

Optické komunikácie

Pojektovanie optických vláknových komunikačných systémov

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

Optické vláknové komunikačné systémy:

- n Číslicové (digitálne)
- n Analógové

Digitálne optické vláknové komunikačné systémy:

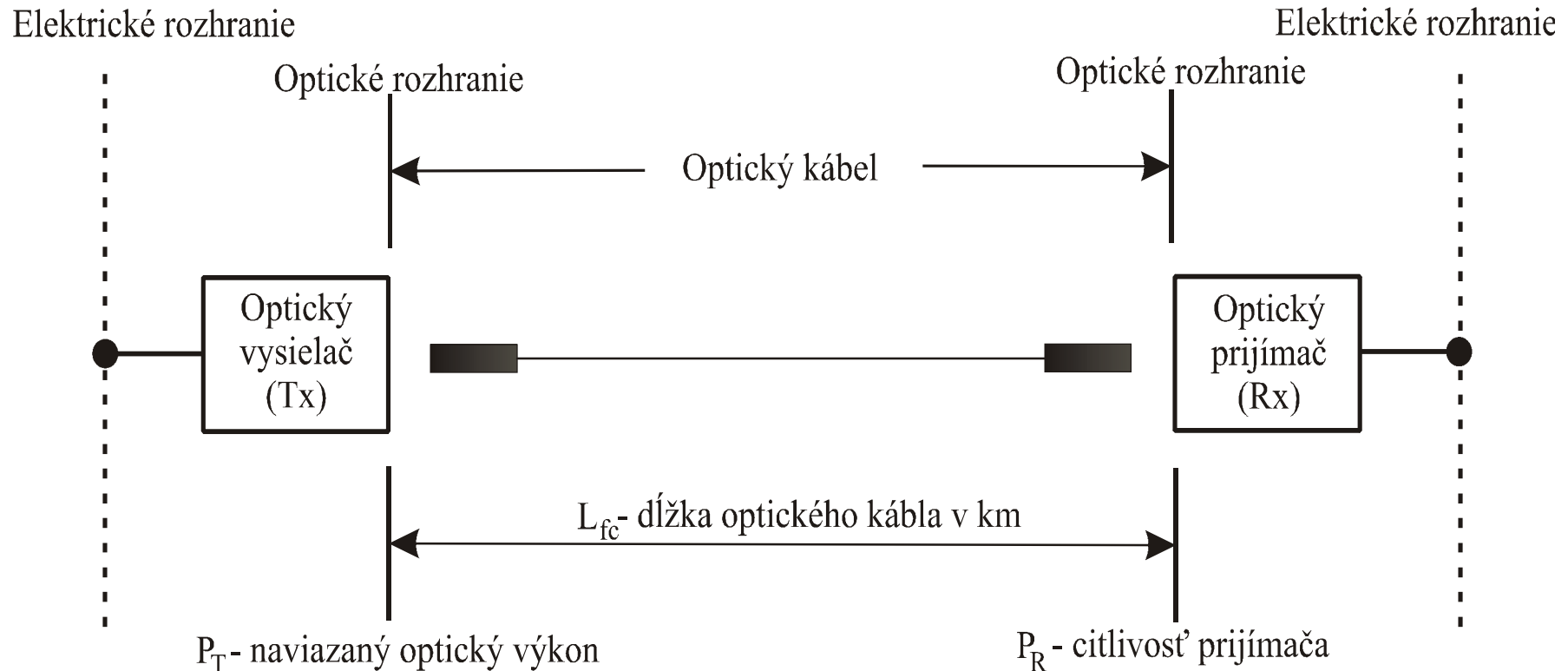
- q Priamo kompatibilné s digitálnou výpočtovou technikou
- q Číslicový prenos odstraňuje problémy s nelinearitou zdrojov a detektorov optického žiarenia
- q Teplotnou závislosťou ich parametrov
- q Starnutím, atď.

Komunikačné systémy rôznych konfigurácií a hierarchií:

- n Kruhové, Stromové, Hviezdicové, Zbernicové atď.

Najrozšírenejší:

- n Číslicový optický vláknový spoj typu **Point-to Point**
(z bodu do bodu)
- n **Optický vysielateľ a prijímač** sú pripojené k prenosovému médiu
(optickému vláknu - PON) pomocou konektorov
- n **Optický opakovač** (retranslátor – 2R, 3R)
- n **Optický zosilňovač - EDFA**



Obr. 12.1 Optický vláknový spoj.

12.1 PROJEKTOVANIE OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO SPOJA

Projektovaním - sa rozumie **definícia metodológie** pomocou, ktorej možno stanoviť **parametre základných komponentov** optického komunikačného systému:

dosah, vlákno, optický zdroj, fotodetektor, atď.

s cieľom **realizácie** rôznych požadovaných vlastností navrhovaného systému

Stanoviť: Technologické požiadavky na komponenty siete
Komerčnú dostupnosť a ekonomicnosť

Projektant - sa snaží nájsť **optimálne riešenie** pre požadovanú **funkciu** spoja s prihliadnutím na jeho **cenu**, budúci možný **upgrade** a **funkcionalitu**

Základným stavebným prvkom:

- n **Optický spoj**, t.j. úsek optického vláknového komunikačného systému určený pre jednosmernú komunikáciu z bodu do bodu

Pozostáva: z optického vysielača, optického kábla a optického prijímača

Základné charakteristiky optického spoja:

- n **Elektrický signál na vstupe** optického vysielača (modulačný formát: digitálny, analógový, prenosová rýchlosť, frekvencia, úroveň, atď.)
- n **Elektrický signál na výstupe** optického prijímača (chybovosť BER, SNR-Signal to Noise Ratio, úroveň, frekvencia, atď.)
- n **Preklenuteľná vzdialenosť' (dosah)**
- n **Tlmenie prenosovej trasy**

Rôzne zdroje tlmenia v prenosovej trase:

- ✓ Tlmenie samotného optického kábla, použitých spojok konektora
- ✓ Tlmenie zdroja a fotodetektora, WDM multiplexorov/demultiplexorov
- ✓ Tlmenie redundantných úsekov optického vlákna v prepojovacích staniciach ústrední, atď.

Metóda na projektovanie optického vláknového spoja:

Výkonová bilancia spoja (Power Budget Method)

Metóda je založená na alokácii do systému naviazaného optického výkonu P_T na krytie strát (vloženého tlmenia) jednotkových komponentov spoja tak, aby bol dostupný dostatočný výkon optického signálu na vstupe optického prijímača P_R

Projektovaný spoj je realizovateľný

- výkonová bilancia spoja vykazuje nadbytočný výkon

M_a – **systemová rezerva** (bezpečnostný okraj)

- ✓ Zohľadňuje malé zmeny vo vlastnostiach komponentov spoja (starnutie, vplyv šumu, prerušenie a znovuspojenie optického kábla, atď.)
- ✓ V praxi sa M_a volí v rozmedzí **od 5 do 10 dB**

Alokácia optického výkonu v dvoch krokoch:

1. **Najhorší prípad**, t.j. prepočíta sa či kvalita prenosu bude zaručená aj pri uvažovaní najnepriaznivejších podmienok
2. **Štatistický prípad**, kedy sa uvažujú štatistické zmeny parametrov spoja pri zaručení dobrej funkcie spoja v požadovanom časovom intervale

Výpočet výkonovej bilancie optického spoja:

- n **Prepočítaním všetkých zdrojov tlmenia (strát) v inštalovanom optickom vláknovom spoji.**
- n **Použitím parametra kvality spoja** t.j. súčinu $B_{\text{opt}} \cdot L$, kde B_{opt} je pre digitálne systémy prenosová rýchlosť v b/s, pre analógové systémy šírka pásma v Hz, L je dĺžka optického spoja v km
- n **Prepočítaním či uvažovaná dĺžka L optického spoja pri daných podmienkach splňuje vopred špecifikovanú chybovosť BER (Bit Error Rate)**

Uvedené výpočty výkonovej bilancie optického spoja sa chápu ako **iteračný proces**, ktorým sa stanovujú jednotlivé komponenty spoja ako **dôsledky kompromisných riešení** rôznych kombinácií komponentov **možných realizácií systému**

12.1.1 SYSTÉMOVÉ POŽIADAVKY A PARAMETRE KOMPONENTOV

Podmienky práce definujú:

- q Šírku pásma
- q Prenosovú rýchlosť
- q Teplotu
- q Vlhkosť
- q Vibrácie
- q iné parametre

Chyba v parametroch komponentu systému:

- ✓ Zmena podmienky práce
- ✓ Zmena pracovnej vlnovej dĺžky
- ✓ Starnutie
- ✓ Výrobné vady
- ✓ atď.

V priebehu času života komponentu treba uvažovať s najhorším prípadom

Základné systémové požiadavky sú:

Pre digitálne systémy:

- n Linková prenosová rýchlosť' (b/s)
- n Transportná prenosová rýchlosť' (b/s)
- n Linkový kód

Pre analógové systémy:

- n **Šírka pásma linky** (Hz) – šírka pásma optického rozhrania medzi optickým káblom a optickým vysielačom/prijímačom
- n **Šírka pásma transportného systému** (Hz) – šírka pásma elektricky modulovaného prenášaného signálu

Základné charakteristiky optického vysielача:

- q Informácie o výrobe
- q Rok výroby
- q Verzia
- q Systémová aplikácia (digitálna, analógová)
- q Výkonová úroveň
- q Pracovná vlnová dĺžka
- q Typ zdroja (klasifikácia lasera) - uvážiť typ polovodiča (napr. InGaAsP) a jeho štruktúru (napr. DFB)
- q Teplotná stabilizácia
- q Optický izolátor
- q Typ konektora (ST, SC, atď.)
- q Predpísané optické vlákno a jeho parametre

Základné parametre optického vysielacza:

- q Nominálna centrálna vlnová dĺžka λ_{Tnom}
- q Interval variácie centrálnej vlnovej dĺžky λ_{Tmin} a λ_{Tmax}
- q Výkonová úroveň na výstupe P_T (dBm)
- q Maximálny optický odraz O_{rmax}
- q Extinkčný pomer E_x (v dB vyjadrený pomer optického výkonu pre symbol 1 a symbol 0)

Základné charakteristiky optického prijímača:

- q Informácie o výrobe
- q Rok výroby
- q Verzia
- q Systémová aplikácia (digitálna/analógová)
- q Typ fotodetektora (PIN, APD, PIN-FET, materiál fotodetektora)
- q Pracovná vlnová dĺžka
- q Teplotná stabilizácia
- q Typ konektora
- q Predpísané optické vlákno a jeho parametre

Parametre prenosu:

- n **Citlivosť prijímača** P_R (dBm), určuje **najmenší optický výkon** na vstupe optického prijímača, nezahrňuje vplyv disperzie resp. odrazu, tieto výkonové straty označujeme ako P_D , resp. R_p
- n **Výkonové straty v dôsledku disperzie** P_D , je to výkon potrebný na vykrytie medzisymbolovej interferencie, dvojlomu a efektu chirpu lasera v dôsledku **maximálnej disperzie signálu** medzi vysielateľom a prijímačom D_{TR} , ktorá je špecifikovaná na strane vysielateľa ako skreslenie druhého rádu (CSO) a na strane prijímača ako S/N (SNR)

- n **Výkonové straty v dôsledku odrazu** R_p , je to výkon potrebný na vykrytie strát v dôsledku maximálneho optického odrazu O_{Rmax} na strane vstupného optického konektora na dosiahnutie požadovanej kvality prenosu BER alebo S/N, ako v prípade bez odrazu

- n **Maximálna hodnota prípustnej disperzie prenosu medzi vysielateľom a prijímačom** D_{TR} . Je to disperzia optickej vláknovej trasy ako aj páru vysielateľ/prijímač na zaručenie požadovanej kvality prenosu BER, resp. S/N

- n **Maximálna úroveň optického výkonu na vstupe optického prijímača** P_{Rmax} v najhoršom prípade, ktorá je špecifikovaná požadovanou kvalitou prenosu BER, resp. S/N

Straty naviazania U_{bd} (dB), vložné tlmenie konektorov U_{CR} (dB), ich počet N_{CR} , pre WDM systémy vložné tlmenie WDM multiplexora/demultiplexora U_{WDM} (dB)

K pripojeniu optického vysielača, resp. prijímača ku káblovej trase sa uvažuje použitie vnútorných systémových **úsekov optického vlákna** s merným tlmením α_{SM} (dB/km), s kritickou vlnovou dĺžkou λ_{cc} a celkovou dĺžkou L_{SM} (km)

Inštalovaný optický kábel: typ optického vlákna, jeho charakteristiky výroby, profil indexu lomu, tolerancie, eliptičnosť, koncentričnosť, elektromagnetické pole, merné (špecifické) tlmenie α_{fc} (dB/km), medznú vlnovú dĺžku λ_{cc} , dĺžku vlákna L_{fc} (km)

Parametre optického kábla:

- n α_{fc} (dB/km) **špecifické tlmenie** určené ako najhorší prípad pre celú životnosť kábla pre nominálnu centrálnu vlnovú dĺžku vysielača λ_{Tnom}
- n α_{λ} (dB/km) **najväčší nárast tlmenia vlákna** nad hodnotu α_{fc} pre centrálnu vlnovú dĺžku vysielača určenú pre interval od λ_{Tmin} do λ_{Tmax}
- n α_j (dB/km) **merné tlmenie spojok**, kde uvažujeme pre príslušnú technológiu špecifické straty na 1 km vlákna
- n L_{fc} (km) **celková dĺžka** optického kábla

- n **Interval vlnových dĺžok s prakticky nulovou hodnotou materiálovej disperzie** $\lambda_{0 \min}$ a $\lambda_{0 \max}$.
- n $S_{0 \max}$ **maximálna hodnota strmosti disperznej krivky** pre vlnovú dĺžku λ_0 s nulovou hodnotou materiálovej disperzie.
- n $D_1(\lambda)$, $D_2(\lambda)$ **medzné hodnoty veľkosti koeficienta chromatickej disperzie** optického vlákna v ps/nm.km pre vlnovú dĺžku λ vypočítame podľa vzťahov:

$$\begin{aligned}
 D_1(I) &= \left(\frac{S_{0\max}}{4} \right) \left(\frac{I^4 - I_{0\min}^4}{I^3} \right) \\
 D_2(I) &= \left(\frac{S_{0\max}}{4} \right) \left(\frac{I^4 - I_{0\min}^4}{I^3} \right)
 \end{aligned}
 \tag{12.1}$$

Bezpečnostný okraj systému a starnutia M_a

12.2 PROJEKTOVANIE OPTICKÉHO SPOJA S VYUŽITÍM VÝKONOVEJ BILANCIE

Model optického spoja:

- q Naviazaný výkon z optického vysielacza P_T
- q Citlivosť optického prijímača P_R
- q Celkové straty v optickom kábelovom systéme U_s
- q Výkonový zisk G

Ak $U_s \leq G$ potom je **možné optický spoj realizovať**

Inak **nutné do trasy zaradiť optický zosilňovač**

- ✓ Vyžaduje napájanie
 - ✓ Má vysokú cenu
- Je žiaduce projektovať optické spoje pokiaľ možno bez použitia optického zosilňovača
- ✓ Uprednostníme voľbu vlákna s menšou hodnotou tlmenia
 - ✓ Prijímač s väčšou citlivosťou
 - ✓ Konektory resp. spojky s menším vložným tlmením a pod.

12.2.1 PROJEKTOVANIE DIGITÁLNEHO OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO SPOJA

Digitálne optické vláknové spoje:

- q Výlučne jednomódové optické vlákna
- q Systémy - **Ohraničené tmením**
 - **Ohraničené disperziou**

Doporučenie ITU-T číslo: 6.955

- ✓ s prenosovou rýchlosťou do 6 x 44736 kb/s systémy ohraničené tmením
- ✓ s väčšou prenosovou rýchlosťou sú ohraničené disperziou

Systemy ohraničené tlmením:**Výkonový zisk systému:**

$$G = P_T - P_R - P_D - R_P - M_a - U_{WDM} - a_{SM} L_{SM} - U_{CR} N_{CR} \quad (12.2)$$

Straty v optickom káblovom systéme:

$$U_S = (a_{fc} + a_I + a_j) L_{fc} \quad (12.3)$$

System nie je ohraničený tlmením ak je $G > U_S$

Systemy ohraničené disperziou:

Dosah závisí od tolerancie optického prijímača na skreslenie optického impulzu. **Optický spoj nie je ohraničený disperziou ak je splnená podmienka**

$$D(\lambda_T)L_{fc} \leq D_{TR} \quad (12.4)$$

Kde: $D(\lambda_T)$ je koeficient chromatickej disperzie optického vlákna (ps/nm.km) pre vlnovú dĺžku vysielača

L_{fc} je dĺžka optického kábla v km

D_{TR} je maximálna prípustná hodnota disperzie (ps/nm) pre použitý optický prijímač

Disperziou ohraničený dosah optického spoja:

$$L_D = \frac{D_{TR}}{D_{\max}} \quad (12.5)$$

Kde: D_{\max} – maximálna možná hodnota koeficienta chromatickej disperzie použitého optického vlákna pre centrálnu vlnovú dĺžku vysielča

Pri projektovaní optického spoja sú dve varianty:

- n **Voľba komponentov systému pri zadanej dĺžke spoja**
- n **Zistenie maxiálneho dosahu projektovaného spoja so zvolenými komponentami systému**

Ak je **zadaná dĺžka spoja**, projektant systému vyberá vhodnú kombináciu komponentov systému (vysielač, prijímač, optický kábel, atď.) **pre zadanú chybovosť BER** pri splnení ohraničení tlmením a disperziou. Možný postup je nasledovný:

1. Zadaná je dĺžka spoja L_T a chybovosť **BER**
2. Určíme parametre prijímača P_R , P_D a D_{TR} , ktoré zodpovedajú zadanej chybovosti **BER**
3. Pre zvolenú kombináciu vybratých komponentov vypočítame G a U_S . **Ak je $G - U_S > 0$, systém nie je ohraničený tlmením**
4. Vypočítame $D_{\max} L_T$, ak je splnená podmienka (12.4) potom **systém nie je ohraničený disperziou**

Ak sú kroky 3. a 4. pri návrhu systému splnené, je projekcia systému ukončená úspešne – **systém je realizovateľný**

Ak je pri projekcii treba určiť **maximálny možný dosah systému** ako to dovoľuje **ohraničenie tlmením a disperziou**, postup je nasledovný:

1. Výber optického prijímača so zodpovedajúcimi parametrami (P_R , P_D a D_{TR}) pre zadanú chybovosť **BER** systému
2. Vypočítajme dosah systému zodpovedajúci podmienke $G = U_S$
3. Vypočítajme dosah systému ohraničeného disperziou $L_D = D_{TR} / D_{max}$
4. **Dosah systému je** $L_T = \min\{L_G, L_D\}$
5. Preveríme či je **BER** zadané v kroku 1. tohto návrhu splnené aj pri voľbe dosahu systému podľa kroku 4.

Štatistický prístup:

Štatistická metóda je alternatívna metóda výpočtu zisku G a optického tlmenia káblového systému s využitím stredných hodnôt a štandardných odchýlok parametrov systému

Stredná hodnota zisku a štandardná odchýlka:

$$\langle G \rangle = \langle P_T \rangle - \langle P_R \rangle - \langle P_D \rangle - P_P - M_a - \langle U_{WDM} \rangle - \langle a_{SM} \rangle L_{SM} - \langle U_{CR} \rangle N_{CR} \quad (12.6)$$

$$s_G = \left(s_{P_T}^2 + s_{P_R}^2 + s_{P_D}^2 + s_{WDM}^2 + s_{U_{CR}}^2 N_{CR} \right)^{1/2} \quad (12.7)$$

Stredná hodnota optických strát a štandardná odchýlka S_{U_S} :

$$\langle L_S \rangle = L_{fc} \left(\langle a_{fc} \rangle + \langle a_I \rangle + a_j \right) L_{fc} \quad (12.8)$$

$$s_{L_S} = L_{fc} \left(s_{a_{fc}}^2 + s_{a_I}^2 + s_{a_j}^2 \right)^{1/2} \quad (12.9)$$

System je možné podľa štatistickej metódy projektovania **realizovať** ak platí

$$\langle G \rangle - \langle U_S \rangle - 2 \left(s_G^2 - s_{U_S}^2 \right)^{1/2} > 0 \quad (12.10)$$

Táto podmienka zaručuje že zisk systému v 97,7 % prípadoch prevyšuje straty v optickom káblovom systéme

12.2.2 PROJEKTOVANIE ANALÓGOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH SPOJOV

Pri **projektovaní analógových optických vláknových spojov** overujeme či navrhovaná kombinácia optického vysielача, prijímača a optického káblového systému pre uvažovanú sekciu optickéhopenosového systému z pohľadu optických strát a disperzie umožňuje dosiahnuť požadovanú **kvalitu prenosu** analógového signálu definovanú pomocou **pomeru nosnej ku šumu -CNR (Carrier to Noise Ratio)** alebo skreslením signálu vyššími harmonickými, resp. intermodulačným skreslením

Projekcia sa uskutočňuje v nasledujúcich krokoch:

1. Pre danú dĺžku sekcie sa **definujú požadované parametre kvality** analógového signálu (CNR, úroveň vyšších harmonických, intermodulačné skreslenie, atď.)
2. Vyberú sa parametre optického prijímača (P_R , P_D a D_{TR}), ktoré vyhovujú kvalite analógového signálu podľa kroku 1
3. Vypočíta sa G a U_S . Ak je $G \geq U_S$, **system nie je ohraničený tlmením**
1. Vypočítame $D_{\max} L_{fc}$. Ak je splnená podmienka (12.4) **system nie je ohraničený disperziou.**

Ak sú splnené podmienky krokov 3. a 4. systém je realizovateľný.

Ak niektorá z podmienok 3. a 4. nie je splnená, je potrebné upraviť parametre (predpoklady) projektovaného systému a vrátiť sa ku kroku 1.

Výpočet maximálneho dosahu systému ohraničeného tlmením, resp. disperziou sa uskutoční v nasledujúcich krokoch:

1. Výber parametrov optického prijímača (P_R , P_D a D_{TR}), ktoré zodpovedajú požadovaným parametrom kvality prenášaného analógového signálu
2. Vypočítame dosah ohraničený tlmením $G = U_s$.
3. Vypočítame dosah ohraničený disperziou $L_D = D_{TR} / D_{max}$.

Dosah systému je minimum dosahov vypočítaných podľa krokov 2. a 3.

Preveríme či požadované **CNR** (resp. **SNR**) z kroku 1. je dosiahnuté pri dosahu určeného podľa kroku 4.

Ak požadované **CNR** nie je splnené, je treba upraviť parametre projektovaného systému a vrátiť sa ku kroku 1.

12.3 PROJEKTOVANIE OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO SPOJA S VYUŽITÍM KVALITY SPOJA

Pri projektovaní optických spojov možno vychádzať z:
kvality spoja:

t.j. súčinu $B_{\text{opt}} \cdot L$

Kde: B_{opt} vyjadruje požadovanú šírku pásma, resp. prenosovú rýchlosť
 L je dosah systému

Pri projektovaní systému je potrebné určiť:

- **Použitú modulačnú metódu:**
 - n Digitálna
 - n Analógová
- **Kvalitu systému:**
 - n Chybovosť – BER, použitý kód
 - n Pomer signál/šum – SNR, použitý kód
- **Cenu systému**, vrátane ceny komponentov, inštalácie aj údržby
- **Spôľahlivosť** systému ako celku
- **Prenosovú kvalitu systému** ako celku, obyčajne vyjadrenú súčinom $B_{\text{opt}} \cdot L$

12.3.1 PROJEKTOVANIE DIGITÁLNYCH SYSTÉMOV

Pre digitálne systémy:

- q B_{opt} predstavuje prenosovú rýchlosť (vyjadrenú v kb/s, Mb/s, resp. Gb/s) a
- q L dosah systému (preklenuteľnú vzdialenosť v km)
Na projektovaní systémov možno výhodne **použiť Tabuľku**
- q **Stĺpce:** dosah systému L (od 1 m až do vyše 100 km)
- q **Riadky:** prenosovú rýchlosť systému (od 10 kb/s až do vyše 1 Gb/s)

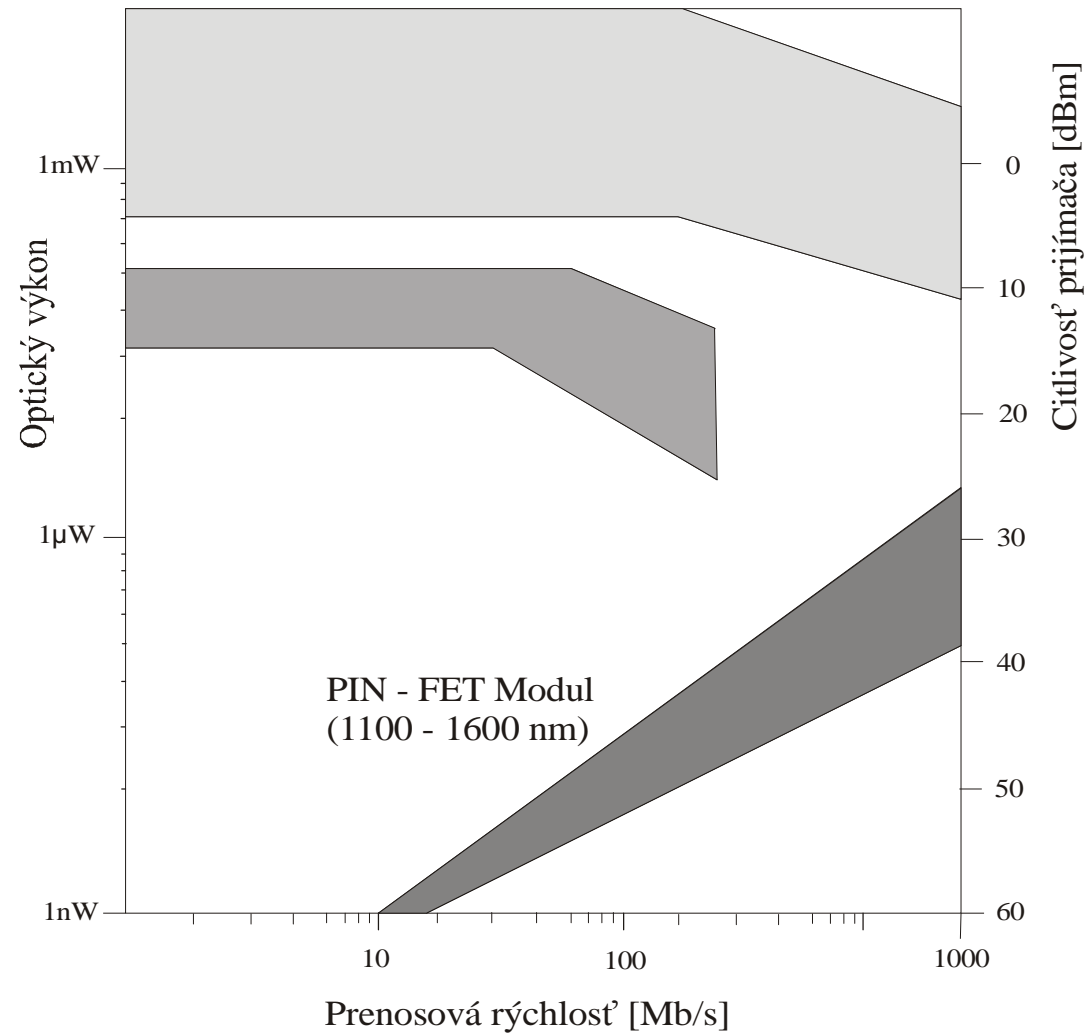
Tab.12.1 Tabuľka projektovania digitálnych optických spojov

	L	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈
B _{opt}		1-10 m	10-100 m	100m-1km	1-3 km	3-10 km	10-50 km	50-100 km	>100km
B _{opt1}	<10 kb/s								
B _{opt2}	10-100 kb/s							VII	
B _{opt3}	0,1-1 Mb/s		I						V
B _{opt4}	1-10 Mb/s						V		
B _{opt5}	10-50 Mb/s								
B _{opt6}	50-500 Mb/s				II			VI	
B _{opt7}	0,5-1 Gb/s	III							
B _{opt8}	>1 Gb/s			IV					

Sedem oblastí vzhľadom na použitý typ optického zdroja a optického vlákna:

- I. oblasť:** SLED – MMSI optické vlákno
- II. oblasť:** LED alebo LD – MMSI alebo MMGI optické vlákno
- III. oblasť:** LD alebo ELED – MMSI optické vlákno
- IV. oblasť:** LD alebo ELED – MMGI optické vlákno
- V. oblasť:** LD – MMGI optické vlákno
- VI. oblasť:** LD – SMSI optické vlákno
- VII. oblasť:** LD – MMSI optické vlákno

Pri hranici oblasti treba uvažovanú voľbu komponentov potvrdiť detailnejším rozborom charakteristík použitých komponentov (vlákno, fotodetektor, atď.)



Obr. 12.2 Citlivosť digitálnych optických prijímačov.

Postup projektovania možno vyjadriť nasledujúcimi krokmi:

1. Stanoví sa maximálna chybovosť systému (BER). Pre telekomunikačné systémy sa v praxi obyčajne požaduje 10^{-9} , pre počítačové siete sa požaduje 10^{-10} .
2. Stanoví sa kvalita systému určená súčinom. Cieľom je realizovať systém s prenosovou rýchlosťou a a s dosahom L .
3. Určenie zodpovedajúcej oblasti v **Tab.12.1**.
4. Určenie toho aký zdroj môže byť použitý (LED alebo LD) a stanovenie strednej hodnoty do optického vlákna naviazaného optického výkonu P_S (dBm). Na **Obr. 12.2** sú znázornené typické hodnoty P_S pre LD od -10 do -25 dBm.
5. Určenie citlivosti optického prijímača P_R (dBm) pri dosiahnutí požadovanej chybovosti prenosu, pre stanovenú (projektovanú) prenosovú rýchlosť. Citlivosť PIN-FET modulu z rozsahu $\lambda = 1100$ až 1600 nm a Si APD pre $\lambda < 1000$ nm je na **Obr. 12.2** pre prenosovú rýchlosť Mb/s. V praxi je P_R v rozsahu od -60 do -30 dBm.

6. Určenie minimálneho dovoleného tlmenia systému

$$U_{\max} = P_R - P_S \quad (12.11)$$

Treba upozorniť, že je funkciou BER, t.j. je určený obyčajne pre $BER \leq 10^{-9}$.

7. Určenie útlmu použitých spojok systému U_j (dB).
8. Určenie útlmu použitých konektorov systému U_{cr} (dB).
9. Určenie systémovej rezervy M_a (dB).
10. Určenie tlmenia vláknovej trasy U_{fc} (dB).

$$U_{fc} = U_{\max} - (U_j + U_{cr} + M_a) \quad (12.12)$$

Určenie merného tlmenia (dB/km) pre navrhnuté vlákno (**Tab.12.1**) a použitú strednú vlnovú dĺžku systému.

11. Výpočet dosahu systému

$$L_{\max} = \frac{U_{fc}}{a_{fc}} \quad (12.13)$$

12. Ak je $L_{\max} \geq L$, kde L je požadovaný dosah systému, je systém z uvažovaných komponentov realizovateľný. Použitie opakovača, resp. optického zosilňovača v takomto systéme nie je potrebné. V ďalšom je potrebné vypočítať ostatné parametre systému: cenu, spoľahlivosť, degradáciu, atď.
13. Ak je $L_{\max} < L$ projektovaný systém nemôže byť z uvažovaných komponentov realizovaný bez použitia opakovača (resp. optického zosilňovača).

Pred použitím opakovača je treba zvážiť či nie je možné systém realizovať s upravenými komponentami (zväčšením naviazaného optického výkonu P_S , zmenšením citlivosti prijímača P_R , použitím kvalitnejšieho optického vlákna, spojok a konektorov)

Pri použití opakovača je treba **zvážiť jeho napájanie**. Pri použití opakovača je potrebné poznať **dosah systému z hľadiska disperzie**

$$d_c L < D_{\max} \quad (12.14)$$

kde

δ_c - koeficient chromatickej disperzie použitého optického vlákna

D_{\max} - maximálna hodnota dovolenej disperzie systému

12.3.2 PROJEKTOVANIE ANALÓGOVÝCH SYSTÉMOV

Pre projektovanie analógových systémov možno použiť **kvalitu systému** na výber zdroja a optického vlákna podľa Obr. 12.3. V tomto diagrame predstavuje požadovanú **šírku pásma** systému B_{opt} (MHz) a L **dosah** systému (km), na ktorej sa uvažuje prenos **signálu s požadovanou kvalitou**, SNR

Projektovanie analógových systémov s jedným kanálom:
Z diagramu (Obr.12.3) určíme zdroj a použité optické vlákno

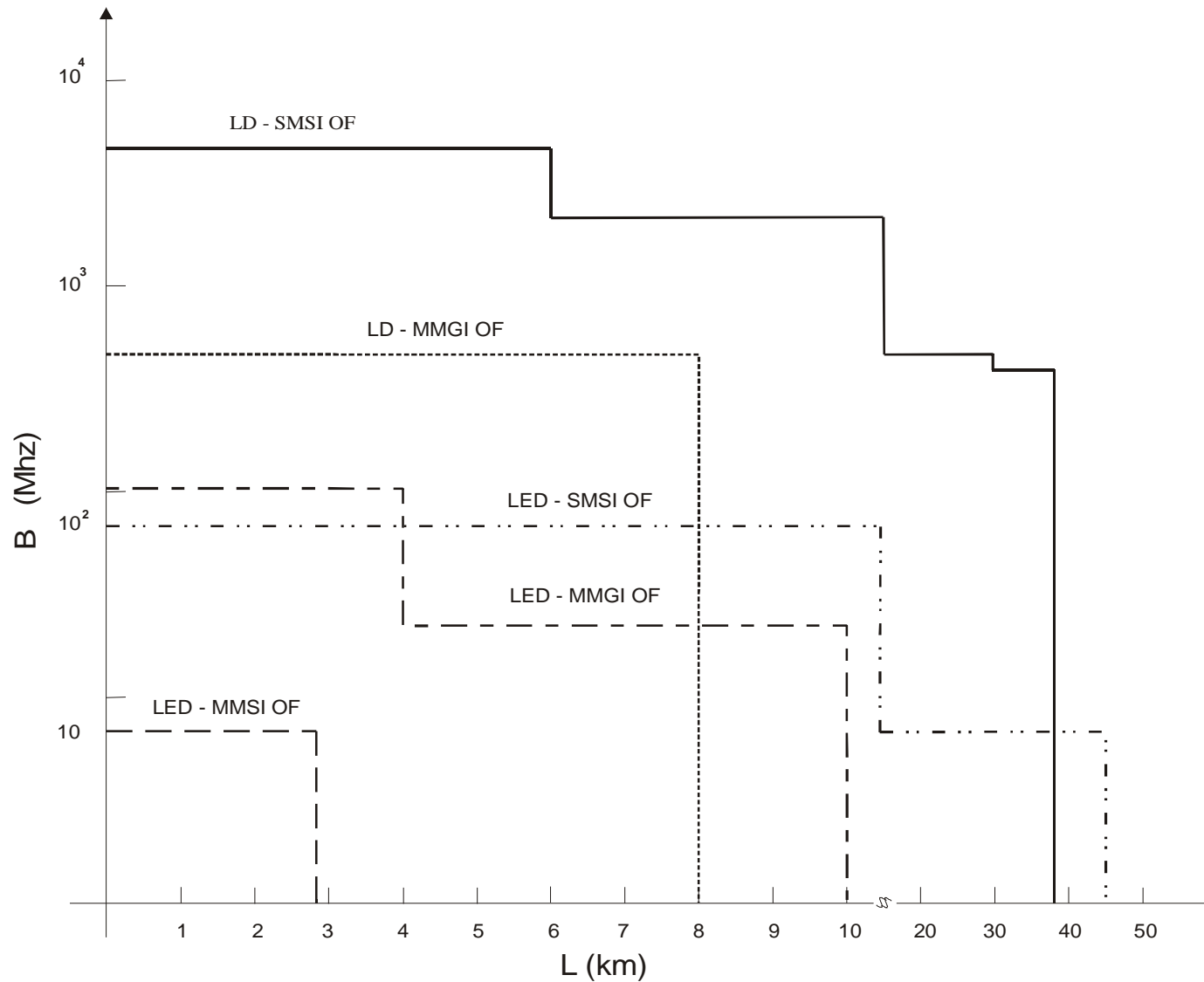
Postup možno vyjadriť nasledujúcimi krokmi:

1. Určíme **vzdialenosť** prenosu vybraným optickým vláknom.
2. Určíme **parametre optického prijímača** pre požadované SNR.
3. Určíme maximálne dovolené tlmenie optickej vláknovej trasy (z naviazaného optického výkonu a citlivosti prijímača).
1. Alokujeme z kroku 3 vypočítané tlmenie na optickú vláknovú trasu (optické vlákno, konektory, spojky) a na systémový okraj.

Projektovanie viackanálového systému:

Najmä v CATV systémoch sa často použitím FDM multiplexujú viaceré AM, resp. FM modulované analógové systémy.

Postup projekcie systému sa líši od toho, či zo súčiny vyplýva použitie LD alebo LED.



Obr. 12.3 Diagram $B_{opt} \cdot L$ pre analógové optické spoje.

Pri použití LD:

1. Určíme vzdialenosť prenosu L_S (km).
 2. Určíme požadovaný pomer signál/šum (SNR) a vypočítame potrebný pomer nosná/šum (CNR).
- Pre AM systémy je

$$SNR = CNR - 0.2(dB) \quad (12.15)$$

- Pre FM systémy je

$$SNR = CNR + 2\log(\Delta f_s / B_v) + 20.37(dB) \quad (12.16)$$

kde Δf_s je maximálna frekvenčná odchýlka a B_v je šírka pásma video signálu.

3. Vypočítame celkový pomer CNR

$$CNR_T = 10\log CNR - 10\log N \quad (12.17)$$

pre postupnosť N regenerátorov (ak ich systém obsahuje).

4. Vypočítame maximálnu hodnotu modulačného indexu

$$m_{\max} = \frac{m_i}{K_z} \quad (12.18)$$

kde m_i - modulačný index multiplexovaného signálu,

K_z - počet kanálov a z - parameter ($0,5 < z < 1$).

5. Vypočítame maximálny dosah systému bez regenerátora L_R .

6. Určíme počet regenerátorov.

Pri použití LED:

1. Určíme požadovaný **CNR** a maximálnu úroveň vyšších harmonických, resp. intermodulačné skreslenie.
2. Vypočítame maximálnu hodnotu modulačného indexu m_{\max} , pre dovolenú hodnotu intermodulačného skreslenia.
3. Vypočítame výkonovú úroveň prekľenuťelnú systémom.
4. **Alokujeme** tento výkon na tlmenie prenosovej trasy.

12.4 ČASOVÁ ODOZVA SYSTÉMU

V digitálnych optických vláknových komunikačných systémoch sú tri základné faktory, ktoré **ohraničujú rýchlosť prenosu informácií**:

- n **Trvanie čela impulzu** z optického vysielača (zdroja svetla) – T_S
- n **Rozšírenie impulzu** v dôsledku vnútrovidovej (chromatickej) disperzie – T_C a medzividovej disperzie – T_N optického vlákna dĺžky L
- n **Nárast impulzu** v dôsledku zotrvačnosti prijímača – T_D

Celkový čas nárastu impulzu:

$$T_{SYST} = 1.1\sqrt{T_S^2 + T_C^2 + T_N^2 + T_D^2} \quad (12.19)$$

Na základe poznania hodnoty T_{SYST} možno určiť **maximálnu prenosovú rýchlosť** B_{tmax} použitím vzťahu medzi časom nárastu impulzu t_r a 3dB šírkou frekvenčného pásma B **jednoduchého RC filtra**

$$t_r = \frac{0.35}{B} \quad (12.20)$$

Ak uvažujeme, že $t_r = T_{SYST}$ a 3dB šírka frekvenčného pásma musí byť minimálne taká, aby $B_T = 1$

$$T_{SYST} = t_r = 0.35t \quad (12.21)$$

kde τ je čas trvania impulzu

Pre RZ kódy je $B_T = B = 1/\tau$

$$B_T(\max) = \frac{0.35}{T_{SYST}} \quad (12.22)$$

Pre NRZ kódy je $B_T = B/2 = 1/2\tau$

$$B_T(\max) = \frac{0.7}{T_{SYST}} \quad (12.23)$$

- Medzná hodnota T_{SYST}** - Pre **RZ kódy** menšia ako 35 % bitového intervalu
 - Pre **NRZ kódy** menšia ako 75 % bitového intervalu

12.5 NÁVRH OPTICKÉHO PRIJÍMAČA

Základná štruktúra optického prijímača:

- q Nízkošumový predzosilňovač
- q Výkonový zosilňovač (resp. niekoľko zosilňovacích stupňov)
- q Filter

Použité predzosilňovače a výkonové zosilňovače sú **nesaturujúce**

Možno použiť tú istú kombináciu predzosilňovačov a výkonových zosilňovačov na detekciu **analógových ako aj digitálnych signálov**

Rozdiel medzi dvoma prijímačmi vzniká zo spôsobu, akým sa spracovávajú signály po zosilnení

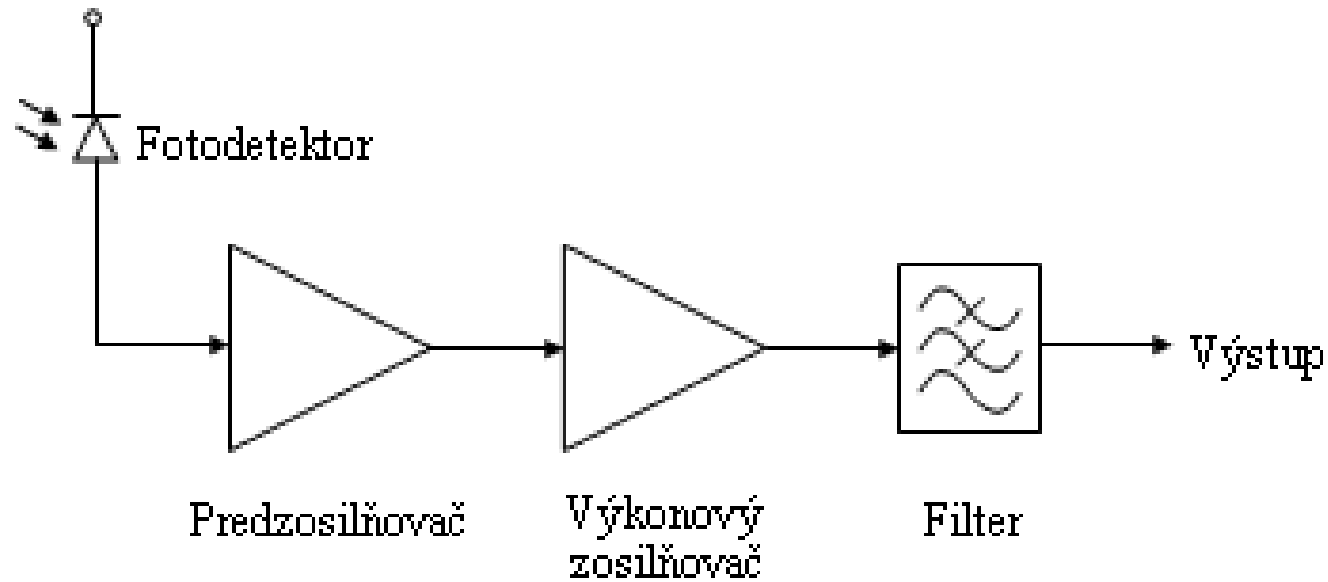
Digitálne optické komunikačné systémy sú **najrozšírenejšie**, venujeme sa predovšetkým rozboru digitálnych prijímačov

Analógové komunikačné systémy:

- ✓ Prenos televízneho signálu
- ✓ Prenos signálov z optických vláknových senzorov

Základné vlastností použitého predzosilňovača:

- ✓ Šírka pásma musí byť dostatočne veľká
- ✓ Zisk musí byť dost' veľký
- q Dosiahnutie **minimálneho šumu** znamená **ohraničenie šírky pásma** prijímača
- q Malá šírka pásma spôsobí vznik medzisymbolovej interferencie
- ISI (Inter Symbol Interference)
- q **Šírka pásma prijímača je kompromis** medzi minimalizovaním šumu a medzisymbolovou interferenciou

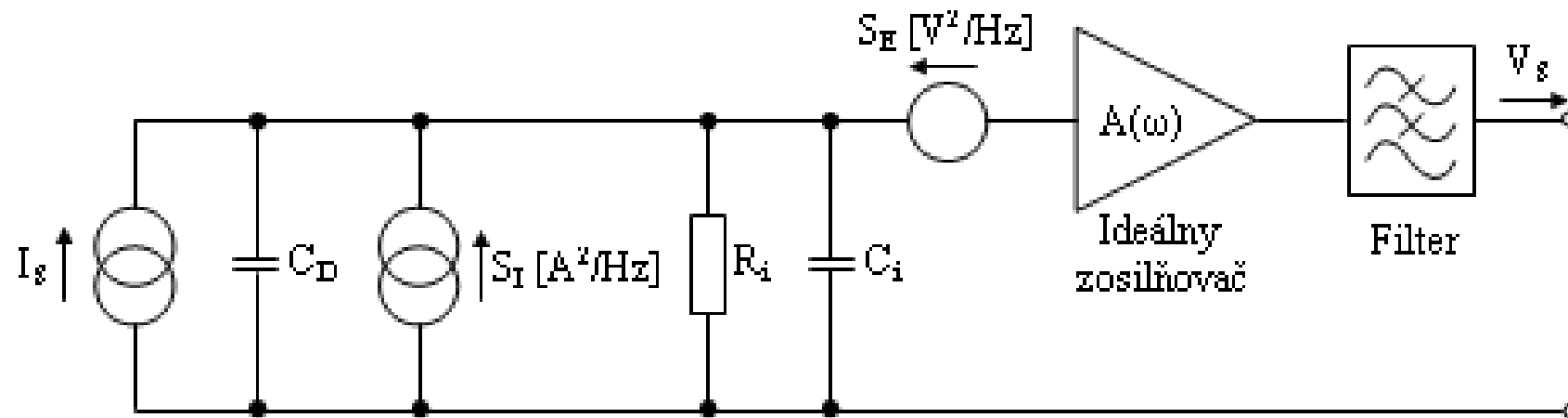


Obr. 12.4 Základná štruktúra optického prijímača.

12.5.1 ZÁKLADNÉ ŠUMOVÉ VLASTNOSTI

Prijímač ako lineárny kanál s ekvivalentným obvodom podľa Obr. 12.5

- ✓ Jediný **zdroj šumu** v prijímači bude **šum predzosilňovača**
- ✓ **Šumový generátor** S_1 [A^2/Hz] modeluje šumový prúd prvého stupňa predzosilňovača a zaťažovací odpor fotodetektora
- ✓ **Sériový šumový generátor** S_E [V^2/Hz] modeluje sériové šumové zdroje predzosilňovača



Obr. 12.5 Ekvivalentný obvod optického prijímača.

Prenosová funkcia prijímača

(12.24)

$$Z_T(\omega) = \frac{V_S}{I_S}$$

Z Obr. 12.5 je zrejmé

$$V_S = I_S Z_i A(\omega) H_f(\omega) \quad (12.25)$$

kde Z_i je vstupná impedancia, ktorá je paralelnou kombináciou R_i a celkovej vstupnej kapacity a H_f je prenosová funkcia použitého filtra
Prenosovú funkciu možno vyjadriť $Z_T(\omega)$ v tvare

$$Z_T(\omega) = Z_i A(\omega) H_f(\omega) \quad (12.26)$$

Sériový šumový generátor

$$\frac{S_E}{[Z_i]^2}, \text{ resp. } S_E [Y_i]^2 [A^2/Hz] \quad (12.27)$$

Uvedené dva zdroje šumu sú navzájom nezávislé (t.j. sú nekorelované), potom celková ekvivalentná spektrálna hodnota šumového prúdu je

(12.28)

$$S_{eq}(f) = S_I + S_E [Y_i]^2$$

Pripomeňme, že

$$Y_i = \frac{1}{R_i} + j\omega C_T$$

(12.29)

kde $C_T = C_D + C_I$. Potom možno písať

$$S_{eq}(f) = S_I + S_E \left(\frac{1}{R_i^2} + (2\pi f C_T)^2 \right) \quad (12.30)$$

Stredná kvadratická hodnota výstupného šumového prúdu

$$\begin{aligned} \langle i_n^2 \rangle_T &= \int_0^\infty S_{eq}(f) [Z_T(\omega)]^2 df = \\ &\left(S_I + \frac{S_E}{R_i^2} \right) \int_0^\infty [Z_T(\omega)]^2 df + S_E (2pC_T)^2 \int_0^\infty [Z_T(\omega)]^2 f^2 df \end{aligned} \quad (12.31)$$

Analyzujeme $Z_T(\omega)$

Určíme takú frekvenčnú odozvu digitálneho prijímača, ktorá minimalizuje výstupný šum, pričom zachová prijateľnú hodnotu medzysymbolovej interferencie

12.5.2 ŠUM ČÍSLICOVÉHO PRIJÍMAČA

Zapíšme $Z_T(\omega)$ v tvare

$$Z_T(\omega) = R_T H_T(\omega) \quad (12.32)$$

kde R_T je nízkofrekvenčná transimpedencia a $H_T(\omega)$ vyjadruje frekvenčnú závislosť $Z_T(\omega)$. Ak $H_p(\omega)$ je Fourierova transformácia (FT) prijímaného impulzu $h_p(t)$ a $H_o(\omega)$ je FT impulzu na výstupe z filtra $h_o(t)$. Potom $Z_T(\omega)$ môžeme vyjadriť v tvare

$$Z_T(\omega) = R_T H_T(\omega) = \frac{H_o(\omega)}{H_p(\omega)} \quad (12.33)$$

Normalizujeme tvar vstupného impulzu

$$H_T(\omega) = \frac{H_o(\omega)}{H_p(\omega)} \quad (12.34)$$

t.j. odstránime jeho závislosť od R_T

Normovaná bezrozmerná frekvenčná premenná y , definovaná vzťahom

$$y = \frac{f}{B} = \frac{w}{2pB} = \frac{wT}{2p} \quad (12.35)$$

kde B je prenosová rýchlosť

Možno definovať dve nové normované prenosové funkcie

$$H_p'(y) = \frac{H_p(2py/T)}{T} \quad a \quad H_o'(y) = \frac{H_o(2py/T)}{T} \quad (12.36)$$

Normovaná frekvenčná odozva prijímača

$$H_T'(y) = \frac{H_o'(y)}{H_p'(y)} \quad (12.37)$$

Vzťah (12.31) možno napísať v tvare

$$\langle i_n^2 \rangle_T = \left(S_I + \frac{S_E}{R_i^2} \right) R_T^2 B I_2 + (2pC_T)^2 S_E R_T^2 B^3 I_3 \quad (12.38)$$

kde

$$I_2 = \int_0^\infty [H_T'(y)]^2 dy \quad a \quad I_3 = \int_0^\infty [H_T'(y)]^2 y^2 dy \quad (12.39)$$

Výrazy $B I_2$ a $B^3 I_3$ považujeme za ekvivalentné šírky pásma frekvenčne nezávislého a f^2 frekvenčne závislého šumového zdroja. Napätie výstupného signálu a stredná kvadratická hodnota výstupného šumu sú závislé od R_T , možno ich **vztiahnuť k vstupu predzosilňovača**

Stredná kvadratická hodnota vstupného šumového prúdu

$$\langle i_n^2 \rangle_c = \left(S_I + \frac{S_E}{R_i^2} \right) B I_2 + (2pC_T)^2 S_E B^3 I_3 \quad (12.40)$$

Ak poznáme požadovaný pomer S/N , potom je jednoduché určiť požadovaný minimálny signálový prúd a taktiež **minimálny optický výkon**

Predpokladá sa, že poznáme hodnotu integrálov I_2 a I_3 . Keďže tieto závisia od tvaru vstupných a výstupných impulzov, musíme ich analyzovať detailnejšie. Predtým ako **zvážeme tvar vstupného impulzu, definujeme tvar výstupného impulzu tak, aby určoval malý šum a malú medzisymbolovú interferenciu**

Tvar prijímaného impulzu $h_p(t)$ závisí od charakteristík optickej linky: môže byť **obdĺžnikový**, **Gaussov** alebo **exponenciálny**. Prijímané impulzy môžu zaplniť iba časť časového výseku, sú označované ako impulzy krátkej šírky. Pri výpočte hodnôt integrálov I_2 a I_3 musíme uvažovať všetky tieto faktory. **S.D. Personick** vypočítal integrály pre všetky tri tvary prijímaných impulzov. V ďalšom bude uvedený výpočet pre obdĺžnikové a pre Gaussove impulzy. Normované tvary FT týchto impulzov sú

$$H_p' = \frac{\sin apy}{2apy} \quad (12.41)$$

pre impulzy obdĺžnikového priebehu a

$$H_p' = \frac{\exp\{-(2pb y)^2 / 2\}}{T} \quad (12.42)$$

pre impulzy Gaussovho tvaru, kde β je šírka impulzu

Parameter a určuje časť časového úseku zabratý **obdĺžnikovým impulzom**

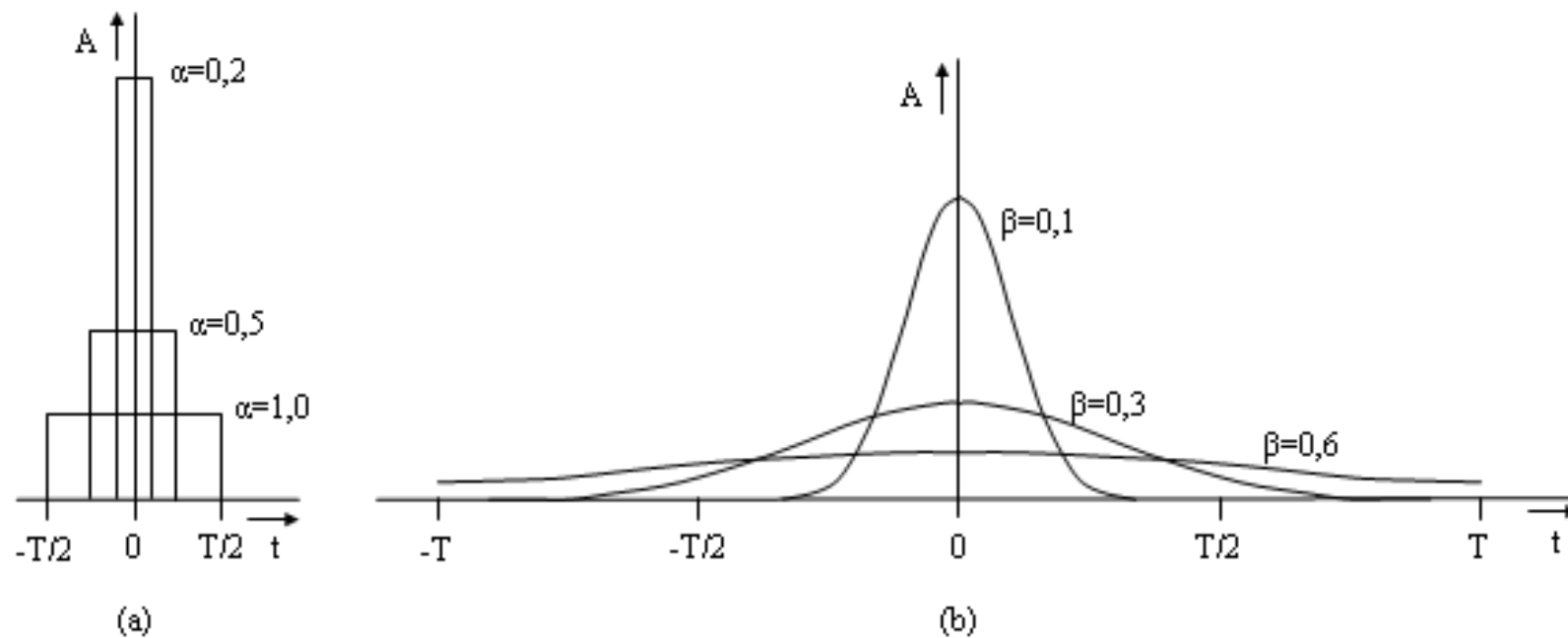
Ak $a=1$, impulz vyplní celý úsek a dostaneme pulzy v plnej šírke alebo tiež obdĺžnikové impulzy bez návratu k nule - **NRZ (Non-Return-to Zero)**

Pre Gaussove impulzy, je podobný parameter

$$g = \int_{-T/2}^{T/2} h_p(t) dt \quad (12.43)$$

V Tab. 12.2 a Tab. 12.3 sú uvedené **numerickou integráciou** vypočítané hodnoty integrálov I_2 a I_3 pre obdĺžnikové a Gaussove impulzy a rôznymi parametrami a , β a γ .

Pre Gaussove impulzy hodnoty integrálov I_2 , I_3 prudko stúpajú ak je $\beta > 0,5$. Dá sa to očakávať, lebo veľká hodnota β spôsobí značné rozšírenie impulzu.



Obr. 12.6 Obdĺžnikové (a) a Gaussove (b) impulzy s rôznymi šírkami.

Pre **obdĺžnikové vstupné impulzy** plnej šírky je optimálna prenosová funkcia aproximovaná prenosovou funkciou zosilňovača s jedným pólom, s 3 dB orezaním pri $B/2$ [Hz], ktorý napája Butterworthov filter tretieho rádu, s frekvenciou orezania $0,7B$ [Hz]

Medzi predzosilňovačom a filtrom je obyčajne zapojený **širokopásmový výkonový zosilňovač**

V aplikáciách, kde šumové vlastnosti nie sú kritické, napríklad **spoje krátkeho dosahu**, sa **filter často vynecháva**

Ak poznáme požadovaný pomer S/N , možno vypočítať šum prijímača a teda aj jeho citlivosť



Tab. 12.2 Hodnoty integrálov I_2 I_3 a α v závislosti od parametrov α a β pre obdĺžnikové impulzy.

a	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I_2	0,376	0,379	0,384	0,392	0,403	0,417	0,436	0,463	0,501	0,564
I_3	0,030	0,031	0,032	0,034	0,036	0,040	0,044	0,053	0,064	0,087

Tab. 12.3 Hodnoty integrálov I_2 I_3 a β v závislosti od parametrov α a β pre Gaussove impulzy.

β	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6				
I_2	0,376	0,379	0,384	0,392	0,403	0,417				
I_3	0,030	0,031	0,032	0,034	0,036	0,040				
	1,000	0,988	0,904	0,789	0,683	0,595				

Šum fotodiódy:

- q Šum prúdu za tmy
- q Výstrelový šum
- v Prijímače s PIN fotodiódou -výstrelový šum často zanedbateľný
- v Prijímače osadené s APD -výstrelový šum nie je možné zanedbať
- v V technickej praxi možno výstrelový šum APD aproximovať ako náhodnú premennú s Gaussovou distribúciou
- v Pre jednoduchosť položíme $I_0=0$

Spektrálna hustota šumového prúdu APD

$$S_{ID} = 2eI_b M^2 F(M) + 2eI_d \quad (12.44)$$

a

$$S_{IS} = 2q \langle I_S \rangle M^2 F(M) \quad (12.45)$$

kde e je náboj elektrónu, I_d je prúd za tmy, I_b prúd v kľudovom pracovnom bode, $\langle I_S \rangle$ stredná hodnota signálového prúdu, M je multiplikačný faktor a $F(M)$ šumový faktor použitej APD

Ekvivalentný vstupný šumový prúd

$$\langle i_n^2 \rangle_{pd} = (S_{ID} + S_{IS})BI_2 \quad (12.46)$$

kde B je prenosová rýchlosť a I_2 hodnota integrálu

Ekvivalentné vstupné šumové prúdy

$$\langle i_n^2 \rangle_1 = 2eI_1M^2F(M)BI_2 + \langle i_n^2 \rangle_T \quad (12.47)$$

a

$$\langle i_n^2 \rangle_0 = \langle i_n^2 \rangle_T \quad (12.48)$$

kde $\langle i_n^2 \rangle_T$ je celkový **od signálu nezávislý ekvivalentný šumový prúd**

Veličina Q

$$Q = \frac{I_1}{\sqrt{\langle i_n^2 \rangle_1} + \sqrt{\langle i_n^2 \rangle_0}} \quad (12.49)$$

Požadovaný priemerný optický výkon

$$P = \frac{Q}{2MR} \left(\sqrt{\langle i_n^2 \rangle_1} + \sqrt{\langle i_n^2 \rangle_0} \right) \quad (12.50)$$

Priemerný optický výkon

$$P = \frac{Q}{2MR} \left(\left[2eI_1 M^2 F(M) B I_2 + \langle i_n^2 \rangle_T \right]^{\frac{1}{2}} + \langle i_n^2 \rangle_T^{\frac{1}{2}} \right) = \quad (12.51)$$

$$= \frac{Q}{2MR} \left(\left[4ePR_0 M^2 F(M) B I_2 + \langle i_n^2 \rangle_T \right]^{\frac{1}{2}} + \langle i_n^2 \rangle_T^{\frac{1}{2}} \right)$$

Citlivosť optického prijímača s APD

$$P = \frac{Q}{R} \left(\frac{\langle i_n^2 \rangle_T}{M} + eBI_2 Q F(M) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12.52)$$

Existuje optimálna hodnota M_{opt}

(12.53)

$$M_{opt} = \frac{1}{x^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{\langle i_n^2 \rangle_T}{eBI_2 Q} + x - 1 \right)^{\frac{1}{2}}$$

kde

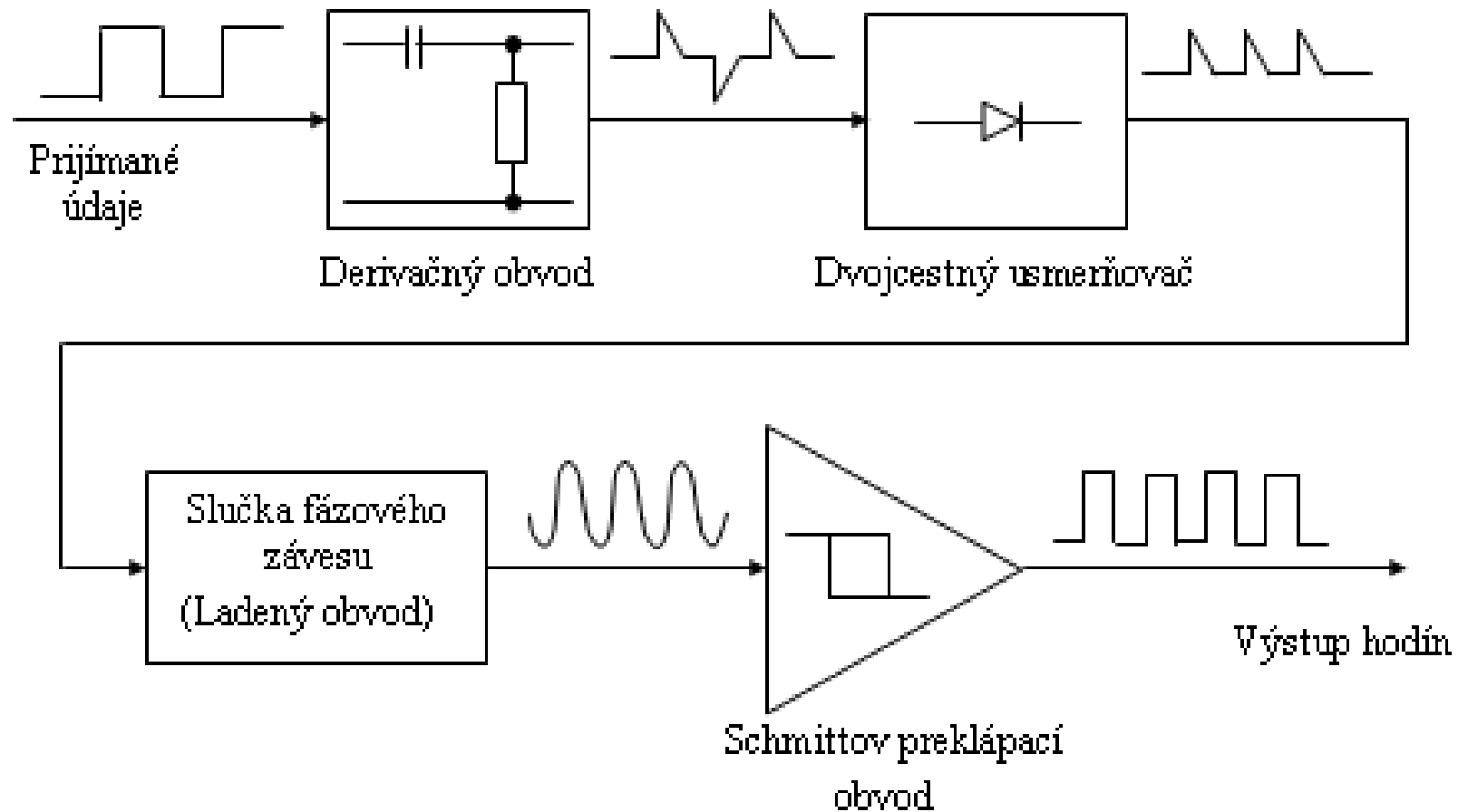
$$F(M) = M + \left(2 - \frac{1}{M} \right) (1 - x) \quad (12.54)$$

kde ξ je pomer ionizačných koeficientov nosičov v APD

V praxi sa optimálna hodnota M_{opt} nastavuje po inštalácii optickej linky **meraním jej chybovosti**

Predchádzajúca analýza citlivosti optického prijímača predpokladala **centrálnu polohu rozhodovacej úrovne**

- ✓ D preklápací obvod
- ✓ Vyžaduje hodinové impulzy
- ✓ Extrahujeme hodinový signál z prijímaných údajov
- ✓ Funkciu vykonáva obvod extrakcie hodín



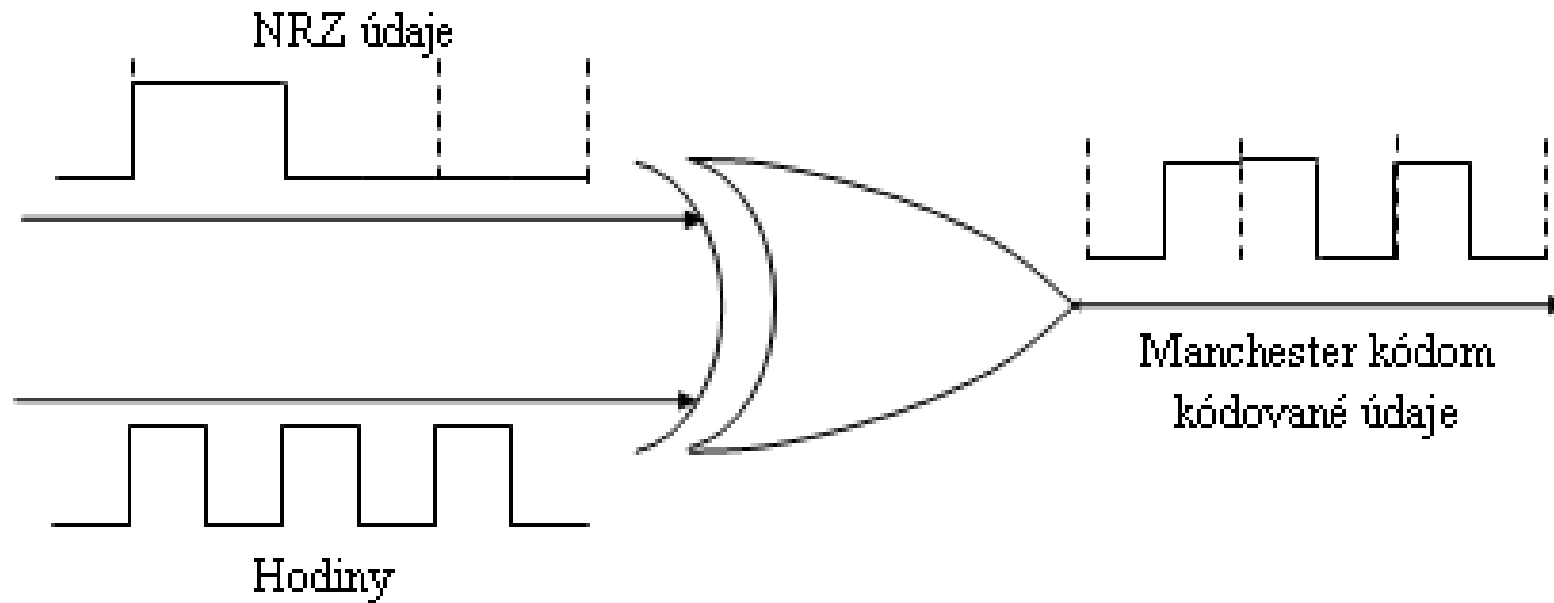
Obr. 12.7 Bloková schéma obvodu extrakcie hodín.

- ✓ **Slučka fázového závesu -PLL (Phase – Lock – Loop)**
- ✓ **Ladený obvod s vysokou kvalitou**

Pri použití **NRZ** kódu sa môže vyskytnúť dlhšia postupnosť 0 alebo 1, čo môže viesť k strate hodinového signálu

Riešenie - použitie **dvojfázového** (alebo **Manchester**) kódu
- **zdvojnásobuje** potrebnú šírku pásma

Blokové kódovanie - kódy s nulovou disparitou, kód 5B6B



Obr. 12.8 Schéma Manchester kódovania

12.5.3 ŠUM ANALÓGOVÉHO PRIJÍMAČA

Analógové signály:

- ✓ Video signály
- ✓ Signály z optických vláknových senzorov

- q **Jediný rozdiel** medzi analógovými a digitálnymi prijímačmi je v spôsobe akým sú **signály spracovávané po výkonovom zosilňovači**
- q Môže **existovať určitý preferovaný typ filtra** použitého na obnovenie pôvodného analógového signálu v základnom pásme.

Tab. 12.4 Blokový kód 5B6B.

Vstupné slovo	Výstupné slovo		
00011		000111	
00101	101000	001011	010111
00110	011000	001101	100111
00111	100100	001110	011011
01001	010100	010011	101011
01010	001100	010101	110011
01011	100010	010110	011101
01100	010010	011001	101101
01101	001010	011010	110101
01110	000110	011100	111001
10001	010001	100011	101110
10010	001001	100101	110110
10011	000101	100110	111010
10100		101001	
10101		101010	
10110		101100	
11000		110001	
11001		110010	
11010		110100	
11100		111000	
00000			
00001			
00010			
00100			
01000			
10000			
01111			
10111			
11011			
11101			
11110			
11111			

Sínusová amplitúdová modulácia optického žiarenia

Optický výkon prijatého signálu

$$P(t) = P_r(1 + ms(t)) \quad (12.55)$$

kde P_r je priemerná hodnota výkonu, $s(t)$ je modulačný signál a m je hĺbka modulácie

Fotoprúd pre prijímač s APD

$$I_S(t) = RMP(t) \quad (12.56)$$

Stredná kvadratická hodnota fotoprúdu

$$\langle I_S^2 \rangle = \frac{1}{2} (RMmP_r)^2 \quad (12.57)$$

Stredná kvadratická hodnota ekvivalentného šumového prúdu

$$\langle i_n^2 \rangle_T = \int_0^{B_{eq}} 2eRP_r M^2 F(M) df + \int_0^{B_{eq}} 2eI_b M^2 F(M) df + \langle i_n^2 \rangle_c \quad (12.58)$$

kde B_{eq} je ekvivalentná šumová šírka pásma prijímača

$$B_{eq} = \int_0^{\infty} [H_T(w)]^2 df \quad (12.59)$$

Po integrácii a úprave

$$\langle i_n^2 \rangle_T = 2e(I_b + RP_r) M^2 F(M) B_{eq} + \langle i_n^2 \rangle_c \quad (12.60)$$

Šumový prúd predzosilňovača

$$\langle i_n^2 \rangle_c = \int_0^{B_{eq}} \left(S_I + \frac{S_E}{R_i^2} \right) df + \int_0^{B_{eq}} S_E (wC_T)^2 df \quad (12.61)$$

alebo

$$\langle i_n^2 \rangle_c = \left(S_I + \frac{S_E}{R_i^2} \right) B_{eq} + (2pC_T)^2 S_E \frac{B_{eq}^3}{3} \quad (12.62)$$

Pomer signál/šum

$$S/N = \frac{\langle I_S^2 \rangle}{\langle i_n^2 \rangle_T} = \frac{1}{2} \left(\frac{(RMmP_r)^2}{2e(I_b + RP_r)M^2 F(M)B_{eq} + \langle i_n^2 \rangle_c} \right) \quad (12.63)$$

Optimálna hodnota multiplikačného faktora pre analógový optický prijímač osadený s APD

$$M_{opt}^{2+x} = \frac{\langle i_n^2 \rangle_T}{e(I_b + RP_r)B_{eq}} \quad (12.64)$$

kde sme použili vzťah $F(M) = M^x$,

x je šumový faktor – definovaný rovnako ako pre digitálny prijímač

- q Takto určená hodnota M_{opt} je len odhadom skutočnosti
- q V praxi sa optimálna hodnota M_{opt} určuje meraním šumových vlastností prijímača

12.5.4 NÁVRH PREDZOSILŇOVAČA

Návrh a analýza predzosilňovačov s cieľom optimalizovať ich vlastnosti:

- n S veľkou vstupnou impedanciou
- n S transimpedanciou

Analýzu šumu uvedieme len pre digitálne optické prijímače

Predzosilňovač s veľkou vstupnou impedanciou:

- ✓ Najcitlivejší dostupný návrh
- ✓ Používa sa v systémoch s veľkým dosahom
- ✓ Malá hodnota tepelného šumu
- ✓ Veľmi malá šírka pásma
- ✓ Prijímač využíva integračný vstup

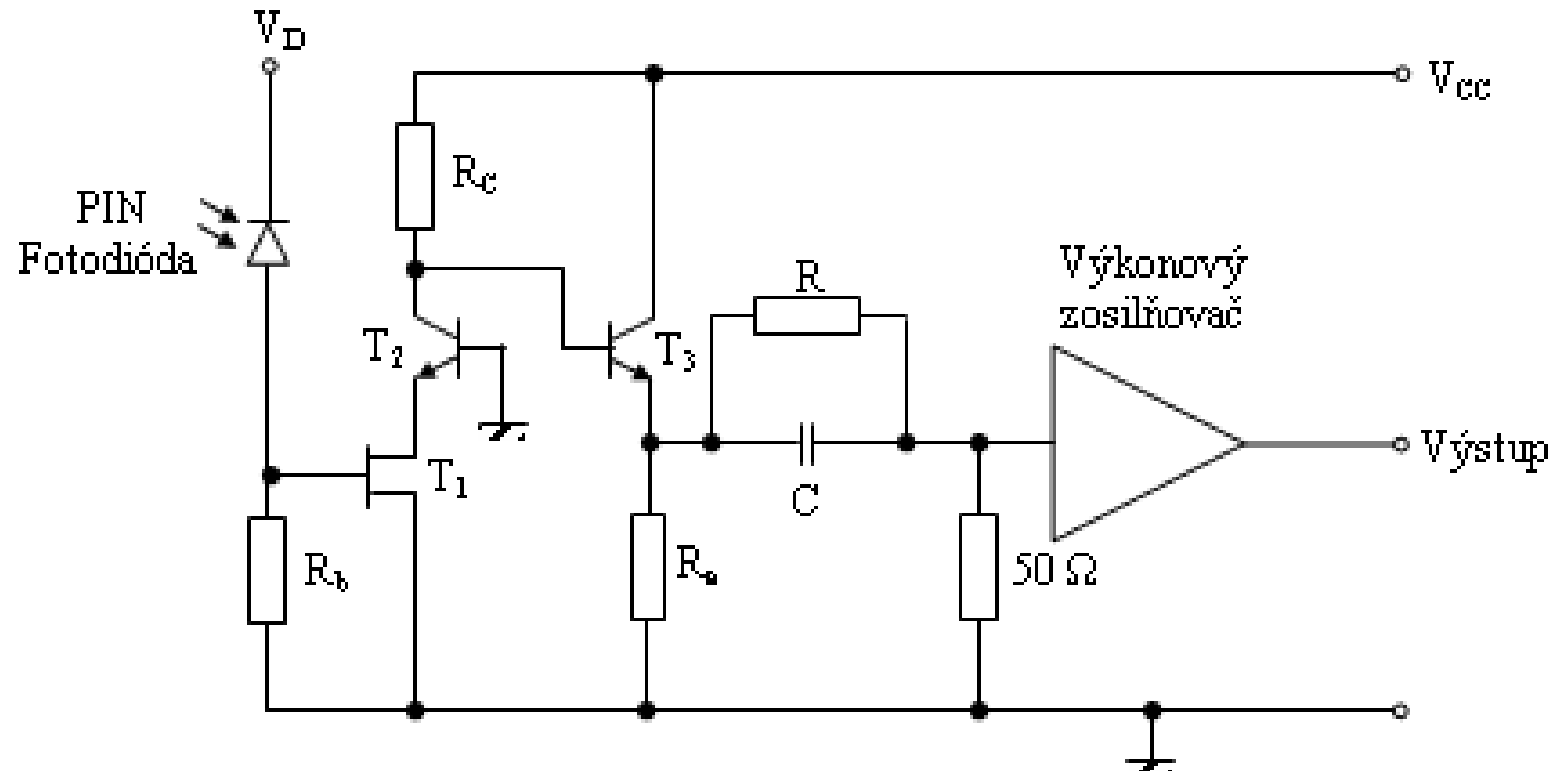
Transimpedančný návrh:

- ✓ Zväčšenie šírky pásma použitého predzosilňovača
- ✓ Kompenzačný obvod nie je potrebný
- ✓ Nie je tak citlivý
- ✓ Veľký dynamický rozsah
- ✓ Negatívna spätná väzba
- ✓ Obyčajne lacnejší

Návrhy založené na využití: Ako vstupného prvku

- ✓ **FET** - obyčajne citlivejšie
- ✓ **BJT** - veľmi veľké prenosové rýchlosti

12.5.4.1 PREDZOSILŇOVAČ S VEĽKOU VSTUPNOU IMPEDANCIOU



Obr. 12.9 Optický prijímač typu PINFET modul s ekvalizačným obvodom a výkonovým zosilňovačom.

Časové konštanty spojené so vstupom a kaskádnou záťažou určujú frekvenčný prenos PINFET modulu

Vstupný pól je

$$S_1 = \frac{1}{t_i} \quad (12.65)$$

kde

$$t_i = R_b C_i \quad (12.66)$$

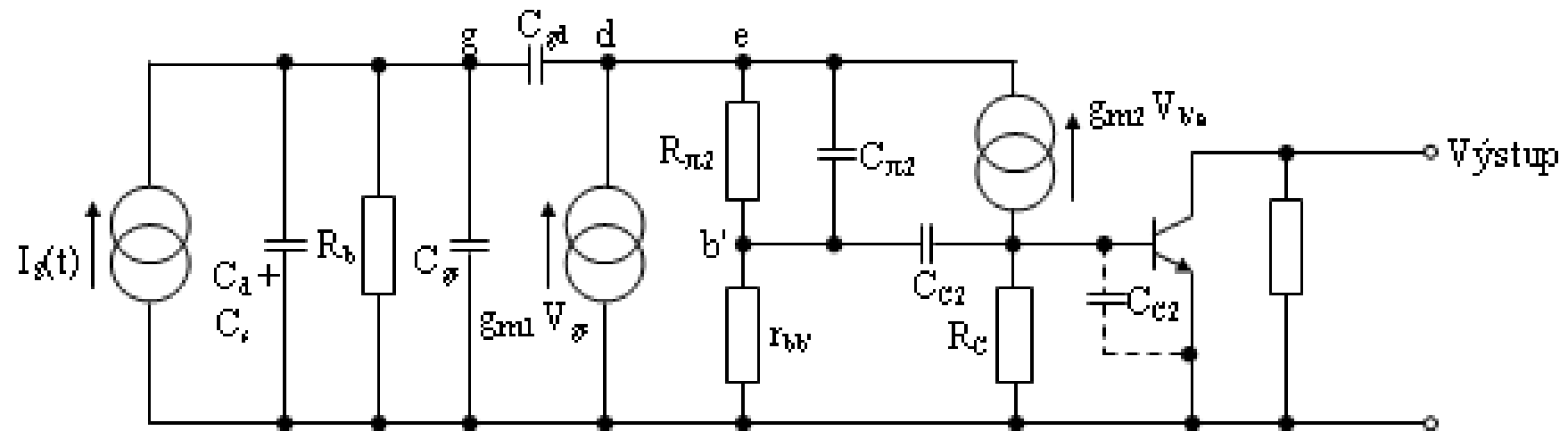
kde C_i je **celková vstupná kapacitancia** - je súčtom:

kapacity fotodetektora C_d

hradlovej kapacity C_{gs} FET

vstupnej rozptylovej kapacity C_s

Millerovej kapacity



Obr. 12.10 Ekvivalentný obvod prijímača s PINFET modulom

Parameter C_{gd} je kapacita FET medzi elektródami g a d , A_1 je napät'ový zisk stupňa FET určený vzťahom

$$A_1 = -g_{m1} r_{e2} \quad (12.67)$$

alebo

$$A_1 = -g_{m1} \frac{V_T}{I_{e2}} \quad (12.68)$$

kde $V_T = 25$ mV a g_{m1} je strmosť FET. C_i vypočítame zo vzťahu

$$C_i = C_d + C_{gs} + C_s + \frac{(1 + g_{m1} V_T) C_{gd}}{I_{e2}} \quad (12.69)$$

Pretože prúd pretekajúci FET je obyčajne okolo 15 mA, typická hodnota $g_{m1} = 15$ mS. Toto je preto, lebo na rozdiel od BJT je zisk g_m FET relatívne nezávislý od budiaceho prúdu. Malá hodnota g_m spolu s hodnotou zaťažovacieho odporu r_{e2} znamená, že hodnota A_1 bude veľmi malá. Zisk stupňa zapojeného so spoločnou bázou A_2 je $g_{m2} R_c$, kde g_{m2} je vodivosť CB stupňa a celkový napät'ový zisk $A_0 = A_1 A_2$ môže byť pomerne veľmi veľký.

Je dôležité minimalizovať hodnotu C_i pretože potom toto dovoľuje použitie väčších hodnôt R_b , pre tú istú polohu pólu a teda redukovať tepelný šum. Polohu kompenzačnej nuly možno nájsť ak pripomenieme, že prenosová funkcia kompenzačného obvodu je

$$H_{eq}(w) = \left[\frac{50}{50 + R} \right] \left[\frac{1 + jwCR}{1 + \frac{jwCR50}{(50 + R)}} \right] \quad (12.70)$$

teda $CR = \tau_i$

Hodnota v menovateli (12.70) určuje šírku pásma prijímača, a teda ak R je dostatočne veľké, potom ju možno aproximovať $1/50$

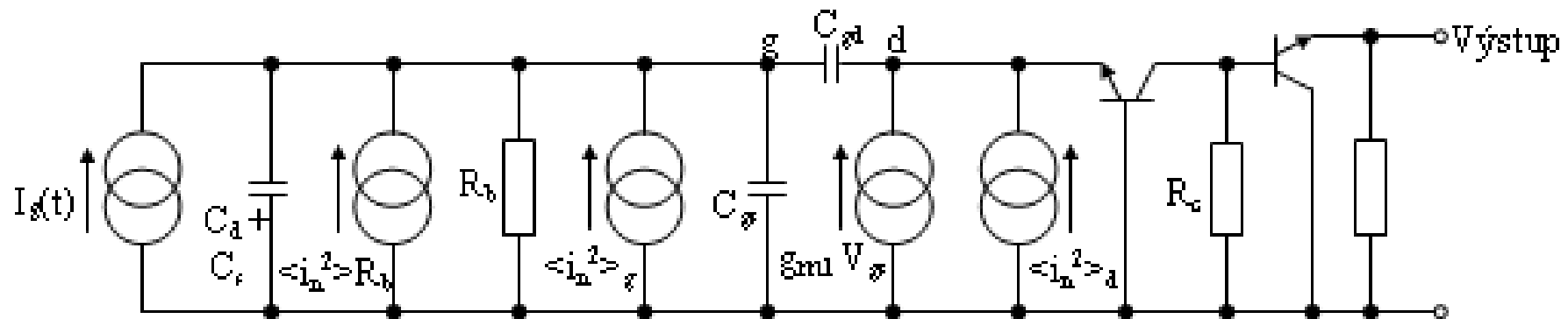
Citlivosť možno upraviť zväčšením transimpedancie, čo sa obyčajne jednoducho realizuje zväčšením napätového zisku predzosilňovača. Z tohto pohľadu mnohé **PINFET moduly** v praxi používajú prídavné nízkošumové zosilňujúce stupne zapojené pred kompenzačným obvodom.

Ak je vstupný pól vykompenzovaný, nasledujúci hlavný pól S_2 je spojený časovou konštantou kaskády τ_c . Ak je hodnota S_2 vo frekvenčnej oblasti menšia ako frekvencia kompenzačného obvodu, potom prijímač zlyhá, t.j. je veľmi dôležité určiť τ_c a teda S_2 . Podľa Obr. 12.10 možno τ_c aproximovať vzťahom

$$t_c = R_c 2C_c \quad (12.71)$$

$$S_2 = \frac{1}{2R_c C_c} \quad (12.72)$$

kde C_c je kapacita BJT kolektor – báza.



Obr. 12.11 Šumový ekvivalentný obvod prijímača s PINFET modulom.

Celková stredná kvadratická hodnota ekvivalentného šumového prúdu

$$\langle i_n^2 \rangle_c = \frac{4kTI_2B}{R_b} + 2eI_gI_2B + \frac{4kTF}{g_{m1}} \left\{ \frac{I_2B}{R_b^2} + (2pC_T)^2 I_3B^3 \right\} \quad (12.73)$$

kde

$$C_T = C_d + C_{gs} + C_{gd} + C_s \quad (12.74)$$

je celková kapacita

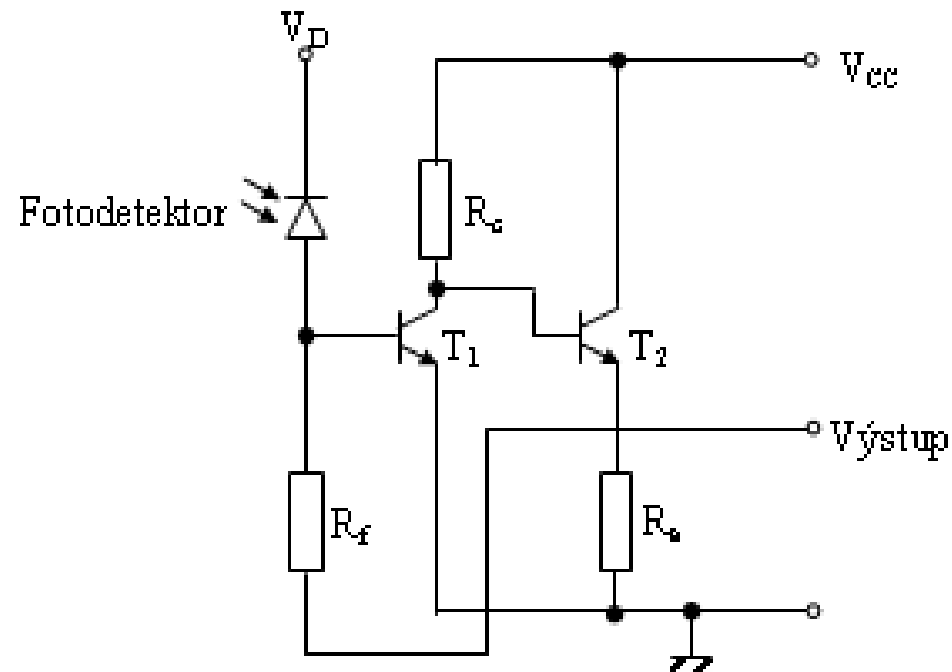
Vzťah (12.73) možno zjednodušiť ak predpokladáme, že R_b je veľmi veľké a zvodový prúd FET je malý. Potom šum prijímača

$$\langle i_n^2 \rangle_{\min} = \frac{4kTF}{g_{m1}} (2pC_T)^2 I_3B^3 \quad (12.75)$$

vyjadruje minimálnu hodnotu šumu pre prijímač s ideálnym PINFET modulom

12.5.4.2 TRANSIMPEDANČNÝ PREDZOSILŇOVAČ

- q Realizovať použitím metódy zápornej spätnej väzby
- q Transimpedančný predzosilňovač má veľkú šírku pásma
- q Vo všeobecnosti sa integrácia detekovaného signálu neuplatňuje
- q Nevyžaduje kompenzačný obvod
- q Dynamický rozsah je obyčajne väčší ako pre prijímač s PINFET modulom.
- q Voľba vstupného tranzistora je aj v tomto zapojení kritická
- q Budeme analyzovať návrh s použitím BJT



Obr. 12.12 Transimpedančný prijímač s využitím jednoduchého zapojenia CE/CC.

Analýza frekvenčného prenosu a šumových vlastností transimpedančného predzosilňovača s využitím zapojenia spoločný emitor/spoločný kolektor (CE/CC)

Postup je možné použiť aj pre iné návrhy transimpedančných predzosilňovačov.

Prenosovú funkciu obvodu:

- ✓ s uzavretou spätnoväzobnou slučkou $Z_c(s)$
- ✓ s otvorenou spätnoväzobnou slučkou $Z_0(s)$
- ✓ spätnoväzobného obvodu $Z_f(s)$

$$\frac{1}{Z_c(s)} = \frac{1}{Z_0(s)} - \frac{1}{Z_f(s)} \quad (12.76)$$

Transimpedancia obvodu s otvorenou spätnoväzobnou slučkou

$$Z_0(s) = A_0(s) \frac{R_i R_f}{R_i + R_f} \quad (12.77)$$

kde $A_0(s)$ označuje frekvenčnú závislosť A_0

Vstupný odpor R_i má veľkú hodnotu

$$Z_0(s) = A_0(s) R_f \quad (12.78)$$

$A_0(s)$ má dva póly:

- ✓ Jeden spojený so vstupnou časovou konštantou τ_i
- ✓ Druhý spojený s časovou konštantou záťaže stupňa so spoločným emitorom τ_c
- ✓ Ak predpokladáme, že $\tau_i \gg \tau_c$ (t.j. vstupný pól je dominantný)

$$A_0(s) = \frac{A_0}{(1 + s\tau_i)} \quad (12.79)$$

kde

$$A_0 = -g_{m1} R_c \quad (12.80)$$

a

$$\tau_i = R_f (C_d + C_s + C_f + C_{\pi 1} + (1 - A_0) C_{c1}) \quad (12.81)$$

$Z_0(s)$ a $Z_f(s)$ možno zapísať v tvare

$$Z_0(s) = \frac{A_0 R_f}{1 + st_i} \quad (12.82)$$

$$Z_f(s) = \frac{R_f}{1 + st_f} \quad (12.83)$$

Potom vzťah (12.76) možno zapísať v tvare

$$\frac{1}{Z_c(s)} = \frac{(1 + st_i)}{A_0 R_f} - \frac{(1 + st_f)}{R_f} \quad (12.84)$$

a po úprave

$$Z_c(s) = \frac{A_0 R_{ef}}{1 + sR_{eff} \left(C_d + C_s + C_{p1} + (1 - A_0)(C_{c1} + C_f) \right)} \quad (12.85)$$

kde

$$R_{ef} = \frac{R_f}{1 - A_0} \quad (12.86)$$

Ak hodnota A_0 je dosť veľká, potom vzťah (12.85) sa zjednoduší na tvar

$$Z_c(s) = \frac{R_f}{1 + sR_f (C_{c1} + C_f)} \quad (12.87)$$

čo je transimpedancia ideálneho zosilňovača. V praxi sa táto podmienka ťažko dosahuje. Je to preto, lebo veľký napäťový zisk môže spôsobiť nestabilitu predzosilňovača.

Vzťah (12.87) možno získať tiež **priamo použitím Millerovej teóremy** na spätnoväzobnú slučku. Pripomeňme však, že ak prijímač má dva dominantné póly v spätnoväzobnej slučke, t.j. t_c nie je $\ll t_i$, potom je **výhodnejšie použiť vyššie uvedenú dvojpólovú analýzu** $A_0(s)$ a teda použiť vzťah

$$A_0(s) = \frac{A_1}{(1 + st_i)} \times \frac{A_2}{(1 + st_c)} \quad (12.88)$$

Ak pre transimpedančný predzosilňovač použijeme na vstupe FET sú jeho šumové vlastnosti rovnaké, ako šumové vlastnosti predzosilňovača s PINFET modulom a pre výpočet šumu môžeme použiť vzťah (12.73), v ktorom R_b nahradíme R_f . Pre tranzistory BJT šumové zdroje sú: výstrelový šum bázového prúdu $2eI_b$, tepelný šum bázového odporu $4kTr_{bb'}$ a výstrelový šum kolektorového prúdu $2eI_c$.

Ekvivalentná stredná kvadratická hodnota šumového prúdu na vstupe digitálneho prijímača

(12.89)

$$\langle i_n^2 \rangle_c = \frac{4kTI_2B}{R_f} + 2eI_bI_2B + \frac{2eI_{c1}}{g_{m1}} \left\{ \frac{I_2B}{R_f^2} + (2pC_T)^2 I_3B^3 \right\} +$$

$$4kTr_{bb'} \left\{ \frac{I_2B}{R_f^2} + (2pC_1)^2 I_3B^3 \right\}$$

Ak je hodnota R_f veľmi veľká, potom vzťah (12.89) možno zjednodušiť

$$\langle i_n^2 \rangle_c = 2eI_b I_2 B + \frac{2eI_c}{g_{m1}} (2pC_T)^2 I_3 B^3 + 4kTr_{bb'} (2pC_1)^2 I_3 B^3 \quad (12.90)$$

ktorý určuje minimálny šum digitálneho prijímača s BJT transimpedančným predzosilňovačom alebo integrujúcim predzosilňovačom (t.j. predzosilňovačom s veľkým vstupným odporom)

Ak tento vzťah porovnáme so zodpovedajúcim vzťahom (12.31) pre PINFET modul vidíme, že v tomto vzťahu sú dva ďalšie šumové členy:

- ✓ člen zodpovedajúci šumu I_b
- ✓ člen zodpovedajúci šumu $r_{bb'}$

Tieto členy sú zanedbateľné len v tom prípade ak využijeme stupeň s veľkým ziskom a BJT s malou hodnotou odporu $r_{bb'}$.

Možno zvoliť optimálnu hodnotu kolektorového prúdu $I_{c,opt}$, ktorá minimalizuje celkový šum

$$I_{c,opt} = 2pV_T C_T b^{\frac{1}{2}} B (I_3 / I_2)^{\frac{1}{2}} \quad (12.91)$$

Podobne pre analógové prijímače je optimálna hodnota kolektorového prúdu určená vzťahom

$$I_{c,opt} = \frac{2p}{\sqrt{3}} V_T C_T b^{\frac{1}{2}} B_{eq} \quad (12.92)$$

Minimálny šum digitálneho prijímača s BJT na vstupe

$$\langle i_n^2 \rangle_{c,\min} = (8pkT) \left(C_T / b^{\frac{1}{2}} \right) \left(I_2 I_3 \right)^{\frac{1}{2}} B^2 + 4kT r_{bb'} (2pC_1)^2 I_3 B^3 \quad (12.93)$$

Porovnaním tohto vzťahu so zodpovedajúcim vzťahom (12.75) pre prijímač s PINFET modulom vidíme, že šumový príspevok $r_{bb'}$ je nepodstatný a že šum prijímača s BJT na vstupe rastie priamoúmerne s druhou mocninou prenosovej rýchlosti na rozdiel od prijímača s PINFET modulom, kde šum rastie priamoúmerne s treťou mocninou prenosovej rýchlosti.

Teda hoci prijímač s PINFET modulom môže byť omnoho citlivejší ako prijímač s BJT na vstupe pre malé prenosové rýchlosti, pri väčších prenosových rýchlostiach je prijímač s BJT na vstupe omnoho citlivejší.

Bod obratu tejto závislosti je určený parametrami f_T , β a $r_{bb'}$ použitého mikrovlnového BJT tranzistora.