/s na jednotku amplitúdy informačného signálu $a(t)$

Šírka frekvenčného pásma PM - IM signálu je podľa Carsonovho vzťahu:

$$B_m = 2 \left(D_p + 1 \right) B_a \quad (5.45)$$

kde • D_p je pomer maximálnej frekvenčnej odchýlky f_d PM subnosnej vlny a šírky frekvenčného pásma B_a informačného signálu $a(t)$

Potom:

$$D_p = \frac{f_d}{B_a} \quad (5.46)$$

Pre f_d :

$$f_d = k_p \max \left| \frac{d a(t)}{dt} \right| \quad (5.47)$$

Pomer S/N na vstupe PM demodulátora subnosnej vlny:

$$(S/N)_{rms}^{in PM} = \frac{(RP_0)^2 A_c^2}{4B_m N_0} \quad (5.48)$$

Po demodulácii:

$$(S/N)_{rms}^{out PM} = \frac{D_p^2 P_a (RP_0)^2 A_c^2}{4B_a N_0} \quad (5.49)$$

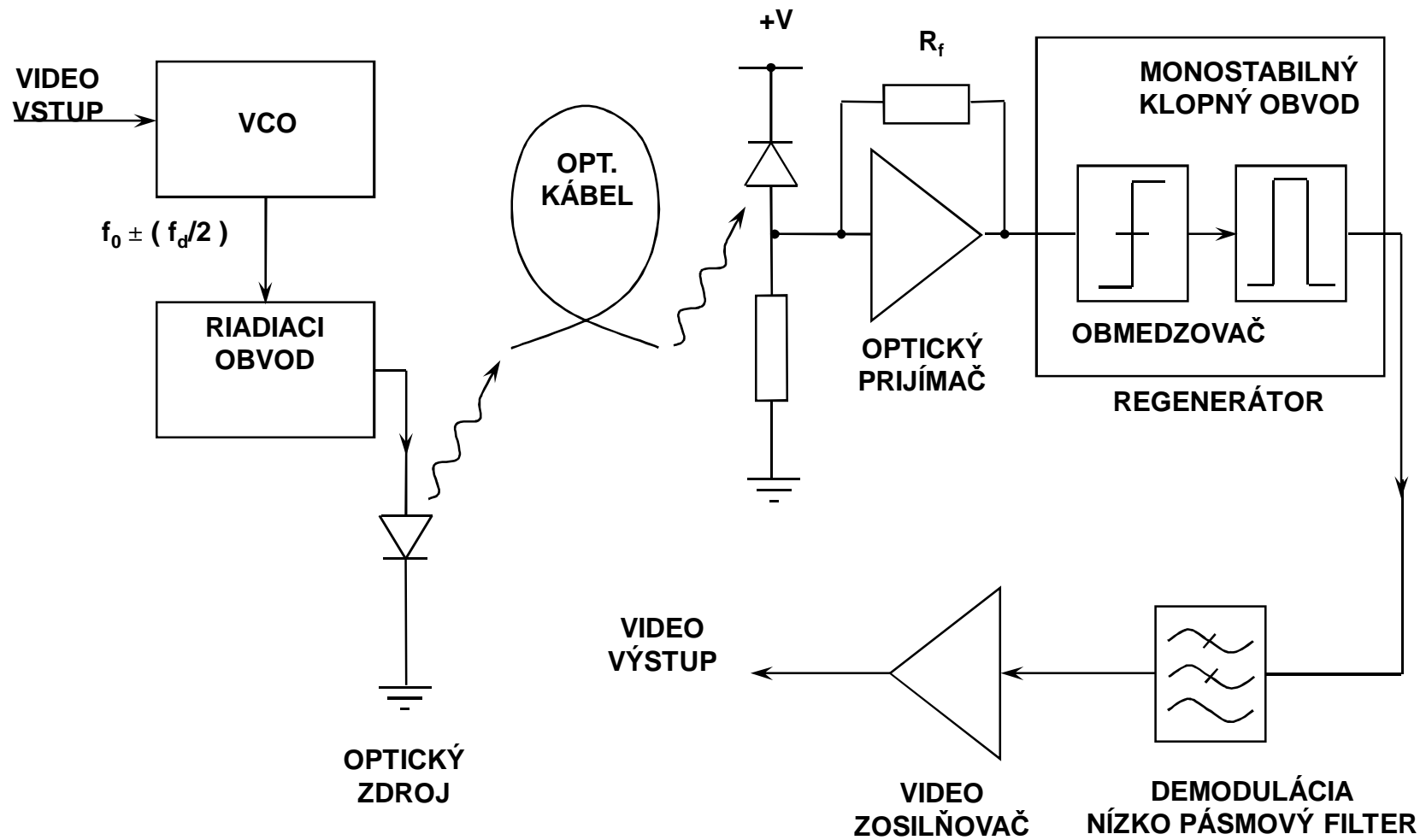
- n **Zlepšenie pomeru S/N** oproti systémom s využitím D - IM , ktoré je **ale o 5 dB horšie ako pre FM - IM systémy**
- n Nevýhodou je podstatné zväčšenie šírky frekvenčného pásma

5.7 PULZNÉ ANALÓGOVÉ MODULÁCIE

- n Pulzná amplitúdová modulácia
(PAM - Pulse Amplitude Modulation)
- n Pulzná šírková modulácia
(PWM - Pulse Width Modulation)
- n Pulzná polohová modulácia
(PPM - Pulse Position Modulation)
- n Pulzná frekvenčná modulácia
(PFM - Pulse Frequency Modulation)

- n **PAM - IM** - ovplyvnená nelinearitami zdroja svetla ,
menej účinná ako **D - IM**
 - v analógových **OVKS** sa neuplatňuje
- n **PWM - IM** - málo účinná, lebo veľká časť prenášanej energie signálu nenesie informáciu
- n **PPM - IM** a **PFM - IM** - omnoho lepšie vlastnosti
 - vplyv nelinearity zdroja je menší, čo umožňuje ich aplikáciu v analógových **OVKS** pre prenos na veľké vzdialenosti
- n **PPM - IM** - efektívnejšia, menšie zlepšenie pomeru **S/N** oproti **D - IM** ako **PFM - IM**

- n **Kóder a dekóder pre PFM - IM menej zložitejší, preto je to najpoužívanejšia pulzná analógová modulačná metóda v OVKS**



Obr. 5.3 Optický vláknový systém PFM – IM.

Pomer S/N je pre PFM - IM systém:

$$(S/N)_{p-p} = \frac{3(T_0 f_0 M R P_{po})^2}{(2p T_R B)^2 \langle i_N^2 \rangle} \quad (5.50)$$

kde

- T_0 je nominálna hodnota periódy impulzov ($T_0 = 1 / f_0$)
- 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
- $\langle i_N^2 \rangle$ je stredná kvadratická hodnota šumového prúdu optického prijímača