

Optické komunikácie

Optické komunikácie voľným prostredím

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

11.1 ZÁKLADNÉ SYSTÉMOVÉ POŽIADAVKY

Pod optickou komunikáciou voľným prostredím

FSO – Free Space Optic **WO – Wireless Optics**

vo všeobecnosti rozumieme spojenie medzi užívateľmi prostredníctvom **vhodného voľného optického prostredia:**

- n Zemská atmosféra: vonkajšie, vnútorné prostredie
- n Podmorské prostredie
- n Prostredie medziplanetárne a pod.

Kvalitu prenosu v takýchto prostrediach silne ovplyvňujú optické vlastnosti prostredia, voľba pracovného okna ako aj iné vlastnosti

Pre zemskú atmosféru:

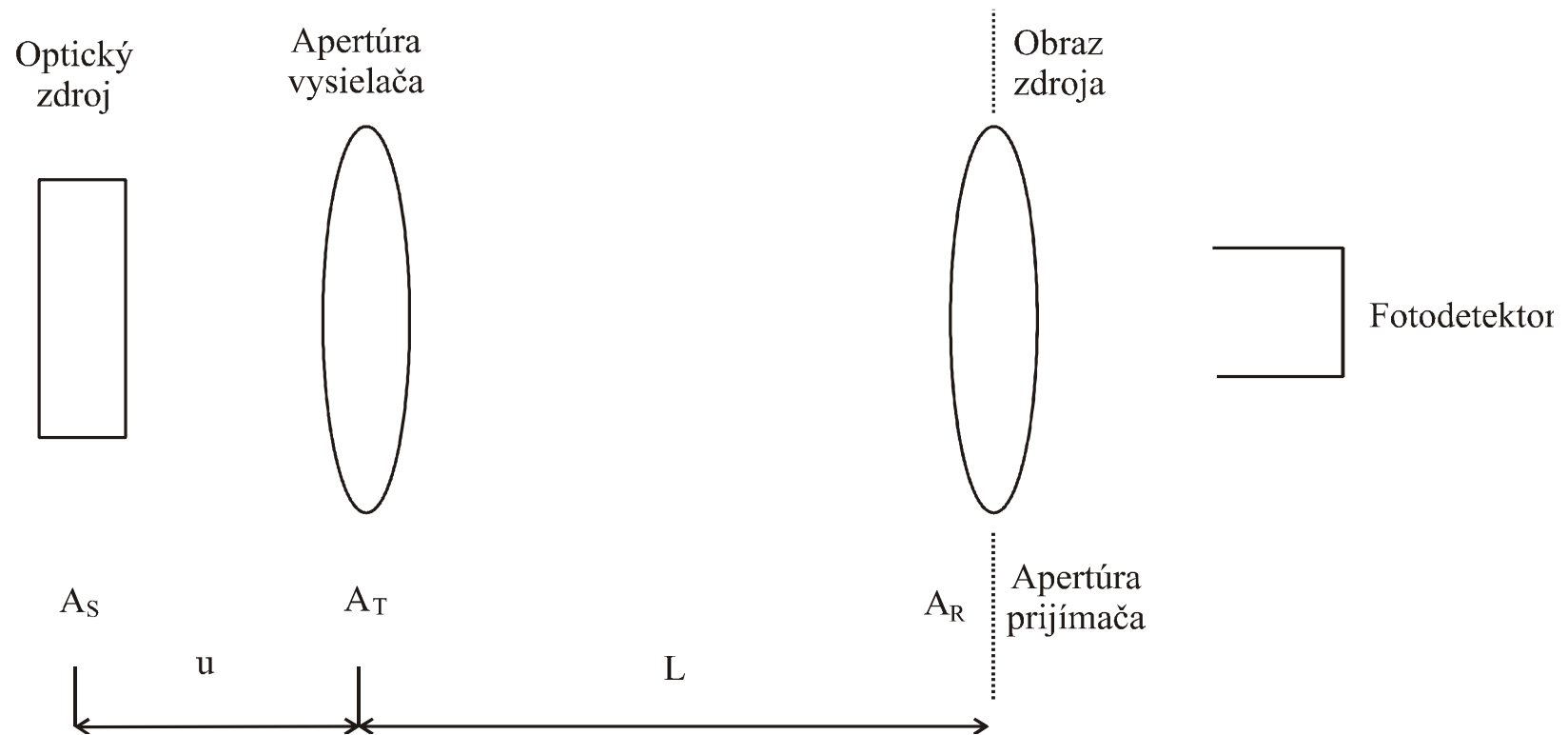
- n Podnebie
- n Poveternostné podmienky
- n Rušivé vplyvy z okolia (napr. znečistenie ovzdušia, činnosť človeka, prelet vtákov a pod.)

Základná schéma typického optického prenosového systému na komunikáciu voľným prostredím

Hlavné parametre systému sú:

- n A_S – apertúra zdroja optického signálu
- n A_T – apertúra vysielača – šošovky
- n A_R – apertúra prijímača
- n L – vzdialenosť prenosu optického signálu
- n A_{im} – obraz zdroja vo vzdialenosti L

PRENOSOVÉ PARAMETRE



Obr. 11.1 Schéma optického prenosového systému s prenosom voľným prostredím.

- n Zdroj signálu LD, LED s parametrami A_s , I_0 a uvažujeme podmienku: $L \gg f$, kde f je fokálna dĺžka šošovky

Z rovnice šošovky:

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{f} - \frac{1}{L} \approx \frac{1}{f} \quad (11.1)$$

- n **Vyjadríme obraz zdroja vo vzdialenosti L:**

$$A_{im} = \frac{A_s L^2}{u^2} \approx \frac{A_s L^2}{f^2} \quad (11.2)$$

Výkon vysielaný optickým vysielateľom je:

$$P_T = \frac{I_0 A_T}{u^2} \approx \frac{I_0 A_T}{f^2} \quad (11.3)$$

Prijímaný výkon je:

$$P_R = \frac{P_T A_R}{A_{im}} = P_T \left(\frac{A_R}{A_S} \right) \left(\frac{u^2}{L^2} \right) = P_T \left(\frac{A_R}{A_S} \right) \left(\frac{f^2}{L^2} \right) = \frac{I_0 A_T A_R}{A_S L^2} = \frac{\Phi A_T A_R}{L^2} \quad (11.4)$$

kde: • Φ je žiarivosť zdroja

$$\Phi = \frac{I_0}{A_S} \quad (11.5)$$

Ak poznáme parametre optických prvkov a citlivosť fotodetektora, možno vypočítať výkonové pomery FSO systému

Zdroj signálu LED so žiarivosťou $\Phi = 0,1 \text{ W mm}^2\text{sr}$) a apertúrami

$A_R = A_T = 10^{-3} \text{ m}^2$ (pre $d = 35 \text{ mm}$), kde vzdialenosť prenosovej trasy je $L = 1 \text{ km}$, potom sústredený výkon prijímača je

$$P_R = 10^{-7} \text{ W} = 100 \text{ nW.}$$

Pri rozmerovo malých zdrojoch uvažujeme aj difrakciu optického signálu

Potom obraz zdroja určíme z nerovnosti:

$$d_{im} = L \frac{d_S}{u} < \frac{1.22Ll}{d_T} \quad (11.6)$$

kde: • d_S je rozmer zdroja

$$d_S < \frac{1.22l u}{d_T} = \frac{1.22l f}{d_T} \quad (11.7)$$

a určíme celkový prijatý výkon:

$$P_R = \left(\frac{P_T A_T}{l^2} \right) \left(\frac{A_R}{L^2} \right) = \frac{I_0 A_T^2 A_R}{l^2 u^2 L^2} = \frac{I_0 A_T^2 A_R}{l^2 f^2 L^2} \quad (11.8)$$

Kedy je systém s LED difrakčne ohraničený

Pre vlnovú dĺžku $\lambda = 1\mu\text{m}$, fokálnu dĺžku systému $f = 100\text{ mm}$ a pri rozmere zdroja $d_s < 3\mu\text{m}$ je hranovo emitujúca LED difrakčne obmedzená, ale plošne emitujúca dióda nie je

Pre laserové zdroje musíme použiť rozptyľovač lúča

Parametre laserového zdroja sú: 10 mW , $f = 10\text{ mm}$, $\lambda = 1\mu\text{m}$,
 $A_R = 10^{-3}\text{ m}^2$, $L = 10\text{ km}$

Sústredený prijatý výkon takého zdroja je: $P_R = 8\mu\text{W}$

V prípade, že divergencia lúča je $0,1$ miliradiánu, nastávajú problémy s presným riadeným a s mechanickou stabilitou prenosových vysieláčov

11.1.1 ANALÓGIA S ANTÉNOVOU TECHNIKOU

Uvažujme **gaussovský profil lúča** opísaný vo valcovej súradnicovej sústave so súradnicami (r, ϕ, z) . Potom profil výkonu na strane vysielača je:

$$P(r,0) = P_0 \exp \left\{ - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right\} \quad (11.9)$$

kde: • P_0 je výkon emitovaný zdrojom

Pri dodržaní podmienky vzdialenosti: $L \gg \pi r_0^2 / \lambda$ je rozloženie výkonu vo vzdialenosti L :

$$P(n,l) = \left(\frac{P r_0^2}{1L} \right) P_0 \exp \left\{ - \left(\frac{P r_0 r}{1L} \right)^2 \right\} \quad (11.10)$$

Pre kruhovú plochu apertúry prijímača:

$$A_R = p r_R^2 \quad (11.11)$$

Pri splnení podmienky:

$$r_R \ll \frac{1L}{p \cdot r_0} \quad (11.12)$$

Možno prijatý výkon zapísať v tvare:

$$P_R = \left(\frac{p r_0^2}{1L} \right)^2 P_0 A_R \quad (11.13)$$

Pre výkon vysielачa:

$$P_T = p r_0^2 P_0 \quad (11.14)$$

Dostaneme výkon prijímača určený pomocou výkonu vysielачa:

$$P_R = \frac{P_T p r_0^2 A_R}{(1L)^2} \quad (11.15)$$

kde: • r_0 je efektívna apertúra vysielачa

Podobne ako pre rádiový systém s anténou, straty vznikajúce rozšírením vlny v priestore určíme z nasledujúceho vzťahu:

$$D = \left(\frac{1}{4pL} \right)^2 \quad (11.16)$$

Zisky výkonov na vysielacej a prijímacej optickej anténe určíme zo vzťahov:

$$G_T = \frac{4p A_T}{1^2} \quad (11.17)$$

$$G_R = \frac{4pA_R}{l^2} \quad (11.18)$$

Pomer výkonov prijímača a vysielača:

$$\frac{P_R}{P_T} = DG_T G_R = \frac{A_T A_R}{L^2 l^2} \quad (11.19)$$

Napríklad:

Pri prenose s danými parametrami: $\lambda = 1 \mu\text{m}$

$L = 10 \text{ km}$

s apertúrami: $A_R = 10^{-3} \text{ m}^2$

$A_T = (\pi / 4) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

pri daných stratách: $D = 222 \text{ dB}$

a výkonových ziskoch: $G_T = 90 \text{ dB}$

$G_R = 101 \text{ dB}$

Je pomer výkonov - 222 + 90 + 101 = 31 dB

11.2 ATMOSFERICKÉ PRENOSOVÉ PROSTREDIE

Optickým spojom voľným prostredím (FSO - Free Space Optic)

sa rozumie plne duplexný spoj, ktorý k prenosu informácie v **Atmosférickom Prenosovom Prostredí (APP)**

Využíva:

- q Optickú nosnú vlnu
 - q Jeden alebo viac vlnovo delených kanálov
 - q Optický výkon je sústredený do jedného alebo viacerých úzkych zväzkov
 - q Prenos signálu s digitálnou intenzitnou moduláciou
- q Optické spoje sú prevádzkované v uzavretej miestnosti - **WO**, vo voľnom ovzduší (troposfére) alebo v kozmickom priestore – **FSO**, pri prenose využívajúcom len viditeľné svetlo sa používa označenie – **VLC (Visible Light Communication)**

APP:

- ✓ Veľký vplyv na kvalitu prenosu
- ✓ Prostredie všeobecne nestacionárne a nehomogénne
- ✓ Dielektrické, lineárne, nedisperzné, izotropne
- ✓ Vplyv na kvalitatívne parametre prenosového kanálu má náhodný charakter

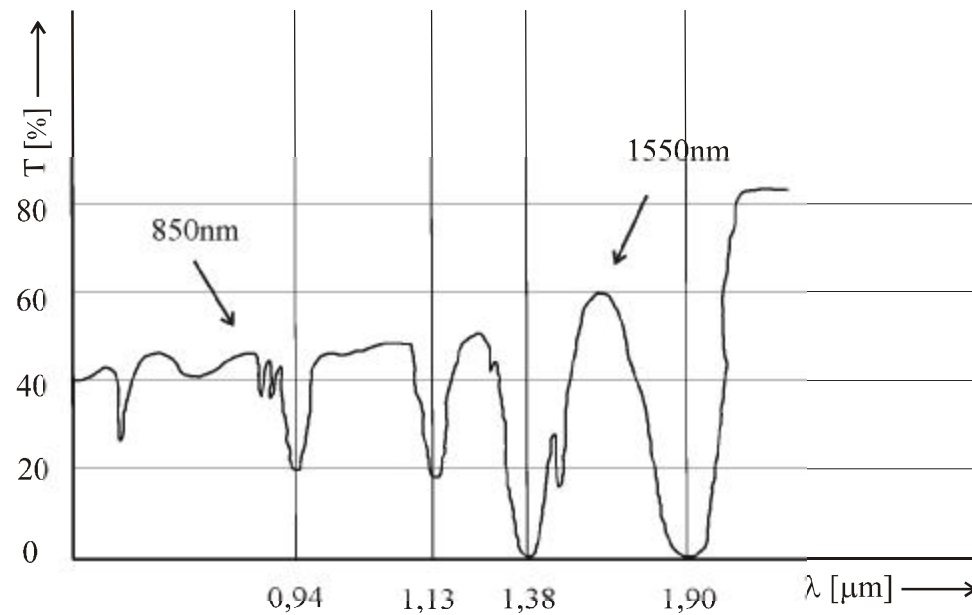
Modelovanie vplyvu APP na kvalitu prenosu FSO:

- ✓ Koeficient tlmenia α
- ✓ Index lomu prostredia n
- ✓ Závisia od súradníc priestoru, od času a od dĺžky optickej vlny
- ✓ Štatistický charakter koeficientu tlmenia je vyjadrený variáciou a strednou hodnotou
- ✓ Štatistický charakter indexu lomu sa **vyjadruje štruktúrnym parametrom indexu lomu a strednou hodnotou**

$$a = a(\mathbf{r}, t, l); \bar{a}; s_a^2 \quad (11.20)$$

$$n = n(\mathbf{r}, t, l), \bar{n}; C_n^2 \quad (11.21)$$

Spektrálna závislosť priepustnosti T čistej a kľudnej atmosféry
FSO pracuje obyčajne v oknách 850 nm a 1550 nm



Obr. 11.2 Spektrálna závislosť priepustnosti čistej a kľudnej atmosféry.

Tlmenie v APP možno určiť z Bouguerovho zákona:

$$dP(l) = -a(l)P(l)dz \quad (11.22)$$

$P(\lambda)$ je optický výkon

α je koeficient tlmenia v $[m^{-1}]$

Integráciou sa dostane:

$$P_2(l) = P_1(l) \exp[-a(l)\Delta z] \quad (11.23)$$

Spektrálna priepustnosť sa definuje vzťahom:

$$T_1(l) = \frac{P_2(l)}{P_1(l)} \quad (11.24)$$

Spektrálne stredná hodnota priepustnosti:

$$T \gg \frac{1}{l_2 - l_1} \int_{l_1}^{l_2} T_1(l) dl \gg \frac{1}{l_2 - l_1} \int_{l_1}^{l_2} \exp[-a(l)\Delta z] dl \quad (11.25)$$

Zemská atmosféra sa skladá z niekoľkých charakteristických vrstiev

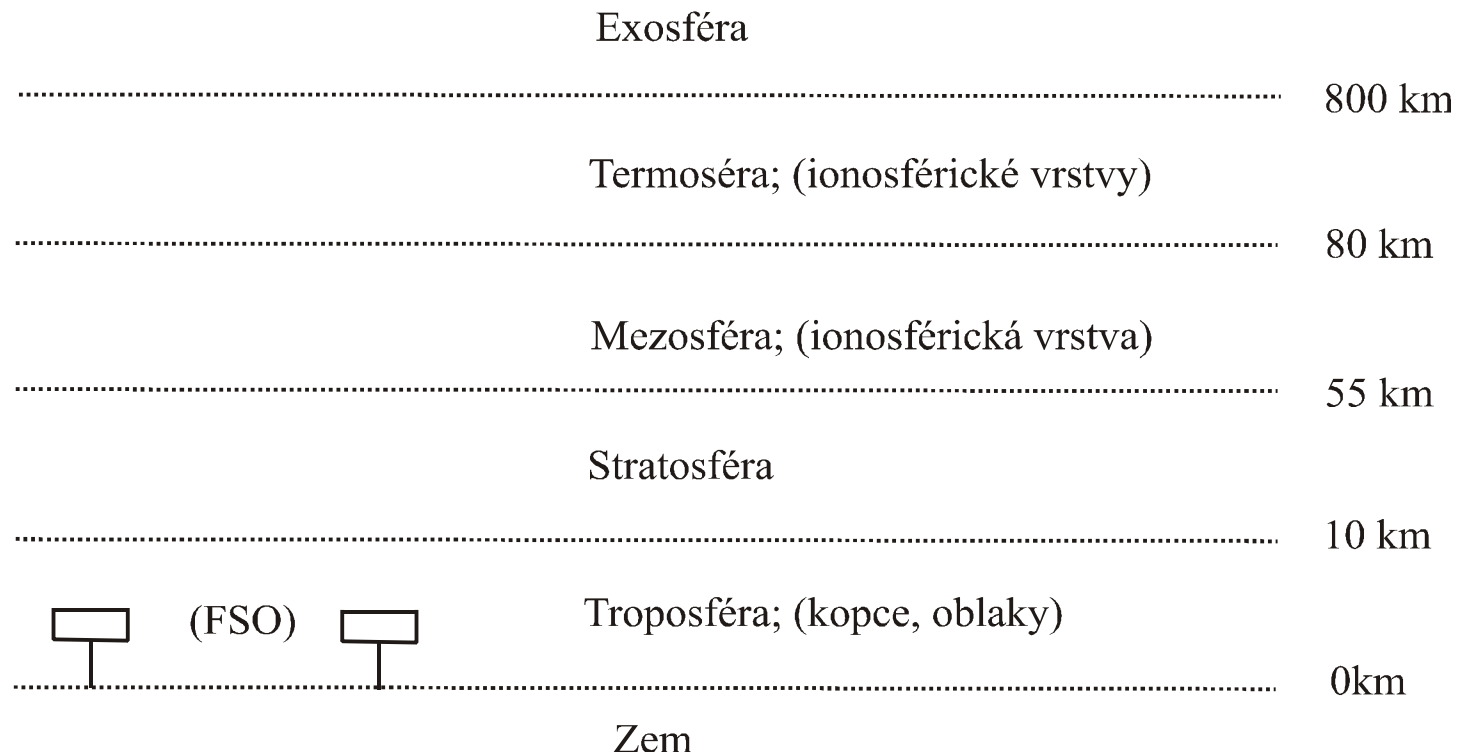
APP je súčasťou troposféry

- je charakteristická tým, že vodná para tu podlieha kondenzácii, tvoria sa oblaky, prejavuje sa hmla, dážď a sneh, vznikajú búrky, vietor a veterné víry (turbulencie)

- ✓ **Teplotný gradient alebo mechanické pôsobenie** (vietor, turbulencia) spôsobujú, že lokálna teplota a tlak ovzdušia sa mení v priestore a čase a dôsledkom toho je, že index lomu **APP** je náhodnou funkciou súradníc priestoru a času
- ✓ Optický zväzok prechádzajúci takýmto prostredím podlieha **energetickým i tvarovým zmenám**
- ✓ **Zmeny tvaru zväzku** (jeho rozšírenie alebo odklon) môžu vyvolať zmeny úrovne prijímaného optického výkonu

Hlavné javy:

- n Tlmenie optického výkonu vplyvom absorpcie alebo rozptylu na molekulách alebo aerosóloch
- n Tlmenie optického výkonu vplyvom turbulencie troposféry
- n Fluktuácia optického výkonu vplyvom turbulencie troposféry
- n Fluktuácia optického výkonu pôsobením hmly, dažďa alebo snehu
- n Fluktuácia optického výkonu vplyvom deformácie tvaru zväzku
- n Prerušenie zväzku letiacim vtákom



Obr. 11.3 Atmosférické vrstvy so znázornením zemského povrchu a oblasťou práce FSO.

Uvedené javy pôsobia spoločne:

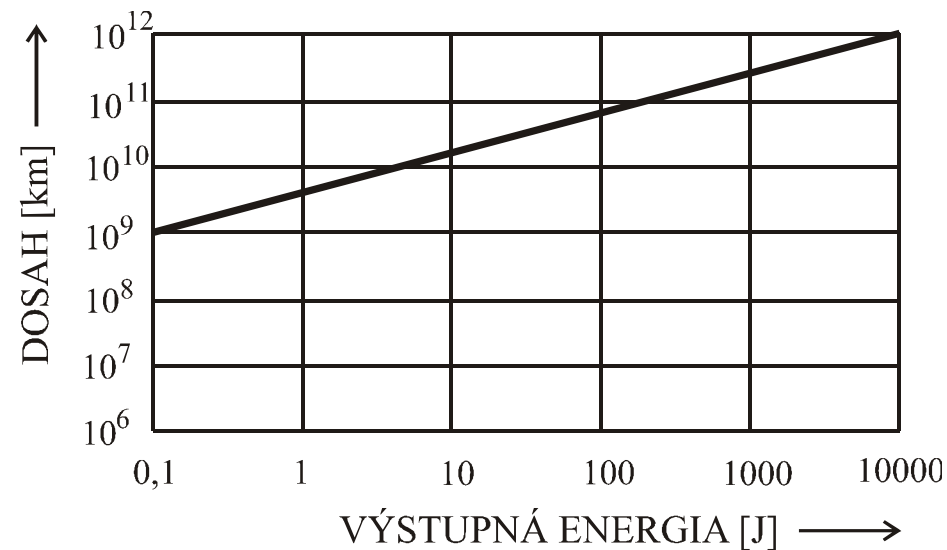
- ✓ Útlm optického výkonu
- ✓ Turbulencia optickej intenzity
- ✓ Prerušovanie zväzku

Mimo zemskú atmosféru (v kozmických spojoch) môže byť komunikačný kanál tvorený voľným prostredím (**vákuom**):

- q Laserový lúč možno získať s malou uhlovou divergenciou (~ niekoľko minút)
- q Rozšírenie zväzku lúčov je len asi 5 mm na dĺžku lúča 1 km
- q Neprichádza do úvahy pohlcovanie a rozptyľovanie optického žiarenia
- q **Možno získať obrovský dosah optických spojov**

Výpočty napr. ukazujú, že žiarenie emitované laserom s energiou impulzu 50 J, pri uhle rozbiehavosti lúča $\sim 1''$, môže byť detekované vo vzdialenosti 50 miliárd km (čo zodpovedá dvom svetelným dňom) pri použití spojnej šošovky s priemerom iba 7,5 cm

Lasery v kozmickom priestore sú **mimoriadne užitočné** pri spojoch superďalekého dosahu, pri telemetrii a diaľkovom riadení, najmä v prípadoch ďalekých kozmických letov



Obr. 11.4 Dosah optického spoja vo vákuu.

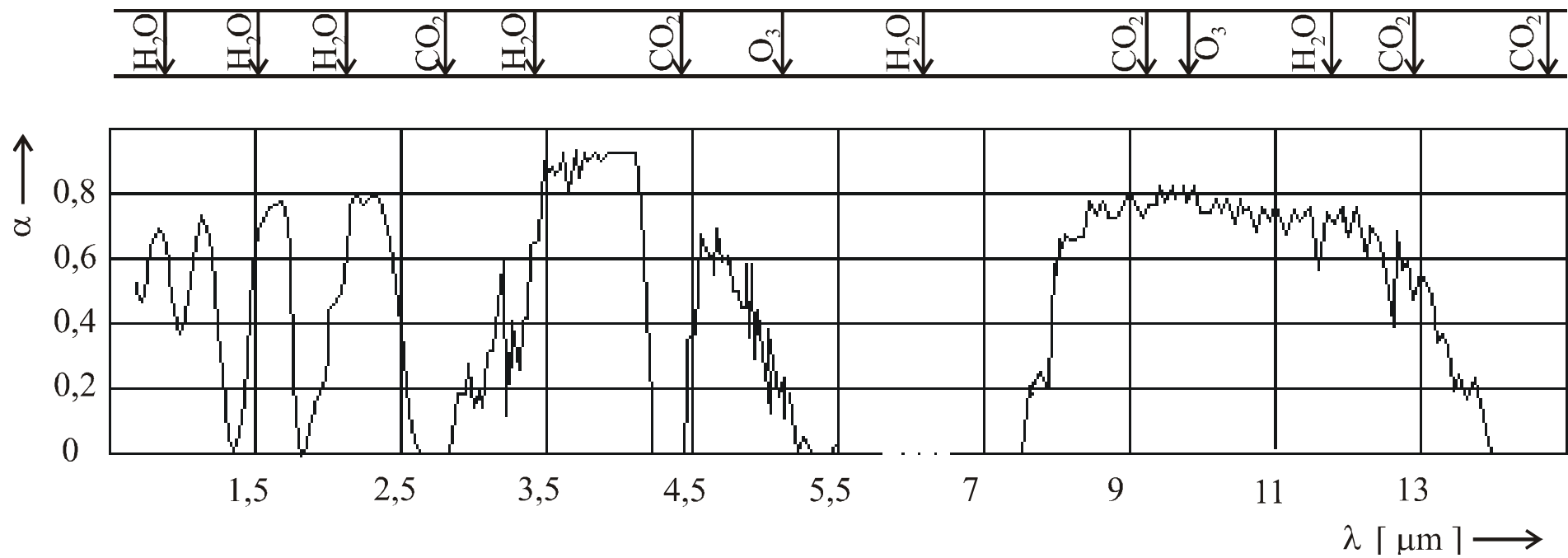
Komunikácia pomocou laserového žiarenia v pozemských podmienkach (v atmosfére) je obmedzená:

- ✓ Dosahom bezprostrednej viditeľnosti (horizontom)
- ✓ Je veľmi sťažená v dôsledku absorpcie a rozptyľovania svetla v atmosfére
- ✓ Vplyvom poveternostných podmienok (hmly, snehu, dažďa a pod.)
- ✓ Znečistenia atmosféry (dymu, prachu, rôznych plynov a pod.)
- ✓ Vzdušných výrov (turbulencií), vlnenia teplého vzduchu

Optické žiarenie za prítomnosti atmosféry **silne tlmené**

$$a = a_a + a_R + a_M + a_f \quad (11.26)$$

- a_a absorpcia na molekulách
 a_R rozptyl na molekulách (**Rayleighov rozptyl**)
 a_M rozptyl na časticiach (**Mieov rozptyl**)
 a_f stredné zoslabenie výkonu vplyvom fluktuácií



Obr. 11.5 Tlmenie optického žiarenia vo vzduchu.

q **Molekulárna absorpcia:**

- ✓ Prítomnosťou pár H_2O , CO_2 a ozónu (O_3)
- ✓ Tlmenie ~ 1 až 10 dB/km
- ✓ V ďalekej infračervenej oblasti (pre λ ~ 25 až 100 μm) je tlmenie omnoho väčšie ~ 100 až 1000 dB/km

q **Rayleighov rozptyl** - spôsobený nehomogenitami (rozptylovými centrami), ktorých rozmery sú menšie ako vlnová dĺžka prenášaného optického žiarenia

- ✓ Vždy prítomný pri prenose optického žiarenia ľubovoľným prostredím
- ✓ Úmerné $1/\lambda^4$
- ✓ Možno ho podstatne redukovať zvolením najväčšej možnej pracovnej vlnovej dĺžky

q **Mieho rozptyl** - vzniká na nehomogenitách, ktorých rozmery sú porovnateľné, alebo väčšie ako vlnová dĺžka prenášaného optického žiarenia

- ✓ V zemskej atmosfére sú spôsobené najmä znečistením ovzdušia (dym, prach a pod.)

- ✓ **Silná hmla** - tlmenie od 100 do 300 dB/km
- ✓ **Mierná hmla** - tlmenie od 3 do 20 dB/km
- ✓ **V daždi** - tlmenie od 3 do 20 dB/km
- ✓ **Pri snežení** - tlmenie až 30 dB/km

- ✓ **Turbulencia atmosféry** mení nepravidelne index lomu prostredia
 - ✓ Závisí od pomeru: priemeru optického lúča k priestorovej perióde zmien indexu lomu
 - ✓ Priemer optického lúča omnoho menší ako perióda zmien indexu lomu, odkloní sa lúč ako celok
 - ✓ V opačnom prípade nastane rozptyl
 - ✓ Vzhľadom na malý priemer laserových lúčov väčšinou nastáva rozptyl

Meteorologická viditeľnosť:

Definovaná ako vzdialenosť, pri ktorej priepustnosť nadobúda hodnotu $T = 2\%$ (pri $\lambda = 555\text{ nm}$). Odvodenie vzťahu medzi meteorologickou viditeľnosťou a koeficientom tlmenia:

Platí: $\frac{P_2}{P_1} = T = e^{-a\Delta z}$, pričom $\Delta z = V_M$ a $P_2 = 0,02P_1$.

Preto $0,02 = e^{-aV_M}$, $\ln 0,02 = -aV_M$ a

$$a = \frac{3.91}{V_M}; \quad (l = 555\text{ nm}) \quad (11.27)$$

Všeobecne pre vlnovú dĺžku λ platí:

$$a(l) \gg \frac{3.91}{V_M \left(\frac{555}{l}\right)^q}; \quad [km^{-1}; km, nm] \quad (11.28)$$

kde $q = 0,585V_M^{\frac{1}{3}}$; pre $V_M \leq 6$ km.

Napr. pre $V_M = 2$ km je $q = 1,26$ a ak je $\lambda = 1000$ nm, je $a = \frac{1,84}{V_M}$

Útlm optického výkonu v APP je možné vyjadriť v decibeloch:

$$a_{dB} = -\frac{1}{L_{APP}} 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (11.29)$$

z čoho:

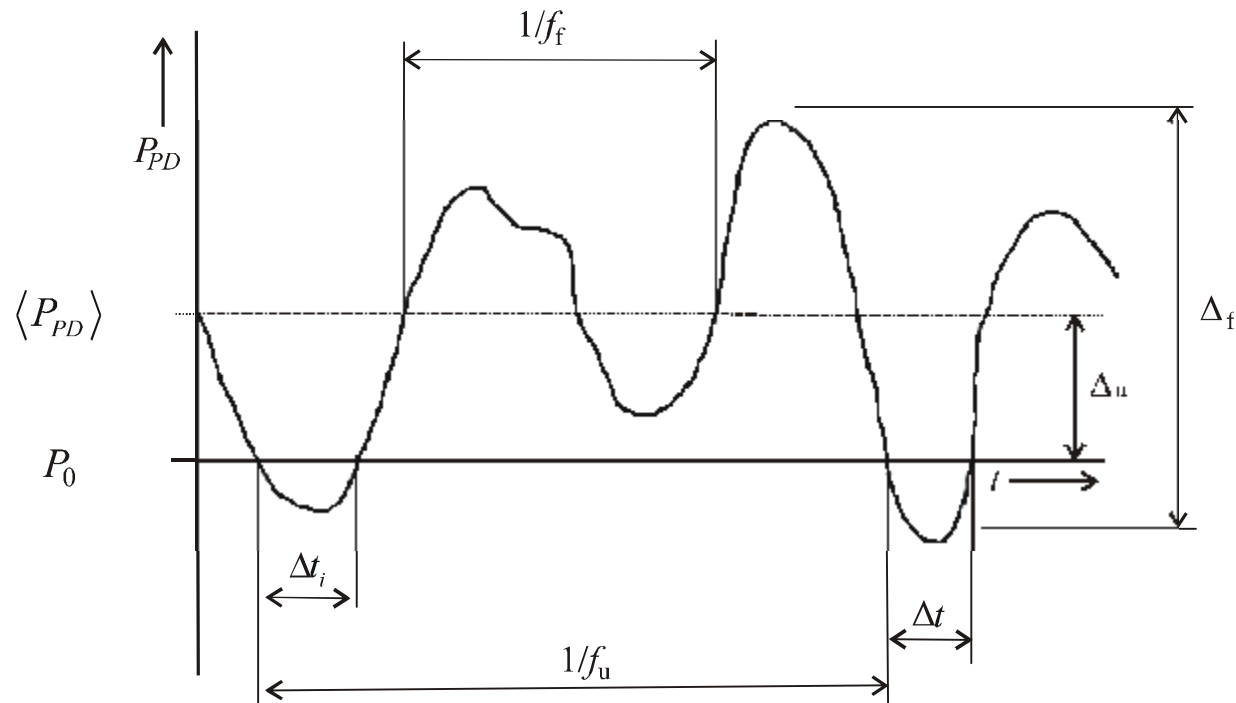
$$a [km^{-1}] = 0.23 a_{dB} [dB / km] \quad (11.30)$$

Stavy APP.

V_M [km]	α [km ⁻¹]	Stav atmosféry
Viac ako 63	Menej ako 0,062	Veľmi čistá
63 až 26	0,062 až 0,15	Čistá
26 až 1,3	0,15 až 3,07	Opar
1,3 až 0,06	3,07 až 61,1	Hmla
Menej ako 0,06	Viac ako 61,1	Silná hmla

Jav turbulencie v APP:

- q Prejavuje sa najmä **fluktuáciou** prijímaného optického výkonu
- q Fluktuácie majú rôznu frekvenciu a amplitúdu
- q Teplotné turbulencie troposféry môžu vyvolať zmeny prijímaného výkonu s frekvenciou rádovo stovky Hz
- q Ostatné činitele (nástup hmly, odklon zväzku) pôsobia s typickými časovými periódami zmien 20 min. alebo až 24 hod
- q Uvedené zmeny môžu vyvolať pokles prijímaného výkonu pod stanovenú minimálnu úroveň (citlivosť prijímača)
- q V takom prípade sa jedná o tzv. **únik**



Obr. 11.6 **Parametre únikov:** (P_{PD} – optický výkon na fotodióde prijímača, P_0 – citlivosť prijímača, f_f – frekvencia fluktuácií, f_u – frekvencia únikov, D_f – dynamika fluktuácií, D_u – hĺbka únikov, t – čas, D_{ti} – časové intervaly, keď úroveň optického výkonu na fotodióde bola menšia než požadovaná).

Relatívny časový interval (percento času) [%], počas ktorého došlo k únikom:

$$p = \frac{\sum_i \Delta t_i}{t} 100 \quad (11.31)$$

kde t je celkový časový interval merania (obyčajne jeden rok)

Pomalé zmeny prijímaného výkonu vyvolané hmlou **nemožno vyjadriť analyticky**. Vyhodnotenie takého procesu sa robí **empíricky**. **Analytický model existuje** iba pre rýchle fluktuácie vyvolané dažďom, snehom alebo vzdušnou turbulenciou.

Pre modelovanie vzdušných turbulencií sa používa nasledujúci postup:

V atmosfére sa predpokladá existencia vzdušných vírov (nehomogénny index lomu) v tvare gulí o priemere l . Vlastnosti atmosféry dovoľujú len určité rozmery vzdušných vírov (rádovo od mm do km). V takejto atmosfére platí **Kolmogorov zákon** dvoch tretín:

$$\left\langle [n(A,t) - n(B,t)]^2 \right\rangle_{\text{čas}} = C_n^2 r^{\frac{2}{3}} \quad (11.32)$$

kde výraz na ľavej strane sa nazýva: štruktúrna funkcia indexu lomu; A, B sú body priestoru; t je čas; p je vzdialenosť bodov A, B ; C_n^2 je štruktúrny parameter indexu lomu [$\text{m}^{-2/3}$]

Náhodné nehomogenity indexu lomu vyvolávajú fluktuácie fázy a amplitúdy prechádzajúcej vlny. S predpokladom homogenity a stacionarity **APP** možno pre **relatívnu disperziu optickej intenzity** odvodiť výraz:

$$S_{I,rel}^2 = KC_n^2 k^6 L^6 \quad (11.33)$$

kde K je konštanta:

$K = 1,23$ (pre rovinnú vlnu), $K = 0,50$ (pre guľovú vlnu),

k je vlnové číslo a L je dĺžka trasy optického zväzku v APP

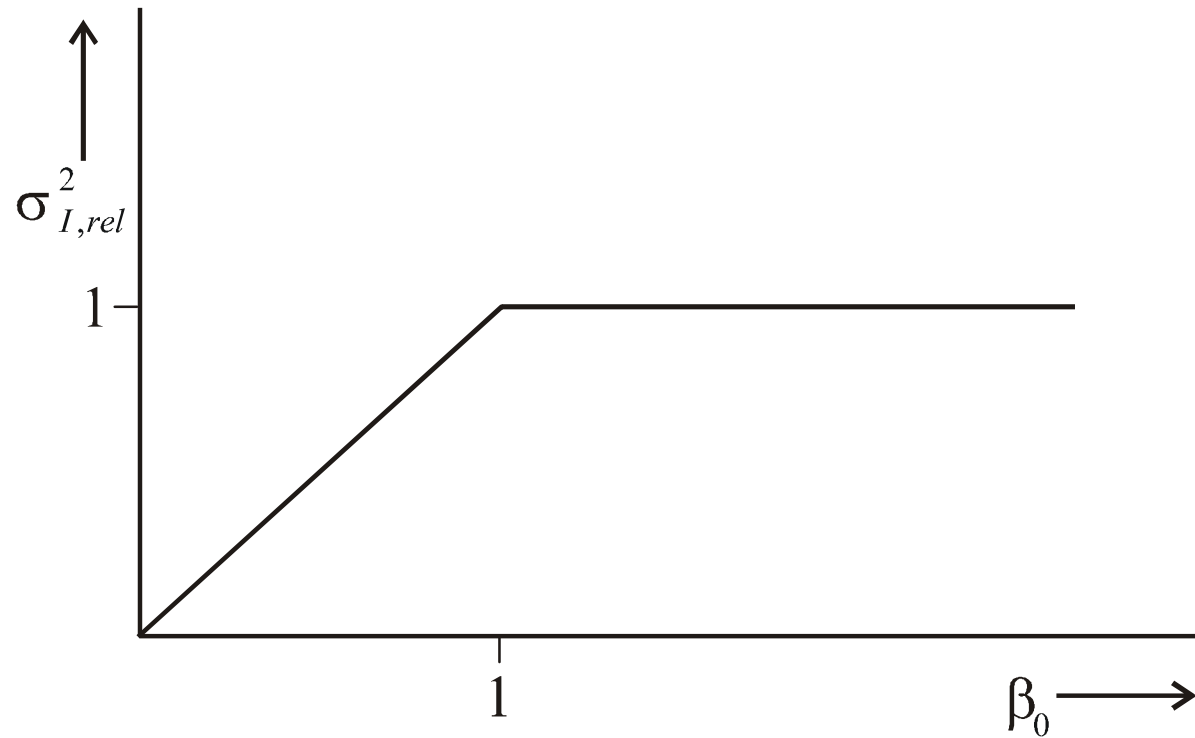
Relatívna disperzia optickej intenzity

$$S_{P,rel}^2 = \frac{\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2}{\langle P \rangle^2}$$

kde I je optická intenzita

Pre $S_{P,rel}^2 \rightarrow 1$

dochádza k javu nasýtenia a relatívna disperzia optického výkonu ďalej nerastie



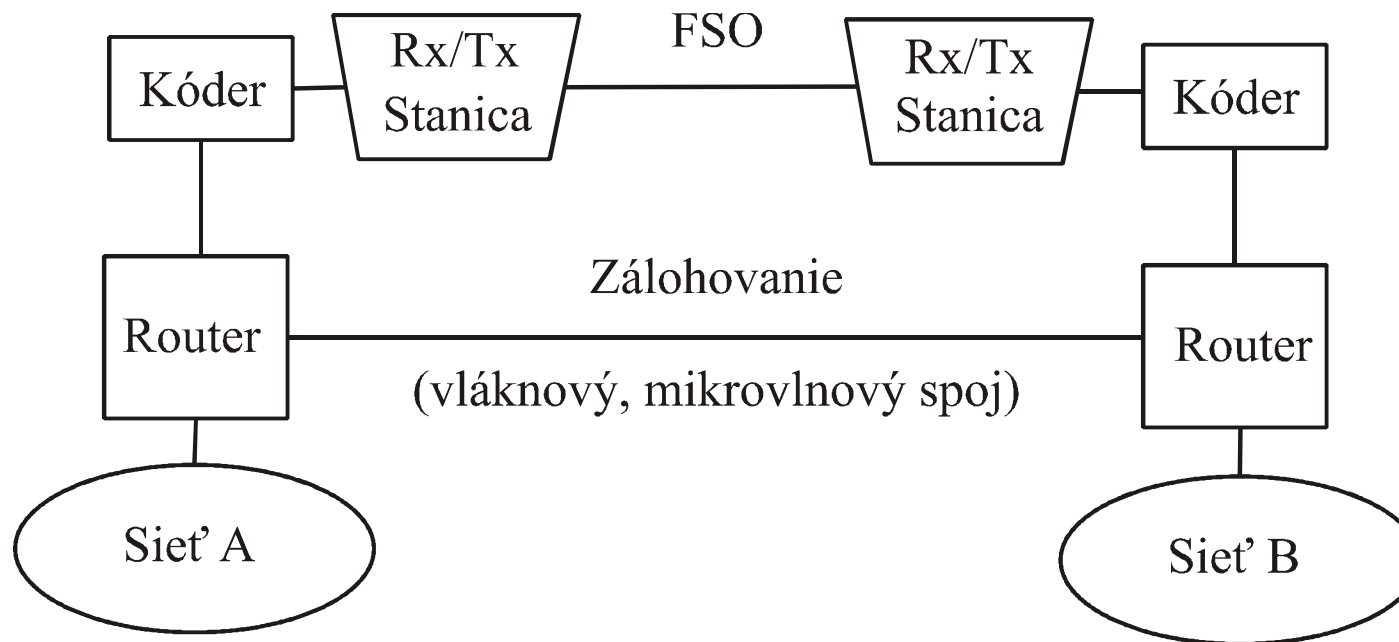
Obr. 11.7 Závislosť relatívnej disperzie optického výkonu od parametra .

Stavy APP podľa miery turbulencie

$C_n^2 [m^{-2/3}]$	Miera turbulencie
10^{-16}	Slabá
10^{-15}	Stredná
10^{-14}	Silná

11.3 BLOKOVÁ SCHÉMA SPOJA FSO

- n **FSO** sa skladá z **dvoch staníc** komunikujúcich medzi sebou **duplexným spôsobom**
- n Každá stanica je **pripojená (duplexne) k osobnému počítaču, serveru alebo ústredni**
- n **Stanice sú vybavené:**
 - § **Vysielacím a prijímacím systémom (Tx a Rx)** pre komunikáciu medzi sebou v **APP**
 - § **Vysielacím a prijímacím systémom** pre komunikáciu medzi stanicou a najbližším **sieťovým počítačom**
 - § Táto komunikácia sa uskutočňuje v **optickom vlákne** (alebo metalickom kábli), alebo mikrovlnným spojom
- n **Kóder** je zariadenie pre kódovanie a dekódovanie signálu
- n **Router** je smerovač, ktorým sa volí optimálna cesta signálu
- n **Zálohovanie spoja** uskutočnené optickým vlákňovým, alebo mikrovlnným spojom



Obr. 11.8 Zariadenie FSO do komunikačnej siete.

Delenie FSO podľa dosahu

Dosah	Vzdialenosť staníc
Veľmi krátky	(0 - 10) m
Krátky	(10 - 100) m
Stredný	(100 - 1000) m

Podľa druhu prenášaného signálu:

- n Analógové spoje
- n Digitálne spoje

Podľa spôsobu prenosu:

- n Spoje koherentné
- n Spoje nekoherentné

Najčastejšie: digitálne duplexné nekoherentné FSO v troposfére s intenzitnou moduláciou (**IM/On-Off Keying, OOK**) a priamou detekciou (**DD**), t.j. **IM-DD systémy**

Tab. 11.4 **Delenie FSO** podľa prenosovej rýchlosti.

Rýchlosť	Prenosová rýchlosť
Malá	Menšia ako 1 Mbit/s
Stredná	(1 - 10) Mbit/s
Veľká	Väčšia ako 10 Mbit/s

Vysielač systém Tx FSO:

- n Tvaruje vyžarovaný optický zväzok
- n Zabezpečuje jeho moduláciu

Hlavné bloky Tx:

Modulátor, budič optického zdroja, laserová dióda (LD), zameriavací systém, elektronický blok zameriavacieho systému a **vysielacia optická sústava – TOA (Transmitter Optical Antena)**, tzv. **optická anténa**

- ✓ Priestorové tvarovanie optického zväzku vystupujúceho z LD zabezpečuje vysielacia optická sústava
- ✓ Zväzok prechádza optickým priezorom **-TOF (Transmitter Optical Filter)**
 - ✓ Ochrana proti nečistotám prítomným v atmosfére
 - ✓ Nesmie vyvolať deformáciu zväzku
 - ✓ Nadmerný útlm
- ✓ Smerovací systém ovládaný mechanicky alebo elektronicky
- ✓ K hrubému nastaveniu smeru slúži ďalekohľad

- ✓ Pre FSO nie je nutné prevádzať kruhovú symetrizáciu zväzku
- ✓ Pri výkonovej bilancii sa priraduje pôvodnému zväzku tzv. **výkonovo ekvivalentný zväzok** definovaný ako symetrický **Gaussov zväzok**, ktorý má na osi zväzku rovnakú hustotu výkonu ako pôvodný zväzok a v jeho kruhovej stope je obsiahnutý rovnaký výkon ako v eliptickej stope pôvodného zväzku

n Prijímací systém (Rx)

- n Prijímacia optická anténa - **ROA (Receiver Optical Antena)**
- n Sústreďuje prijatý optický zväzok na aktívnu plochu fotodiódy (PD)

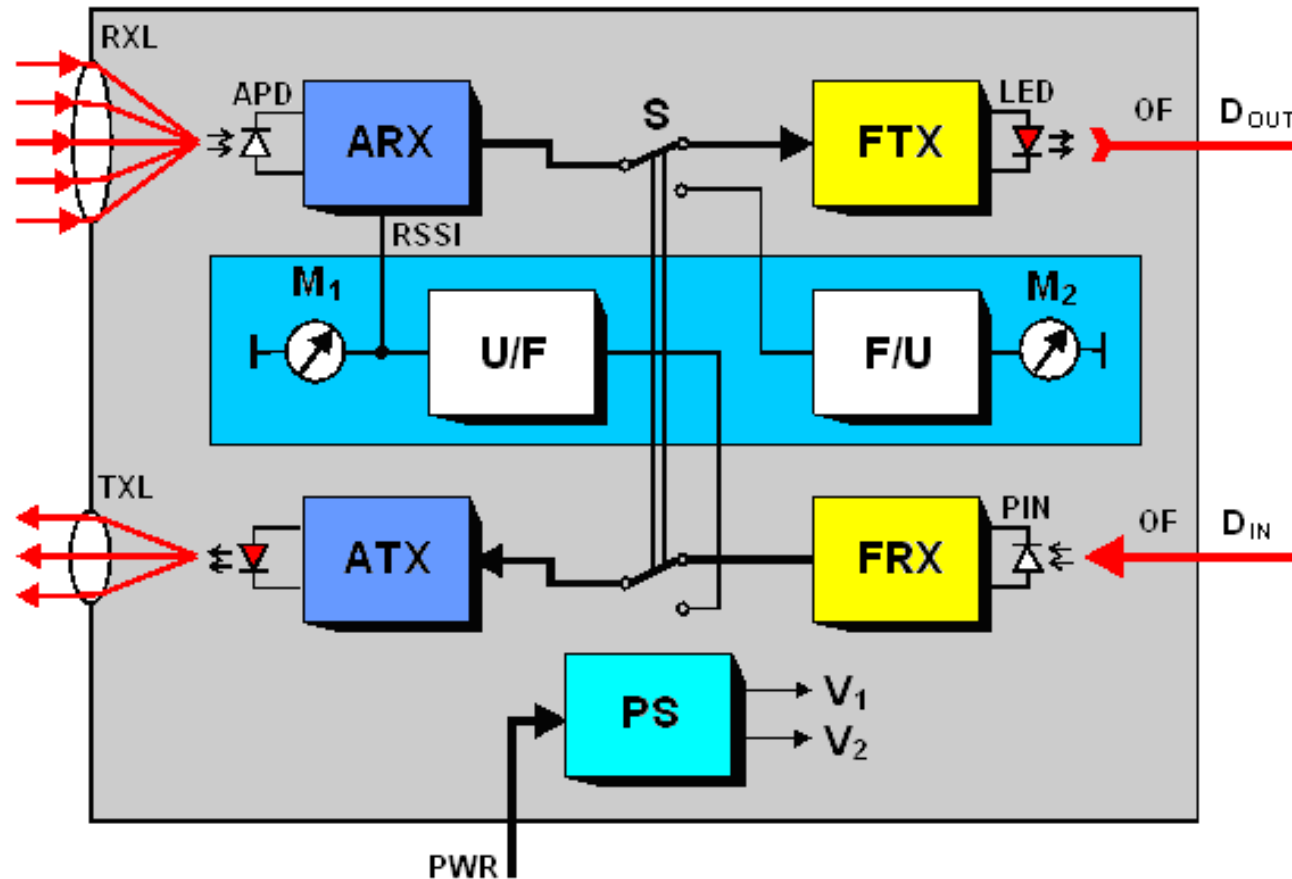
Hlavné bloky Rx:

Prijímacia optická sústava (ROA), fotodióda (PD) - PIN alebo APD (možno použiť fototranzistor alebo aj fotonásobič), predzosilňovač a demodulátor

- n Zväzok dopadajúci na Rx prechádza optickým priezorom **-ROF (Receiver Optical Filter)**
- n Smerovanie optickej osi Rx zabezpečuje zameriavací systém ovládaný mechanicky alebo elektronicky
- n Súčasťou zameriavacieho zariadenia je ďalekohľad pevne spojený s Rx
- n Na zmenšenie vplyvu žiarenia pozadia je v Rx použitý **interferenčný filter** navrhnutý s ohľadom na pracovnú vlnovú dĺžku FSO

11.3.1 ZAPOJENIE STANICE FSO

- ✓ **Funkčné bloky stanice FSO zabezpečujú:**
 - ✓ Opto – elektrický a elektro – optický prevod
 - ✓ Zosilnenie a tvarovanie dátového signálu
 - ✓ Riadenie činnosti stanice
 - ✓ Zameranie stanice
 - ✓ Monitorovanie činnosti spoja



Obr. 11.9 Bloková schéma FSO stanice.

Najdôležitejšie parametre FSO:

- ✓ Maximálna prenosová rýchlosť
- ✓ Dosah spoja
- ✓ Výkonová rezerva určená pre obmedzenie vplyvom počasia

Dosah spoja:

- q Daný citlivosťou prijímača ARX
- q Veľkosťou plochy a kvalitou vyhotovenia prijímacej optickej antény RXL
- q Výkonom vysielača ATX
- q Divergenciou optického zväzku vytvoreného optickou sústavou TXL
- q Odolnosť voči poveternostným vplyvom je určená dynamickým rozsahom prijímača

11.3.2 OPTICKÝ PRIJÍMAČ

Optický prijímač pre moduláciu OOK

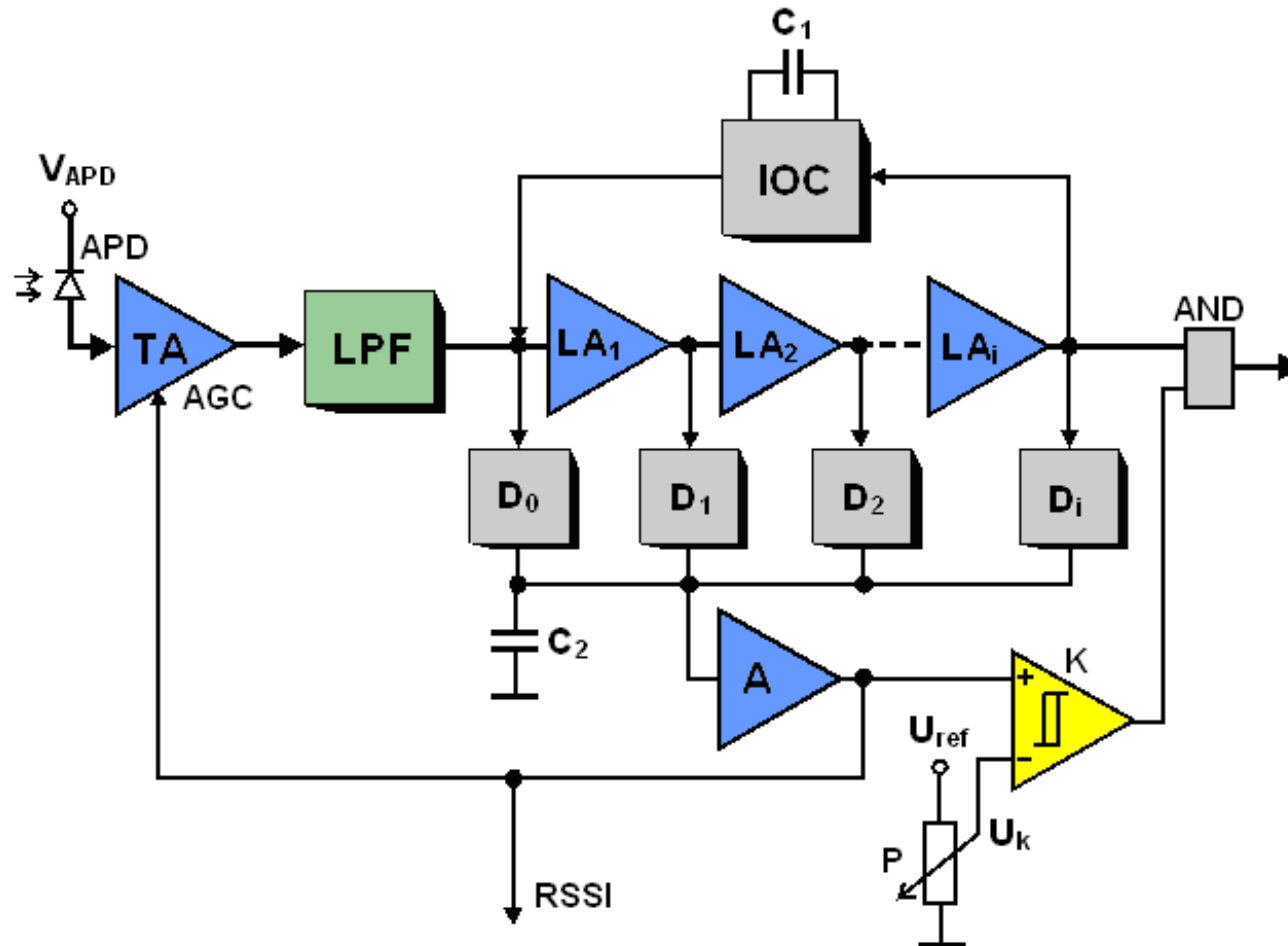
Lavínová fotodióda - APD, resp. PIN fotodióda

Fotoprúd tečúci do vstupu transimpedančného zosilňovača TA

Napätie výstupu je filtrované dolnou priepusťou s medznou frekvenciou:

$$F_V = (0.6 \div 0.8) \times v_D \quad (11.34)$$

kde v_D je rýchlosť dátového toku v b/s



Obr. 11.10 Bloková schéma optického prijímača pre moduláciu OOK

- q Niekoľko kaskádne radených jednosmerných viazaných obmedzujúcich zosilňovačov LA_1 až LA_i
- q Realizujú zosilnenie na úrovni 60 – 70 dB
- q Vzhľadom na veľký zisk na výstupe LA_i je potreba kompenzovať napätový ofset predovšetkým prvého stupňa LA_1 bloku IOC
- q Napätie na výstupe **RSSI** zodpovedajúce úrovni dopadajúcemu optickému výkonu je získané pomocou detektorov D_0 až D_i a zosilňovača **A**
- q Váhovaním jednotlivých prúdov je možné získať rôzne závislosti signálu **RSSI** od veľkosti dopadajúceho výkonu
- q Keď je zosilnenie všetkých blokov LA_1 až LA_i rovnaké a detektory sú tiež rovnaké, veľkosť napätia **RSSI** bude:

$$A + B \log(U_0) \quad (11.35)$$

kde A a B sú konštanty dané konkrétnym zapojením detektorov

- q Stupnica voltmetra M_1 bude mať lineárnu stupnicu pre veľkosť dopadajúceho výkonu v decibeloch
- q Napätie **RSSI** možno využiť aj pre riadenie zisku **AGC** (Amplifier Gain Control) prijímača **TA**
- q Za zosilňovačom **A** nasleduje komparátor, ktorý porovnáva veľkosť napätia **RSSI** s prednastavenou hodnotou
- q V prípade zníženia úrovne optického signálu pod stanovenú hodnotu, pri ktorej dochádza vplyvom šumu už k amplitúdovým a časovým zmenám v priebehu dátového signálu, komparátor prostredníctvom logického člena **AND** odpojí výstup prijímača
- q Časovo alebo amplitúdovo deformovaný signál by bol zle interpretovaný, čo by viedlo k zablokovaniu nasledujúcich sieťových komponentov (hub, switch a pod.)

Časť prijímača za dolnou priepusťou býva integrovaná do jedného obvodu

Obvody tohto typu sú:

- q Obvody typu **2R (Regenerating and Reshaping)**
- q Obvody typu **3R (Regenerating, Reshaping and Retiming)**

Tieto obvody nám zlepšujú šumové vlastnosti celého prijímača

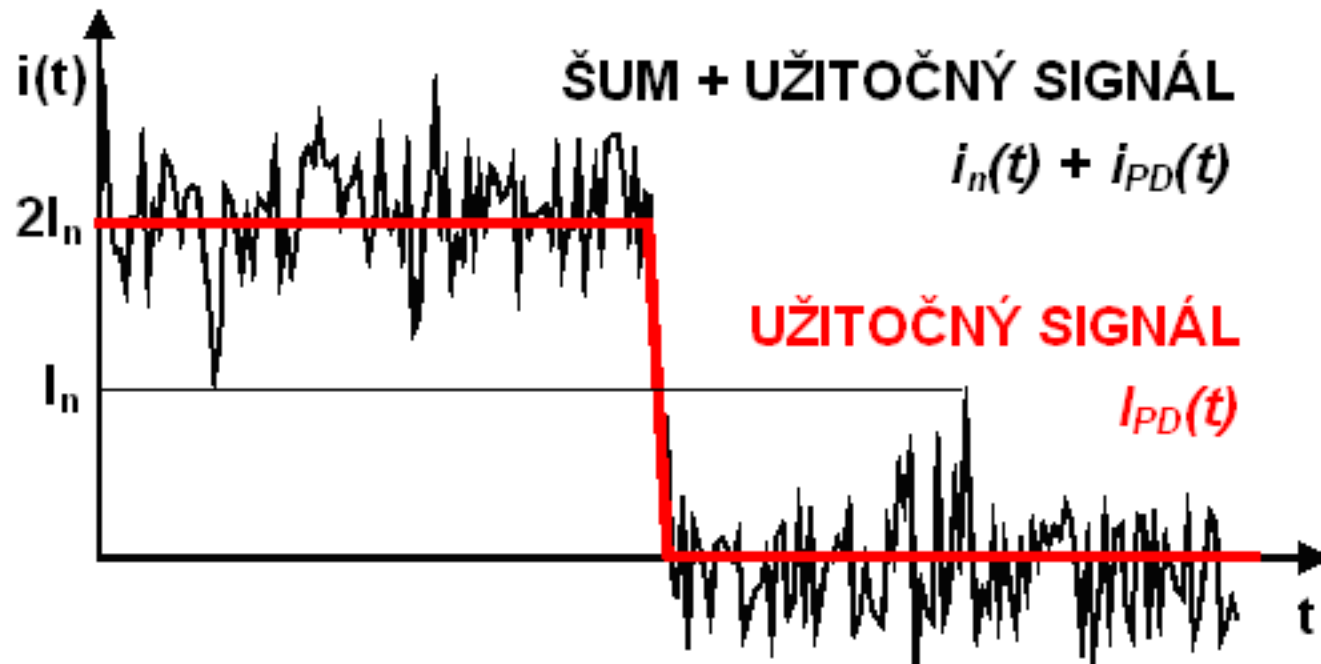
Citlivosť prijímača je ovplyvnená predovšetkým úrovňou šumu zosilňovača TA

Pokiaľ produkuje TA šum s normálnym rozložením hustoty pravdepodobnosti v pásme obmedzenom dolnou priepusťou LPF, a tiež ak poznáme jeho integračnú efektívnu hodnotu a pripustíme určitú chybovosť BER, musí fotodióda generovať prúd $i_{PD}(t)$ s hodnotou:

$$2I_n = i_n 2\sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(1 - 2BER) \sqrt{\overline{i_n(t)}} \quad (11.36)$$

kde I_n je špičková hodnota a i_n je efektívna hodnota šumového prúdu prepočítaná na vstup TA

Ak presiahne veľkosť prúdu na vstupe zosilňovača TA, hodnotu I_n je možné konštatovať, že pri uvažovaní danej hodnoty BER bol vyslaný symbol "1". V opačnom prípade bol vyslaný symbol "0".



Obr. 11.11 Vzťah medzi hodnotou výstupného prúdu fotodiódy a špičkovou hodnotou šumového prúdu

Chybovosť v závislosti od pomeru I_n/i_n .

BER	$2I_n/i_n$
10^{-6}	9,5
10^{-9}	12
10^{-10}	12,7
10^{-12}	14

Napríklad: citlivosť prijímača charakterizovaného určitou veľkosťou i_n sa pre prípady $\text{BER}=10^{-9}$ a $\text{BER}=10^{-12}$ líši len veľmi málo (v pomere 12:14)

Úroveň minimálneho dopadajúceho výkonu:

(11.37)

$$P_{\min} = \frac{2I_n}{R}$$

kde R je citlivosť fotodiódy

Pre kremíkové fotodiódy (pre λ v okolí 850 nm)

q PIN fotodiódy $R = 0,4$ až $0,6$ A/W

q APD $R = 150$ A/W

Dynamické vlastnosti prijímača:

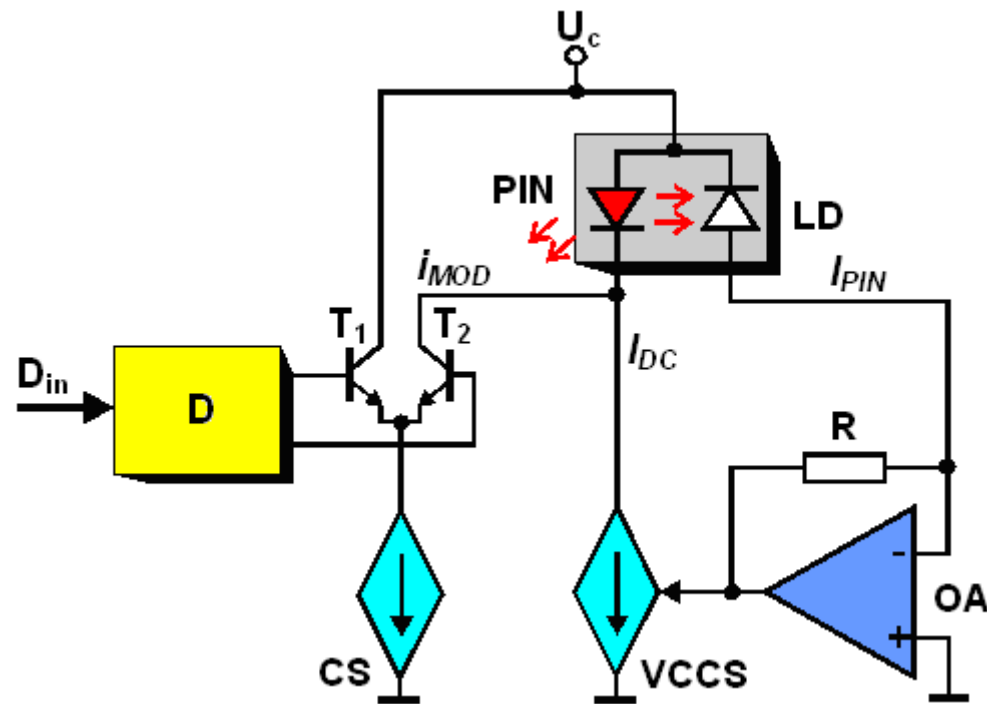
$$D_0 = 10 \log \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) \quad (11.38)$$

kde P_{\max} je maximálna veľkosť optického výkonu pri ktorom sa prijímač dostane do oblasti saturácie a P_{\min} je minimálny výkon určený úrovňou šumu

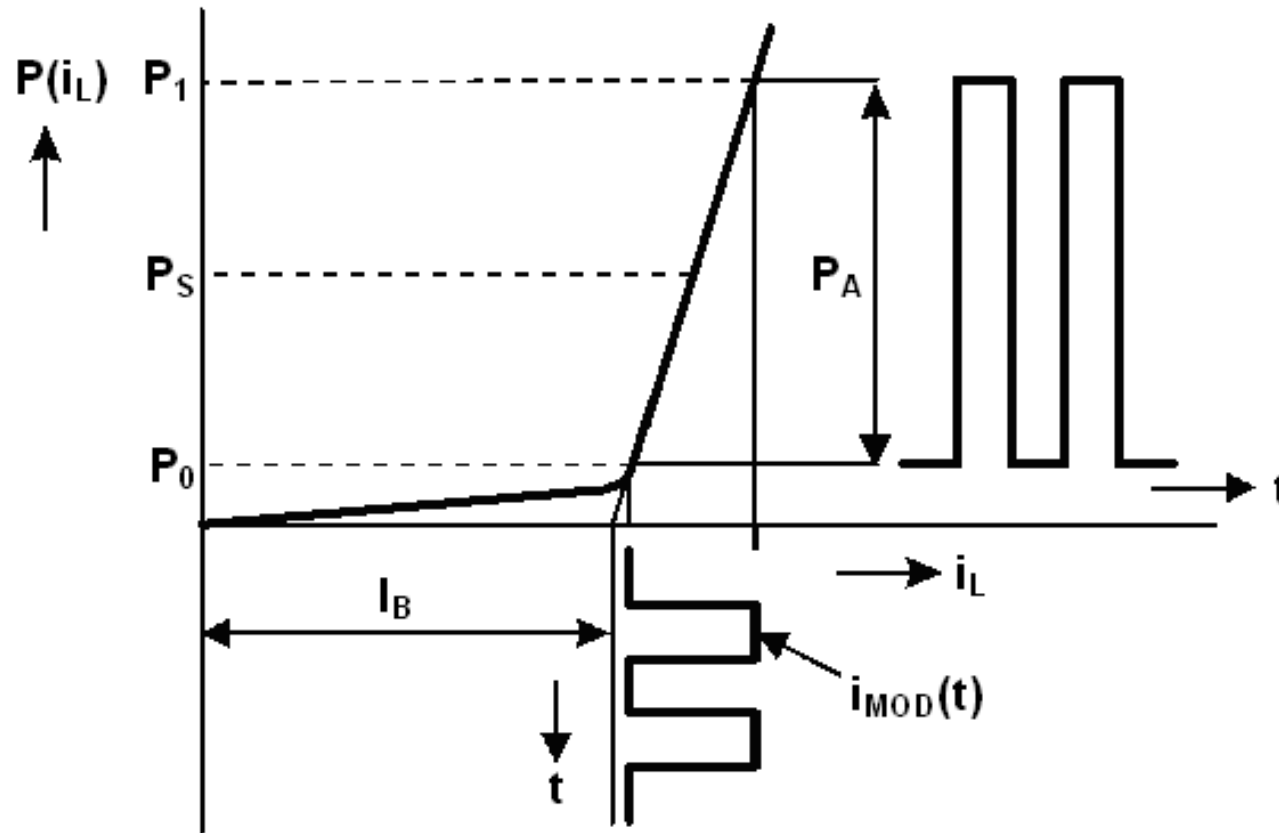
11.3.3 OPTICKÝ VYSIELAČ

Optický vysielateľ ATX:

- q Generovanie časovo premenného prúdu i_{MOD}
- q Stabilizácia pracovného bodu laserovej diódy generujúcej prúd I_{DC} .
- q Pracovný bod I_B volíme tesne pod prahom LD
- q Generovaný optický výkon P_S je snímaný monitorovacou PIN fotodiódou priamo v púzde LD



Obr. 11.12 Bloková schéma optického vysielača ATX.



Obr. 11.13 Modulácia LD.

LD typu VCSEL (Vertical Cavity Surface – Emitting Laser):

- q Vyniká dynamickými parametrami
- q Pomerne vysoké výkony
- q Oveľa pozvoľnejšia prevodová charakteristika
- q VCSEL nevyžaduje monitorovaciu PIN fotodiódu

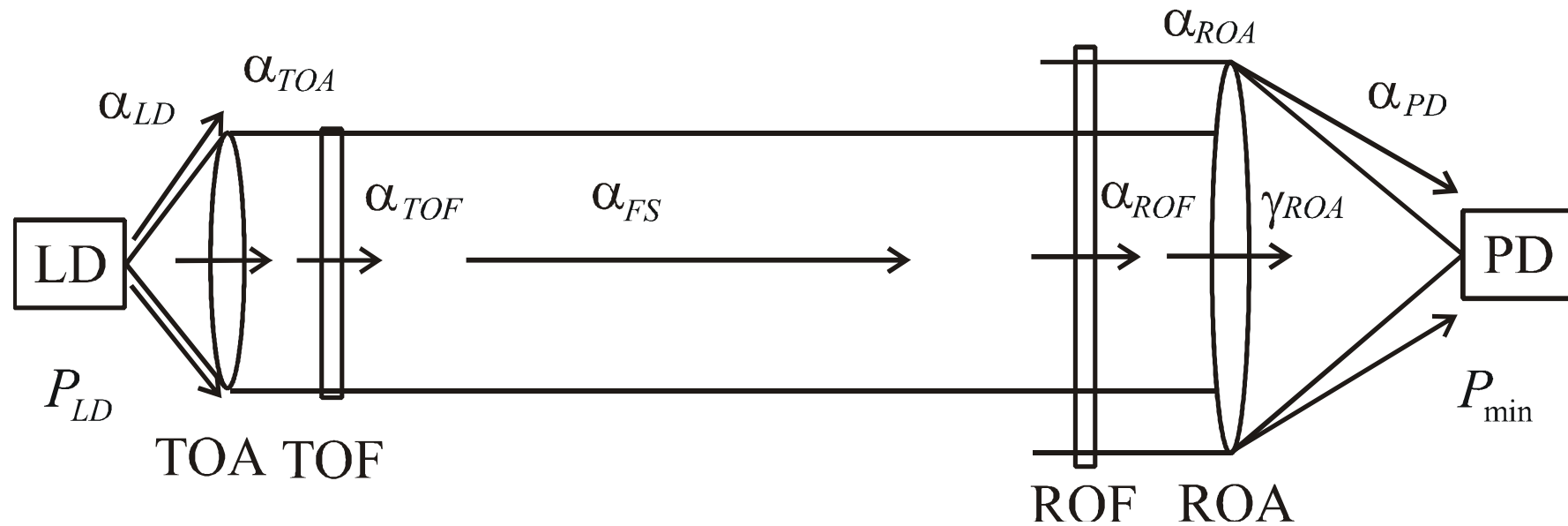
Nevýhoda VCSEL:

- q Požiadavka na veľký rozkmit prúdu $i_{MOD}(t)$
- n Optický vysielateľ ovplyvňuje výraznou mierou dosah FSO najmä veľkosťou optického výkonu generovaného LD
 - rádovo jednotky až desiatky mW
- n Dôležitá tiež divergencia optického zväzku

11.4 VÝKONOVÁ BILANCIA FSO

11.4.1 VÝKONOVÁ ANALÝZA SYSTÉMU

- ✓ Stredný výkon laserovej diódy P_{LD}
- ✓ Účinnosť väzby laserová dióda – vysielacia optická sústava a_{LD}
- ✓ Priepustnosť vysielacej a prijímacej optickej sústavy a_{TOA} a a_{ROA}
- ✓ Priepustnosť optických prieszorov a_{TOF} a a_{ROF}
- ✓ Útlm šírením a_{FS}
- ✓ Zosilnenie prijímacej optickej sústavy Y_{ROA}
- ✓ Účinnosť väzby prijímacia optická sústava – fotodióda a_{PD}
- ✓ Rezerva vyvolaná nedokonalosťou vzájomného zamerania hlavíc spoja ρ_m
- ✓ Rezervu spoja na atmosférické prenosové prostredie ρ_{atm}
- ✓ Minimálnu hodnotu pomeru signálu k šumu SNR_0
- ✓ Minimálny detekovateľný výkon fotodiódy P_{min}
- ✓ Citlivosť prijímacieho systému P_0
- ✓ Saturácia prijímača P_{max}



Obr. 11.14 Model výkonovej bilancie FSO.

Účinnosť väzby a_{LD} závisí od uhlovej šírky a rozloženia optického zväzku vyžarovaného z LD a od numerickej apertúry vysielacej optickej sústavy. V decibeloch sa a_{LD} vyjadří v tvare:

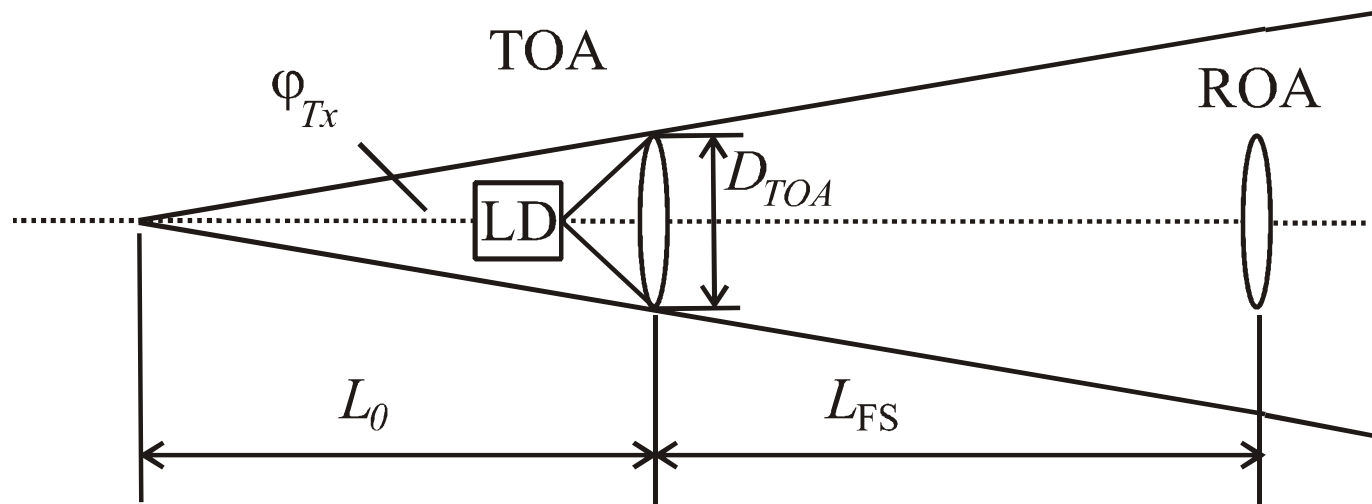
$$a_{LD} = \left| 10 \log \frac{P_{TOA}}{P_{LD}} \right| \quad (11.39)$$

kde P_{TOA} je výkon dopadajúci na apertúru vysielacej optickej sústavy. V praxi je možné predpokladať, že útlm väzby a_{LD} je približne 1,5 dB. **Útlm šírením** je určený výrazom:

$$a_{FS} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{FS}} \right| \quad (11.40)$$

kde L_{FS} je vzdialenosť medzi stanicami spoja a L_0 je tzv. **pomocná dĺžka**. Na vyjadrenie L_0 je potrebné poznať štruktúru vysielacej optickej sústavy D_{TOA} a uhlovú šírku vysielaného zväzku φ_{Tx} :

$$L_0 = \frac{D_{TOA}}{j_{Tx}} \quad (11.41)$$



Obr. 11.15 Význam pomocnej dĺžky L_0 .

Zosilnenie prijímacej optickej sústavy je určené pomerom plôch prijímacej a vysielacej apertúry, rozložením intenzity v Gaussovom zväzku a umiestnením stredu prijímacej apertúry v osi Gaussovho zväzku:

$$g_{ROA} = \left| 20 \log \frac{D_{ROA}}{D_{TOA}} \right| + 3dB \quad (11.42)$$

Účinnosť väzby prijímacia optická sústava – fotodióda a_{pD} závisí (za predpokladu konštantného ožiarenia prijímacej apertúry) od pomeru aktívnej plochy fotodiódy A_{pD} a veľkosti plochy A_{spot} , ktorú v ohniskovej rovine prijímajúcej optickej sústavy vytvára prijaté svetlo. Pre je $a_{LD} = 0$ dB.

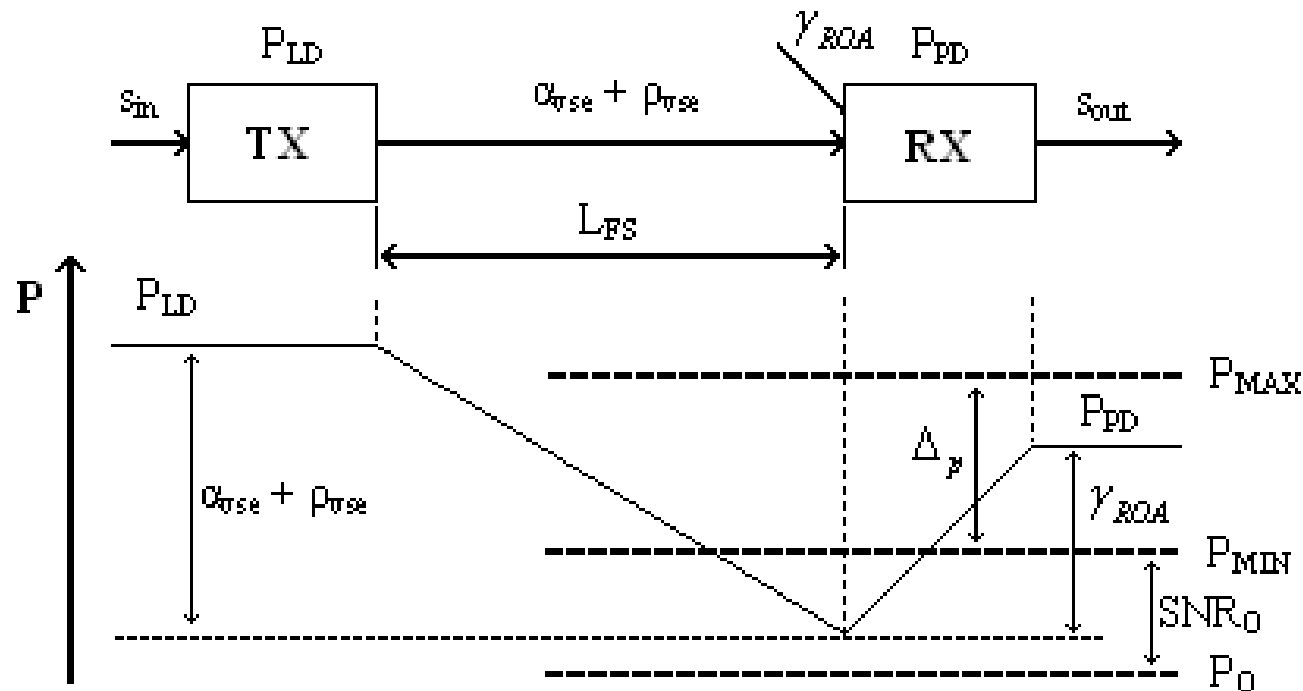
Rezervu spoja na atmosférické prenosové prostredie ρ_{atm} možno určiť z dlhodobého merania tlmenia atmosférického prenosového prostredia (APP). V praxi možno zvoliť $\rho_{atm} = 6$ dB.

Minimálna hodnota SNR_0 sa stanovuje v závislosti od typu modulácie a požadovanej chybovosti BER . Pre IM typu OOK a pri chybovosti spoja $BER = 10^{-6}$ je $SNR_0 = 13,5$ dB. Minimálny detekovateľný výkon prijímača P_{min} závisí od prenosovej rýchlosti, typu použitej fotodiódy a šumových parametrov predzosilňovača. Pre fotodiódu PIN a prenosovú rýchlosť $v_l = 10$ Mbit/s je hodnota minimálneho detekovateľného výkonu prijímača. **Citlivosť prijímacieho systému** je definovaná ako minimálna úroveň prijatého optického výkonu P_0 , ktorá je nutná na dosiahnutie stanovenej hodnoty SNR_0 :

$$P_0 = P_{min} + SNR_0 \quad (11.43)$$

Dôležitým parametrom výkonovej bilancie FSO je **úroveň** prijímaného optického výkonu, pri ktorej **dochádza k saturácii** prijímača P_{max} . Rozsah dynamiky prijímacieho systému Δ_p je potom určená výrazom $\Delta_p = P_{max} - P_o$. Rozsah dynamiky prijímacieho systému je vzhľadom na vysokú mieru fluktuácií prijímaného výkonu (vplyv šumu APP) významnou veličinou. Jej hodnota v decibeloch je **$\Delta_p = 30 \text{ dB}$** .

Rezerva vyvolaná **nedokonalosťou vzájomného zamerania** staníc spoja ρ_m je spôsobená rôznymi vplyvmi: neskúsenosťou obsluhy pri zameriavaní, mechanickými deformáciami úchytiel staníc pri aretácii, teplotnými deformáciami konzol a pod. Empiricky bolo zistené, že tento útlm neprevyšuje **hodnotu 1,5 dB**.



Obr. 11.16 Výkonovo úrovňový diagram FSO.

Výkonová bilančná rovnica:

(11.44)

$$P_{PD} = P_{LD} - |a_{celk}|$$

rozdiel výkonu vysielacej diódy P_{LD} a celkových strát $|a_{celk}|$

Celkové straty:

(11.45)

$$|a_{celk}| = a_{vse} + r_{vse} + g_{ROA}$$

súčet všetkých útlmov a_{vse} , všetkých rezerv r_{vse} a zisku ROA g_{ROA}

Celkový útlm:

(11.47)

$$a_{vse} = a_{LD} + a_{TOA} + a_{TOF} + a_{FS} + a_{PD} + a_{ROA} + a_{ROF}$$

súčet všetkých útlmov: a_{LD} (útlm väzby LD/TOA), a_{TOA} (útlm na TOA), a_{TOF} (útlm na krycích sklách a interferenčnom filtri TOF), a_{FS} (útlm šírením), a_{PD} (útlm väzby PD/ROA), a_{ROA} (útlm na ROA) a a_{ROF} (útlm na krycích sklách a interferenčnom filtri ROF)

Celková rezerva:

(11.48)

$$r_{vse} = r_m + r_{atm} + r_{BER}$$

súčet: ρ_m (rezerva na zameranie), ρ_{atm} (rezerva na atmosféru) a ρ_{BER} (rezerva na chybovosť)

11.4.2 MODELOVÝ PRÍKLAD VÝKONOVEJ BILANCIE SYSTÉMU FSO

Parametre FSO systému:

TX – vysielateľ

RX – prijímač

s_{in} – vstupný signál

s_{out} – výstupný signál

P_{LD} – stredný výkon laserovej diódy

P_{PD} – stredný výkon na fotodióde

$a_{vse} + \rho_{vse}$ – súčet všetkých útlmov a všetkých rezerv systému

Y_{ROA} – zisk ROA

P_{max} – úroveň prijímaného výkonu, pri ktorej dochádza k saturácii prijímača

P_{min} – minimálny detekovateľný výkon fotodiódy

P_0 – minimálna úroveň prijatého optického výkonu

SNR_0 – minimálnu hodnotu pomeru signálu k šumu

Δ_p - Rozsah dynamiky prijímacieho systému

Hodnoty parametrov FSO systému:

$P_{LD} = 40 \text{ mW}$ Stredný výkon vysielacej laserovej diódy v mW:

$$P_{LD}(\text{dBm}) = 10 \log(P_{LD}) \quad (11.49)$$

$$P_{LD}(\text{dBm}) = 16,021 \text{ dBm}$$

Stredný výkon vysielacej laserovej diódy v dBm

$$a_{LD} = -1,5 \text{ dB}$$

Útlm väzby LD/TOA

$$a_{TOA} = -1 \text{ dB}$$

Útlm na TOA

$$a_{TOF} = -3,5 \text{ dB}$$

Útlm na krycích sklách a interferenčnom filtri TOF

$$D_{TOA} = 20 \text{ mm}$$

Priemer TOA

$$\varphi_{Tx} = 2,5 \text{ mrad}$$

Uhlová šírka zväzku

$$L_0 = \frac{D_{TOA}}{j_{Tx}} \quad (11.50)$$

$$L_0 = 8$$

$$L_{FS} = 700 \text{ m}$$

$$a_{FS} = -38,939 \text{ dB}$$

Pomocná dĺžka

Vzdialenosť staníc

Útlm šírením

$$a_{FS} = 20 \log \left[\frac{L_0}{(L_0 + L_{FS})} \right] \quad (11.51)$$

$$D_{ROA} = 150 \text{ mm}$$

$$Y_{ROA} = 20,501 \text{ dB}$$

Priemer **ROA**

Zisk **ROA**

$$g_{ROA} = 3 + 10 \log \left[\left(\frac{D_{ROA}}{D_{TOA}} \right)^2 \right] \quad (11.52)$$

$a_{PD} = -1,5$ dB	Útlm väzby PD/ROA
$a_{ROA} = -1$ dB	Útlm na ROA
$a_{ROF} = -3,5$ dB	Útlm na krycích sklách a interferenčnom filtri ROF
$\rho_m = -1,5$ dB	Rezerva na zameriavanie
$\rho_{atm} = -4,2$ dB	Rezerva na atmosféru
$\rho_{BER} = -13,5$ dB	Rezerva na chybovosť
$P_{min} = -43$ dBm	Minimálny detekovateľný výkon
$\Delta_p = 30$ dBm	Dynamika prijímača
$P_{max} = -13$ dBm	Maximálny detekovateľný výkon

$$P_{\max} = P_{\min} - \Delta_p \quad (11.53)$$

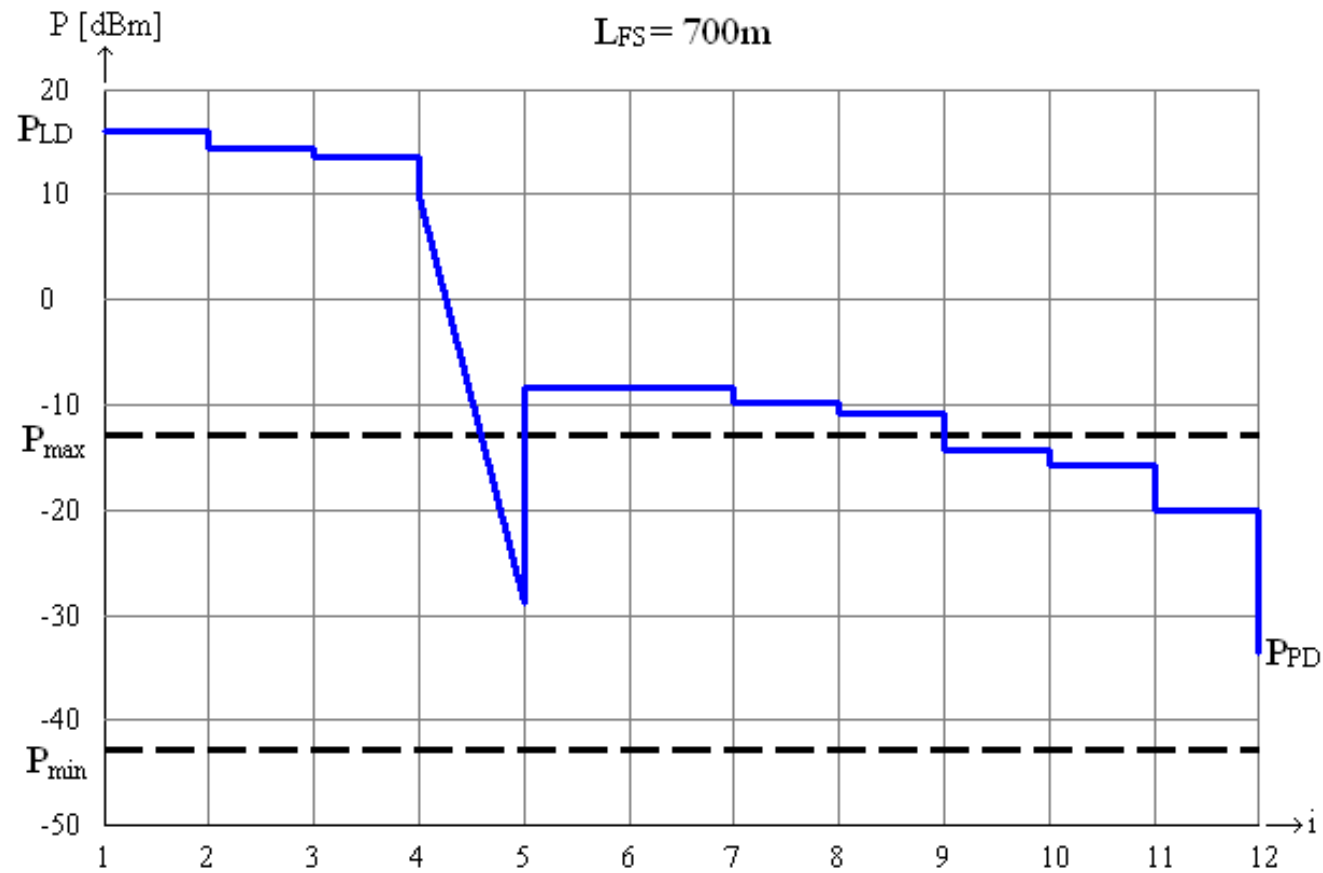
$a_{vse} = -50,939$ dB	Súčet všetkých útlmov
$\rho_{vse} = -19,2$ dB	Súčet všetkých rezerv
$Y_{ROA} = 20,501$	Zisk ROA
$ a_{celk} = 49,638$ dB	Výsledné celkové straty
$P_{PD} = -33,617$ dBm (0,00043481 mW)	

Prijatý optický výkon

Uvažovaný systém **spĺňa podmienku citlivosti**

- t.j. stredný výkon na fotodióde P_{PD} spadá do uzavretého intervalu

$$\langle P_{\min}, P_{\max} \rangle$$



Obr. 11.17 Výkonovo úrovňový diagram FSO systému.

Výkonovo úrovňový diagram FSO systému znázorňuje hodnoty uvedené v Tab. 11.12, pričom platí:

$$P_{i+1} = P_i - \Delta_i \quad (11.54)$$

kde $P_1 = P_{LD}$, $P_{12} = P_{PD}$ a Δ_i sú:

- ✓ Jednotlivé útlmy
- ✓ Rezervy
- ✓ Zisk FSO systému

Hodnoty pre výkonovo úrovnňový diagram FSO systému

i	P_i	Δ_i	Popis parametra Δ_i
1	16,021	-1,5	Útlm väzby LD/TOA
2	14,521	-1	Útlm na TOA
3	13,521	-3,5	Útlm na krycích sklách a interferenčnom filtri TOF
4	10,021	-38,939	Útlm šírením
5	- 28,918	20,501	Zisk ROA
6	-8,417	-1,5	Útlm väzby PD/ROA
7	-9,917	-1	Útlm na ROA
8	- 10,917	-3,5	Útlm na krycích sklách a interferenčnom filtri ROF
9	- 14,417	-1,5	Rezerva na zameriavanie
10	- 15,917	-4,2	Rezerva na atmosféru
11	- 20,117	-13,5	Rezerva na chybovosť
12	- 33,617		Prijatý optický výkon

11.5 APLIKÁCIE FSO

q Okná v zemskej atmosfére

- q $\lambda = 0,5 - 1,1 \mu\text{m}, 1,5 - 1,8 \mu\text{m}, 2 - 2,5 \mu\text{m}, 3 - 4 \mu\text{m}, 8 - 14 \mu\text{m}$
- q Okná výrazne ovplyvňuje opar (**hmla**), znečistenie ovzdušia, vodné kvapky
- q Voľba vhodnej vlnovej dĺžky je ovplyvnená tlmením atmosféry a fyziologickými vlastnosťami ľudského oka

q Súčasné komerčne dostupné systémy:

- q $\lambda = 800 \text{ nm}$ $\lambda = 1550 \text{ nm}$
- q Vzhľadom na vlastnosti ľudského zraku je **bezpečný výkon optického žiarenia pre $\lambda = 1550 \text{ nm}$ až 50 krát väčší ako pre $\lambda = 800 \text{ nm}$**

- ✓ **Kvalita optického spoja:** chybovosť (požaduje sa $BER = 10^{-9}$ alebo menšia)
- ✓ **Dosah FSO** silne závisí od poveternostných podmienok
- ✓ Veľmi silne ovplyvňuje komunikáciu v atmosfére najmä prítomnosť **hmly**

Najrozšírenejšie aplikácie FSO:

- n Infračervené diaľkové TV ovládače
- n Základné linky typu point to point, point to multipoint, mesh, atď.
- n Bezdrôtové telefónne a počítačové siete
- n Transportne prenosové systémy
- n Pripojenie bazových staníc mobilných komunikácií
- n Optická rampa
- n Prenos video a dátových signálov (CATV)
- n Satelitné komunikačné systémy na báze CO_2 laseru

6.5 dB/km



113 dB/km



173 dB/km

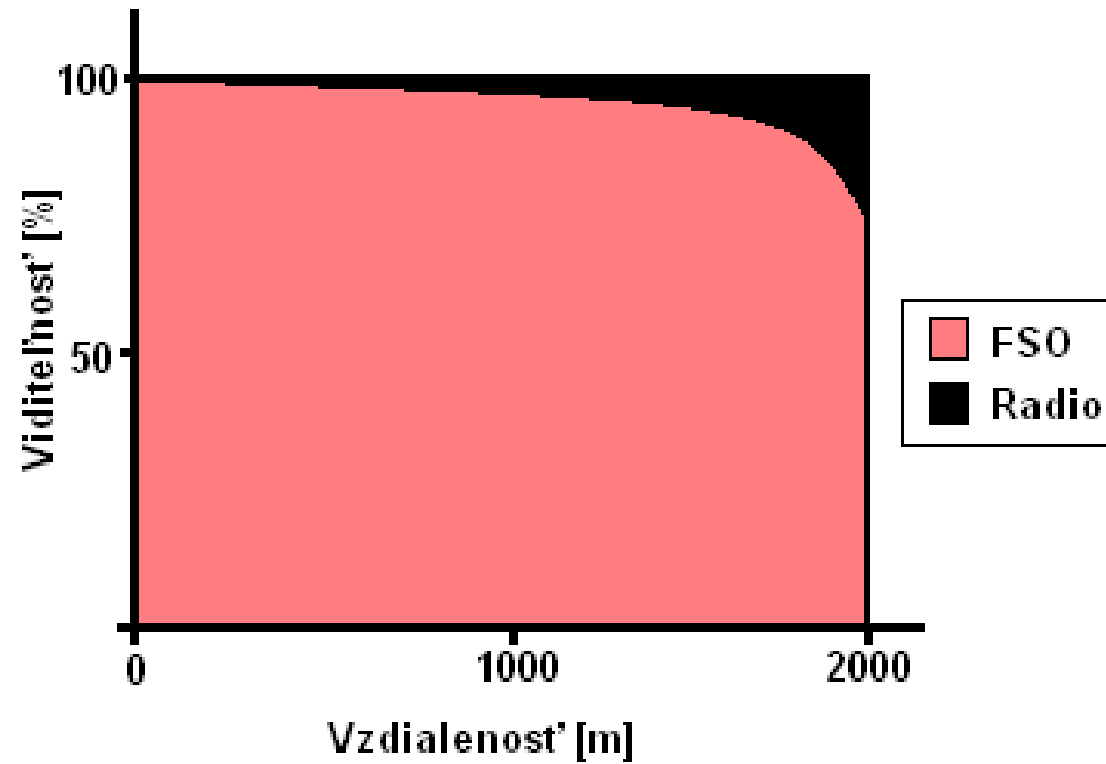


Obr. 11.18 Vplyv hmly na viditeľnosť.

Dosah FSO.

Poveternostné podmienky	Tlmenie [dB/km]	Dosah FSO
Hustá hmla	70,0 – 300,0	100 – 400 m
Stredná hmla	25,0 – 70,0	400 – 1 km
Ľahká hmla	12,0 – 25,0	1 – 1,6 km
Opar	2,0 – 5,8	2,5 – 4,5 km
Jasno	0,2 – 0,8	7 – 10 km

- ✓ Zálohový rádio systém norma **IEEE 802.11b**
- ✓ Cenovo efektívna technológia vhodná na bezdrôtovú zálohu **FSO** systému
- ✓ Limitovaná šírkou pásma na 6 Mbps
- ✓ Rádiová technológia **nie je ovplyvňovaná hmlou**
- ✓ Kombináciou oboch technológií dostaneme takmer **100 % časovú využiteľnosť spoja**



Obr. 11.20 Časová využiteľnosť FSO s rádiovou zálohou.

Parametre FSO systémov:

- q Vlnová dĺžka (810, 850, 1000, 1500 nm)
- q Maximálna prenosová vzdialenosť (200 až 4000 m)
- q Prenosová rýchlosť (125 až 1000 Mbps)
- q Priemerný výkon lasera (20 až 640 mW)
- q Vysielacia apertúra (25 až 50 mm²)
- q Uhlová šírka optického zväzku (6 až 11 mrad)
- q Prijímacia apertúra (180 až 200 mm²)
- q Citlivosť (-45 do -10 dBm)
- q BER (chybovosť) (do 10⁻¹²)

Požiadavky na projektovanie FSO systému:

- q Priepustnosť –prenosová rýchlosť
- q Dosah
- q Prostredie – ako sa prejavujú negatívne vplyvy (hmla, dážď, prach, atď.)
- q Charakteristika používaných aplikácií – časová využiteľnosť (prenos časovo kritických dát)
- q Typ prenášaných informácií- digitálne, analógové
- q Pripojenie do siete
- q Topológia FSO siete
- q Zabezpečenie
- q Bezpečnosť – prístup nepovolaných osôb

Nepriaznivé faktory pri inštalácií FSO:

1. **Stabilita upevnenia** pri montáži (Nie je možné namontovať všade). FSO musí mať stabilné uchytenie z hľadiska otrasov, pôsobenia vetra a pôsobenia zmenou teploty na plášť budovy)
2. **Rotačným pohybom okolo osy**, alebo okolo osy uchytenia konzoly (veľké problémy spôsobuje rotačný pohyb, kde malá uhlová odchýlka spôsobí v požadovanej vzdialenosti 500 m značný odklon optického zväzku od osy zamerania)
3. **Kývavým pohybom budovy** (V horizontálnom smere spôsobuje približne rovnakú odchýlku optického zväzku od oboch strán FSO - - tento pohyb spôsobuje najmenej problémov)

4. **Rušivým pôsobením slnečného žiarenia** a iných rušivých umelých osvetlení (predovšetkým verejné osvetlenie). Slnečné žiarenie spôsobuje značné zvýšenie hladiny šumu na prijímacej fotodióde. Umelé osvetlenie spôsobuje príjem signálu parazitných kmitočtov, daným kmitočtom napájacej siete. K potlačeniu rušivého osvetlenia sa používajú polarizačné filtre, ktoré potlačujú rušenie v jednej rovine. Polarizačné filtre s malým útlmom sú značné drahé a pre použitie v lacnom systéme sú pre svoju cenu nevhodné
5. Vyhnutím sa oblastiam, ktoré sú **často ovplyvňované hmlami**, dažďom, snehom, prašnými časticami, preletom vtákov atď.
6. Zaistením **bezpečnosti voči pôsobeniu nezúčastnených osôb**