

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

OPTICKÝ SPOJ LR-830/1550 Technický popis

BRNO, 2009

1 Návrh a konstrukce dálkového spoje

1.1 Optická část dálkového spoje

Pro dálkový spoj LR 830 nm jsou použité dvě laserové diody s maximálním výkonem 150 mW pro dva svazky s výstupním výkonem 2 x 50 mW. Pro vysílač byly zvoleny spojné dublety s parametry $D_{TXA} = 25$ mm a $f_{TXA} = 40$ mm. Průměr energeticky ekvivalentního svazku na vysílací čočce D_{ekv} je 18,6 mm.

Pro velkou vzdálenost jsme zvolili divergenci svazku 2 mrad a průměr přijímací apertury 0,46 m. Je patrné, že Fressnelová čočka tohoto průměru bude mít spot větší velikosti než čočky menšího průměru. Z tohoto důvodu byla zvolena lavinová fotodioda s průměrem aktivní plochy $D_{\rm PD} = 0,5$ mm. Pro omezení záření pozadí je před fotodiodu vložen interferenční filtr.

1.1.1 Mechanická část návrhu dálkového spoje

Pro směrování svazku na velkou vzdálenost, bylo zapotřebí navrhnout mechanické uchycení vysílače, které nám zajistí možnost velmi jemného směrování. Pro tuto konstrukci je zapotřebí použít velmi přesnou mechaniku neboť odsměrování o jeden miliradián, způsobí v místě přijímače vzdáleném 30 km odchylku o velikosti 30 m. Při použití diferenciálních mikroposuvů firmy Thorlabs (s rozlišením jednotek mikrometrů) jejich umístěním 20 cm od osy rotace dosáhneme směrování s přesností řádově desítek mikroradiánů.



Obr. 1 Uspořádání mechanického uchycení s možností směrování ve dvou osách.

1.1.2 Návrh elektronické části vysílače délkového spoje

Pro měření parametrů optického svazku nám postačí navrhnout budič laserové diody s konstantní úrovní vysílaného výkonu a možnosti modulace na nízkých frekvencích, z důvodu přesnější detekce nízkých výkonů. Vysílací hlavice obsahuje dva

moduly laserů viz obr 1, obě laserové diody září na vlnové délce $\lambda = 830$ nm. Laserové moduly jsou ovládány za pomocí centrálního modulu řízení vysílače. Modul řízení vysílače zajišťuje generování modulačního kmitočtu (řádově 10-100 kHz). Modul je doplněn možností přepínání laserových modulů pro snadnější směrování svazků.



Obr. 2 Schéma bloku budiče LD

Modul budiče laserové diody je tvořen laserovou diodou LD, vlastním obvodem budiče iC-WJZ firmy iC-Haus GmbH doplněném o obvod MAX495 pro monitorování úrovně vysílaného optického výkonu. Nastavení pracovního bodu LD provádíme za pomocí R1, R2 (respektive P1) a modulaci daty přivedenými z modulu řízení.



Obr. 3 Schéma modulu řízení vysílačů

Modul ovládání a generování vysílaného signálu (obr 3) používá mikroprocesor C8051 a obsahuje jak obvody řízení, tak i obvody signalizace, a obvody pro stabilizaci napájení. Napájení je řešeno stabilizátory 7805 a LF33CV pro stabilizaci napájení mikroprocesoru a modulu budičů laserů. Deska plošného spoje je navržená tak aby bylo možné spoj doplnit dalšími funkcemi jako měření teploty nebo vyhřívaní krycích skel (pro odstranění zamlžování krycího skla při nízkých teplotách).

Mikroprocesor slouží jako zdroj obdélníkového signálu na frekvenci 45,5 kHz pro moduly budičů LD a k jejich přepínání. K měření úrovní výstupního výkonu LD je použitý A/D interní převodník mikroprocesoru. Ke komunikaci s mikroprocesorem používáme sériovou sběrnici RS 232.

1.1.3 Návrh elektronické části přijímače délkového spoje

Pro měření výkonu v místě přijímače je zapotřebí navrhnout vysoce citlivý detektor, s možností přesné detekce přijímané úrovně signálu. K detekci je použita lavinová fotodioda C30902S, která z důvodu nízkého šumu, muže být chlazena pomocí chladiče s peltierovým článkem chladičem s ventilátorem a pro přesné měření výkonu je přijímač doplněn o vlastní zdroj světelné energie, s nímž je možné detekovaný výkon porovnat.



Obr. 4 Schéma modulu přijímače s lavinovou fotodiodou



Obr. 5 Schéma modulu řízení přijímače

Schéma detektoru s lavinovou fotodiodou je zobrazeno na Obr. 6. Modul přijímače je doplněn předzesilovačem s řízeným ziskem 1x, 10x a 100x. Zesílený signál je následně filtrován pásmovou propustí a přiveden na vstup logaritmického převodníku AD8307. Logaritmický převodník nám umožní sledovat hodnotu úrovně přijímaného signálu a pro měření spektrálních charakteristik je na desce plošného spoje rovněž umístěn konektor s výstupem zesílené signálu. K řízení činnosti přijímače a monitorování jeho chodu je použit počítač připojený přes sériovou linku RS232. Pomocí počítače pak snímáme výkonovou úroveň signálu, můžeme přepínat zisk předzesilovače, ale také řídit závěrné napětí na fotodiodě pomocí řízeného zdroje APD12P301331RP (firmy S.D.S. Systems Development & Solutions) nastavovaného 16ti bitovým D/A převodníkem integrovaným v mikroprocesoru.

2 Výsledky měření

Pro měření frekvenčního spektra přijímaného signálu ovlivněného průchodem atmosférou byl použit námi navržený dálkový spoj. Při konstrukci přijímače se vycházelo ze zkušenosti, že fluktuace optické intenzity se projevují zejména na nízkých frekvencích (řádově do 1 kHz), zatímco na vyšších frekvencích (řádově od 10 kHz) jsou prakticky zanedbatelné. Frekvence nosné vlny přenášeného signálu byla zvolena 45,5 kHz a propustná šířka pásma filtru byla 5 kHz. K záznamu zesíleného přijímaného signálu byla použita zvuková karta počítače. Nahrávaný zvuk měl vzorkovací frekvenci 22 050 Hz a rozlišení amplitudy 32 bitů. Použití pásmové propusti v přijímači ovlivňuje vzhledem ke strmosti hran filtru přijímaný signál. Při výpočtech jsme použili numerický model inverzního filtru, odvozený z parametrů použitého filtru změřených v laboratoři při sestavování spoje. Frekvenční charakteristika filtru je uvedena na Obr. 5



Obr. 6 Spektrum závislost pásmové propusti na vstupu přijímače a stanovení parametrů inverzního filtru.

Naměřené hodnoty vlastního šumu přijímače jsou uvedeny na obr. 7 a je patrné že dosahují při zesílení vstupního zesilovače 1x a 10x úrovní cca -60 dB. Pro zesílení 100x dosahují hodnot cca -50 dB.



Obr. 7 Spektrum šumu vlastního přijímače (přijímač zastíněn) černá – zisk 1x, modrá – zisk 10x, červená – zisk 100x

Jak je vidět na následujících grafech (Obr. 8, Obr. 9 a Obr. 10), fluktuace optické intenzity jsou výrazné na frekvencích do cca 500 Hz až 1 kHz. Mimo tuto oblast fluktuace optické intenzity splývají s vlastním šumem přijímače.



Obr. 8 Spektrum šumu vlastního přijímače zisk 1x, průměr přijímací apertury: černá – 0 cm (přijímač zastíněn), modrá –10 cm, červená – 50 cm



Obr. 9 Spektrum šumu vlastního přijímače zisk 10x, průměr přijímací apertury: černá – 0 cm (přijímač zastíněn), modrá –10 cm, červená – 50 cm



Obr. 10 Spektrum šumu vlastního přijímače zisk 100x, průměr přijímací apertury: černá – 0 cm (přijímač zastíněn), modrá –10 cm

Vzájemným porovnáním spekter fluktuací optické intenzity v závislosti na zisku předzesilovače je patrné, že jejich vlastnosti se liší až v oblastech vyšších frekvencí, tedy v oblastech, kde je celkový šum dán dominantně zapojením přijímače a kde se již vliv atmosféry neprojevuje.



Obr. 11 Spektrum šumu vlastního přijímače zisk pro otvor 10 cm, zisk: zelená – 1x, modrá – zisk 10x, červená – zisk 100x



Obr. 12 Spektrum šumu vlastního přijímače zisk pro otvor 50 cm, zelená – zisk 1x, modrá – zisk 10x

Měření na dálkovém spoji v terénu nám dalo potřebné praktické zkušenosti pro konstrukci přijímače dálkového spoje. Pracujeme-li s přenosovou rychlosti vyšší než 1 Mbit/s (frekvence přenášeného signálu je 1 MHz) a vyšší, pak vidíme, že fluktuace optické intenzity se projevují na frekvencích o tři řády nižších. Takový rozdíl vede k závěru, že při vhodné volbě horní propusti již fluktuace signálu způsobené turbulencí atmosféry, neovlivňují rozhodovací úroveň OOK demodulátoru.

Přílohy

Příloha 1: Energetická bilance optického spoje Long Range - LR 1550 nm Příloha 2: Energetická bilance optického spoje Long Range - LR 830 nm Příloha 3: Fotodokumentace

Příloha 1: Energetická bilance optického spoje Long Range - LR 1550 nm

ENERGETICKÁ BILANCE

	LONG RANGE 1550 nm / 30 km				
P_{LL}) := 100	mW		střední výkon laserové diody (LD)	
λ :=	$1550 \cdot 10^{-9}$	m		vlnová délka laserového záření	
P_{ml}	$L_D := 10 \cdot log($	(P_{LD})	$P_{mLD} = 20$	střední výkon LD [dBm]	
$lpha_{LL}$) ≔ −1.1	dB		útlum vazby LD/vysílací čočka	
α_{TX}	<i>TA</i> := −0.5	dB		útlum na vysílací optické soustavě	
$lpha_{W_{I}}$	T := -1.0	dB		útlum na krycím skle vysílače	
D _{ek}	_V := 18.6	mm		průměr energeticky ekvivalentního (kruhově symetrického) svazku na TXA	
α_{al}	:= -3	dB		útlum nedokonalým zamířením spoje	
P _{TX}	$r_A := P_{mLD} +$	$\alpha_{LD} + \alpha_{TXA} + \alpha_{WT} + \alpha_{WT}$	^x al		

$$P_{TXA} = 14.4$$

 $\phi_t := 3$ mrad

$$L_0 \coloneqq \frac{D_{ekv}}{\phi_t} \qquad \text{m} \qquad \qquad L_0 = 6.2$$

m

vzájemná vzdálenost hlavic

úhlová šířka energeticky ekvivalentniho

průměr efektivní kruhové RXA (přijímací

výkon na TXA [dBm]

pomocná délka [m]

útlum šířením [dB]

optická soustava)

svazku

$$\alpha_{12} := 20 \cdot log \left(\frac{L_0}{L_0 + L_{12}} \right)$$
 $\alpha_{12} = -73.696$

 $D_{RXA} := 460$ mm

 $L_{12} := 30000$

 $\gamma_{tot} \coloneqq$

$$3.67 + 10 \cdot log \left[\left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv}} \right)^2 \right] \qquad \gamma_{tot} = 31.535 \qquad \begin{array}{l} \text{zisk na RXA a zisk na rozloženi} \\ \text{intenzity [dB]} \end{array}$$

$$\alpha_{geom} \coloneqq 20 \cdot log \left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv} + \phi_t \cdot L_{I2}} \right) \qquad \alpha_{geom} = -45.831 \quad \text{geometrický útlum [dB] (útlum sířením optického svazku)}$$

$\alpha_{WR} \coloneqq -1.0$ dB		útlum na krycím skle přijímače
$\alpha_{RXA} \coloneqq -0.8$ dB		útlum na přijímací optické soustavě
$\alpha_{IF} := -0.4$ dB		útlum na interferenčním filtru
α_{PD} := -3 dB		útlum vazby <mark>RL/PD (PL</mark> - přijímací čočka)
$\alpha_{l\check{c}\acute{a}st} \coloneqq -0.35$ dB/km		koeficient útlumu standardní čisté atmosféry
$\alpha_{\check{c}\check{a}st} \coloneqq L_{12} \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{1\check{c}\check{a}st}$	$\alpha_{\check{c}\check{a}st} = -10.5$	útlum částicemi v čisté atmosféře [dB]
$\alpha_{TS} := \alpha_{LD} + \alpha_{TXA} + \alpha_{WT}$	$\alpha_{TS} = -2.6$	celkový útlum vysílací optické soustavy [dB]
$\alpha_{RS} \coloneqq \alpha_{WR} + \alpha_{RXA} + \alpha_{IF} + \alpha_{PD}$	$\alpha_{RS} = -5.2$	celkový útlum přijímací optické soustavy [dB]
$\alpha_{tot} \coloneqq \alpha_{TS} + \alpha_{RS} + \alpha_{al}$	$\alpha_{tot} = -10.8$	celkový útlum spoje (nezávislý na L ₁₂) [dB]
$z_0 \coloneqq 10^{-6} \pi \frac{D_{ekv}^2}{4\lambda}$	<i>z</i> ₀ = 175.301	hranice blízké a vzdálené zóny záření [m]
$SNR_0 := 13.5$ dB		odstup signálu k šumu pro BER-6
<i>NEP</i> := -76 dBm		výkon ekvivalentní šumu na fotidiodě (10 Mbps/OOK)
$\Delta := 30$ dB		dynamický rozsah přijímače
$d_{PD} := 0.5$ mm		průměr aktivní plochy fotodiody
$f_{RXA} := 460$ mm		ohnisková vzdálenost přijímací čočky
$\phi_{RXA} \coloneqq \frac{1000d_{PD}}{f_{RXA}}$	$\phi_{RXA} = 1.087$	zorný úhel přijímače [mrad]
$P_{0PD} := NEP + SNR_0$	$P_{0PD} = -62.5$	citlivost přijímače (na fotodiodě) [dBm]
$P_{ORXA} := NEP + SNR_0 - \alpha_{tot}$	$P_{ORXA} = -51.7$	citlivost přijímače (na RXA) [dBm]
$P_{sat} \coloneqq P_{ORXA} + \Delta$	$P_{sat} = -21.7$	výkon na RXA saturující přijímač [dBm]

$$\begin{split} & C_n^{-2} = 1 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot 2/3 & \text{strukturn} \left[\text{ parametr indexu lonu "slabě"} \\ & urbulentní atmosféry \\ & \rho_0 := \left[0.55 \cdot C_n^{-2} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 L_{12} \right]^{-\frac{3}{5}} \cdot 10^3 \rho_0 = 8.711 \text{ mm} \\ & \text{poloměr koherence svazku} \\ & \beta_0 := \left[0.5 \cdot C_n^{-2} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^5 L_{12}^{-\frac{11}{6}} \right]^{\frac{1}{2}} \beta_0 = 6.428 & \text{konvenční Rytovova variance} \\ & \rho_0 := \left[0.5 \cdot C_n^{-2} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^5 L_{12}^{-\frac{11}{6}} \right]^{\frac{1}{2}} \beta_0 = 6.428 & \text{konvenční Rytovova variance} \\ & \sigma_{12D} := \exp \left[\frac{2\pi \cdot \left(\frac{D_{RX4}}{1000} \right)^2}{\lambda \cdot 4 \cdot L_{12}} & d_2 = 7.148 & \text{poloměr apertury vůči Fresnelově zóně} \\ & \sigma_{12D} := \exp \left[\frac{0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left(\frac{12}{1 + 0.69 \beta_0^{-\frac{12}{5}}} \right)^{-\frac{5}{6}}}{1 + 0.69 \beta_0^{-\frac{12}{5}}} + \frac{0.49 \beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 + 0.18 \cdot d_2 \right)^{\frac{7}{6}}} \right]^{-1} variance optické intenzity pro sférickou vlnu \\ & \sigma_{12D} := \exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49 \beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 \right)^{\frac{7}{6}}} \right]^{-1} variance optické intenzity pro sférickou vlnu \\ & \sigma_{12D} := \exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49 \beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 \right)^{\frac{7}{6}}} \right]^{-1} variance optické intenzity pro příměr apertury D_{RXA} = 0 \\ & \sigma_{12D} := \exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49 \beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 \right)^{\frac{7}{6}}} \right]^{-1} variance optické intenzity pro příměr apertury D_{RXA} = 0 \\ & \sigma_{12D} := \exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49 \beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 \right)^{\frac{7}{6}}} \right]^{-1} variance optické intenzity pro příměr apertury D_{RXA} = 0 \\ & \sigma_{12D} := \exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49 \beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 \right)^{\frac{7}{6}}} \right]^{-1} variance optické intenzity pro příměr apertury D_{RXA} = 0 \\ & \sigma_{12D} := \exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49 \beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac$$

 $\alpha_{atm} \coloneqq \alpha_{\check{c}\check{a}st} + \alpha_{turb}$ $\alpha_{atm} = -13.346 \text{dB}$ celkový útlum atmosféry



$$i := 1 .. 10$$
 $P_{11} := P_{10}$ $A_{i+1} := P_i - P_{i+1}$

	<i>i</i> =	$P_i =$	$\Delta_i =$			
	1	20	1.1	$P_{RXA} = -41.108$	dBm	výkon na RXA
	2	18.9	1.5			
	3	17.4	3			
	4	14.4	73.696	$P_{PD} = -46.308$	dBm	výkon na fotodiodě
	5	-59.296	-31.535	$0.1P_{DD}$		
	6	-27.761	13.346	$P_{RD} = 10$ PD		
	7	-41.108	1.8	$P = 2.24 \times 10^{-5}$	mW	výkon na fotodiodě
	8	-42.908	3.4	$PD = 2.34 \times 10^{-10}$	11100	vykon na lotodiode
	9	-46.308	16.192	M = 16,102	dB	rezerva spoje na počasí
	10	-62.5	0	M = 10.192	UD	rezerva spoje na pocasi
M_s	$:= P_{TXA}$ -	$P_{ORXA} + 20$	$\cdot \log\left(\frac{D_{RXA}}{\phi_t}\right)$	<i>M_s</i> = 109.813	dB	systémová rezerva spoje

Příloha 2: Energetická bilance optického spoje Long Range - LR 830 nm

ENERGETICKÁ BILANCE

navrhovaného spoje LONG RANGE 830 nm / 30 km

$P_{LD} := 100$	mW		střední výkon laserové diody (LD)
$\lambda := 830 \cdot 10^{-9}$	m		vlnová délka laserového záření
$P_{mLD} \coloneqq 10 \cdot \log$	(P_{LD})	$P_{mLD} = 20$	střední výkon LD [dBm]
$\alpha_{LD} := -1.1$	dB		útlum vazby LD/vysílací čočka
$\alpha_{TXA} := -0.5$	dB		útlum na vysílací optické soustavě
$\alpha_{WT} := -1.0$	dB		útlum na krycím skle vysílače
$D_{ekv} \coloneqq 18.6$	mm		průměr energeticky ekvivalentního (kruhově symetrického) svazku na TXA
$\alpha_{al} := -3$	dB		útlum nedokonalým zamířením spoje
$P_{TXA} := P_{mLD} +$	$\alpha_{LD} + \alpha_{TXA} + \alpha_{WT} + \alpha_{WT}$	α_{al}	
		$P_{TXA} = 14.4$	výkon na TXA [dBm]
$\phi_t := 3$	mrad		úhlová šířka energeticky ekvivalentniho svazku
$L_0 \coloneqq \frac{D_{ekv}}{\phi_t}$	m	$L_0 = 6.2$	pomocná délka [m]
$L_{12} := 30000$	m		vzájemná vzdálenost hlavic
$\alpha_{12} := 20 \cdot \log\left(\frac{1}{L}\right)$	$\frac{L_0}{0 + L_{12}} \bigg)$	$\alpha_{12} = -73.696$	útlum šířením [dB]
$D_{RXA} \coloneqq 460$	mm		průměr efektivní kruhové RXA (přijímací optická soustava)
$\gamma_{tot} := 3.67 + 10$	$\cdot log \left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv}} \right)^2$	$\gamma_{tot} = 31.535$	zisk na RXA a zisk na rozloženi intenzity [dB]
$\alpha_{geom} \coloneqq 20 \cdot \log$	$\left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv} + \phi_t \cdot L_{12}}\right)$	$\alpha_{geom} = -45.831$	geometrický útlum [dB] (útlum šířením optického svazku)

$\alpha_{WR} \coloneqq -1.0$	dB		útlum na krycím skle přijímače
$\alpha_{RXA} := -0.8$	dB		útlum na přijímací optické soustavě
$\alpha_{IF} := -0.4$	dB		útlum na interferenčním filtru
<i>α</i> _{PD} := −3	dB		útlum vazby RL/PD (PL - přijímací čočka)
$\alpha_{l\check{c}\acute{a}st} \coloneqq -0.9$	dB/km		koeficient útlumu standardní čisté atmosféry
$\alpha_{\check{c}\acute{a}st} := L_{12} \cdot 10^{-1}$	$^{3} \cdot \alpha_{l\check{c}\check{a}st}$	$\alpha_{\check{c}\check{a}st} = -27$	útlum částicemi v čisté atmosféře [dB]
$\alpha_{TS} := \alpha_{LD} + \alpha_{TS}$	$_{XA} + \alpha_{WT}$	$\alpha_{TS} = -2.6$	celkový útlum vysílací optické soustavy [dB]
$\alpha_{RS} := \alpha_{WR} + \alpha_{I}$	$\alpha_{XA} + \alpha_{IF} + \alpha_{PD}$	$\alpha_{RS} = -5.2$	celkový útlum přijímací optické soustavy [dB]
$\alpha_{tot} := \alpha_{TS} + \alpha_{R}$	$s + \alpha_{al}$	$\alpha_{tot} = -10.8$	celkový útlum spoje (nezávislý na L ₁₂) [dB]
$z_0 \coloneqq 10^{-6} \pi \frac{D_{ekn}}{4\lambda}$	2	<i>z</i> ₀ = 327.369	hranice blízké a vzdálené zóny záření [m]
$SNR_0 := 13.5$	dB		odstup signálu k šumu pro BER-6
<i>NEP</i> := -86	dBm		výkon ekvivalentní šumu na fotidiodě (10 Mbps/OOK)
<i>∆</i> := 30	dB		dynamický rozsah přijímače
<i>d</i> _{PD} := 0.5	mm		průměr aktivní plochy fotodiody
$f_{RXA} := 460$	mm		ohnisková vzdálenost přijímací čočky
$\phi_{RXA} \coloneqq \frac{1000d_{PA}}{f_{RXA}}$	<u>D</u>	$\phi_{RXA} = 1.087$	zorný úhel přijímače [mrad]
$P_{0PD} := NEP + S$	SNR ₀	$P_{0PD} = -72.5$	citlivost přijímače (na fotodiodě) [dBm]
$P_{ORXA} := NEP +$	$SNR_0 - \alpha_{tot}$	$P_{ORXA} = -61.7$	citlivost přijímače (na RXA) [dBm]
$P_{sat} := P_{0RXA} +$	Δ	$P_{sat} = -31.7$	výkon na RXA saturující přijímač [dBm]

$$\begin{split} & C_n^{-2} = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2}/3 & \text{strukturn} \left[\text{ parametr indexu lonu "slabě"} \\ & trubulentní atmosféry \\ & \rho_0 := \left[0.55 \cdot C_n^{-2} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 L_{12} \right]^{-\frac{3}{5}} \cdot 10^3 \rho_0 = 4.117 \text{ mm} \\ & \text{poloměř koherence svazku} \\ & \beta_0 := \left[0.5 \cdot C_n^{-2} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 L_{12} \right]^{-\frac{1}{5}} \beta_0 = 9.254 \\ & \text{konvenční Rytovova variance} \\ & pro sférickou vlnu \\ & d_2 := \frac{2\pi \cdot \left(\frac{D_{RX4}}{1000} \right)^2}{\lambda \cdot 4 \cdot L_{12}} & d_2 = 13.349 \\ & \text{poloměř apertury vůči Fresnelově zóně} \\ & \sigma_{12D} := exp \left[\frac{0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left(\frac{12}{1 + 0.69\beta_0^{-1} \frac{12}{5}} \right)^{-\frac{5}{6}}}{1 + 0.62 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} \cdot d_2 + 0.9 \cdot d_2} + \frac{0.49\beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 + 0.18 \cdot d_2 \right)^{-\frac{7}{6}}} \right]^{-1} \\ & \text{variance optické intenzity prosférickou vlnu} \\ & \sigma_{12D} := exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49\beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 \right)^{-\frac{7}{6}}} \right]^{-1} \\ & \text{variance optické intenzity prosférickou vlnu} \\ & \sigma_{12D} := exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49\beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 \right)^{-\frac{7}{6}}} \right]^{-1} \\ & \text{variance optické intenzity prosférickou vlnu} \\ & \sigma_{12D} := 0.171 \\ & \sigma_{12O} := exp \left[0.51 \cdot \beta_0^{-2} \left[1 + 0.69 \left(\beta_0 \right)^{\frac{12}{5}} \right]^{-\frac{5}{6}} + \frac{0.49\beta_0^{-2}}{\left(0.56 \cdot \beta_0^{-\frac{12}{5}} + 1 \right)^{-\frac{7}{6}}} \right]^{-1} \\ & \text{variance optické intenzity prosférickou vlnu} \\ & \sigma_{12D} = 1.344 \\ & A_{avg} := \frac{\sigma_{12D}}{\sigma_{12O}} \\ & A_{avg} := 0.127 \\ & \text{faktor průměrování apertury příjímače} \\ & \alpha_{nurb} := 10 \cdot \log(1 - \sqrt{\sigma_{12D}}) \\ & \alpha_{nurb} := -2.314 \text{ dB} úttur vívem turbulencí \\ \end{array}$$

 $\alpha_{atm} \coloneqq \alpha_{\check{c}\check{a}st} + \alpha_{turb}$

 $\alpha_{atm} = -29.314 \text{dB}$ celkový útlum atmosféry

$P_{1} := P_{mLD} \qquad P_{2} := P_{1} + \alpha_{LD} \qquad P_{3} := P_{2} + \alpha_{TXA} + \alpha_{WT} \qquad P_{4} := P_{3} + \alpha_{al}$ $P_{5} := P_{4} + \alpha_{12} \qquad P_{6} := P_{5} + \gamma_{tot} \qquad P_{7} := P_{6} + \alpha_{atm} \qquad P_{8} := P_{7} + \alpha_{RXA} + \alpha_{WR}$ $P_{9} := P_{8} + \alpha_{IF} + \alpha_{PD} \qquad P_{10} := NEP + SNR_{0}$ $P_{RXA} := P_{7} \qquad P_{PD} := P_{9} \qquad P_{0} = P_{10} \qquad M := P_{9} - P_{10}$ i := 1 ... 11



$$i := 1 ... 10$$
 $P_{11} := P_{10}$ $A_{i+1} := P_i - P_{i+1}$

	<i>i</i> =	$P_i =$	$\Delta_i =$			
	1	20	1.1	$P_{RXA} = -57.076$	dBm	výkon na RXA
	2	18.9	1.5			
	3	17.4	3			
	4	14.4	73.696	$P_{PD} = -62.276$	dBm	výkon na fotodiodě
	5	-59.296	-31.535	$0.1P_{PDD}$		
	6	-27.761	29.314	$P_{RD} = 10$		
	7	-57.076	1.8	B 5 001 10	7 m\A/	wikon na fotodiodă
	8	-58.876	3.4	$P_{PD} = 5.921 \times 10$	IIIVV	vykon na lotodiode
	9	-62.276	10.224	10 224	dB	rozonya spojo na počasi
	10	-72.5	0	M = 10.224	UD	rezerva spoje na počasi
		20 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 - 10 -	67 74			
M_{g}	$S := P_{TXA}$	$-P_{ORXA} + 20 \cdot la$	$g\left(\frac{D_{RXA}}{\phi_t}\right)$	<i>M_s</i> = 119.813	dB	systémová rezerva spoje



Příloha 3: Fotodokumentace

Obr. P3.1 Přijímač s Fresnellovou čočkou



Obr. P3.2 Vysílač ve dvousvazkovém provedení



Obr. P3.3 Umístění vysílače při testování spoje (10 km)