

Bezdrátový přenos informace pomocí optických modulů

Wireless data transfer via optical modules

Bc. Lukáš Chobot

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš CHOBOT**
Osobní číslo: **A08461**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Počítačové a komunikační systémy**

Téma práce: **Bezdrátový přenos informace pomocí optických modulů**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principy přenosu dat pomocí optických modulů.
2. Vypracujte literární rešerši zaměřenou na přenos dat.
3. Navrhněte zařízení, které bude přenášet data pomocí optického signálu na krátké vzdálenosti.
4. Zařízení prakticky realizujte a ověřte jeho funkčnost.
5. Porovnejte vlastnosti realizovaného zařízení s komerčně dostupnými produkty.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **KLAUS, T.:** Příručka pro elektrotechnika. Europa Sobotáles, 2005. ISBN:80-86706-13-3.
2. **VÁŇA, V.:** Atmel AVR programování v jazyce C. Praha, Ben, 2003. ISBN 80-7300-102-0.
3. **BURKHARD, M.:** C pro mikrokontroléry. Praha, Ben, 2003. ISBN 80-7300-077-6.
4. **HORST, J.:** Informační a telekomunikační technika. Praha, BEN, 2004. ISBN 80-86706-08-7.
5. **BASTIAN, P.:** Praktická elektrotechnika. Europa Sobotáles, Brno, 2004. ISBN 808670615X.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.

Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

25. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

13. června 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



prof. Ing. Karel Vlček, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této práce je seznámit čtenáře s technologií bezdrátového optického přenosu dat. Čtenář získá představu o FSO zařízení, jeho parametrech a výhodách oproti jiným bezdrátovým technologiím. V teoretické části se práce zabývá zejména problematikou atmosférických vlivů a jejich dopadu na kvalitu přenosu, dále pak srovnáním zdrojů modulovaného optického svazku (LED diody a Laseru). V neposlední řadě se práce zabývá bezpečností bezdrátového optického přenosu dat.

V praktické části je realizován optický bezdrátový spoj Ronja Tetrapolis, dostupný pod licencí GPU / GNL. Zařízení je prakticky postaveno a otestováno bez optické části. Sestaveno je z dostupných součástek, dosahuje rychlosti 10Mb/s full-duplex a je kompatibilní s IEEE802.3 standardem.

Klíčová slova: optický bezdrátový spoj, scilintace, extinkce, turbulence, LED, laser, bezpečnost, Ronja Tetrapolis

ABSTRACT

The aim of this thesis is to acquaint the reader with the technology of wireless optical data transfer. The reader gets an idea of the FSO system, its characteristics and advantages over other wireless technologies. Theoretical part of the work is focused on the issue of atmospheric effects and their impact on overall performance, also comparing the common modulated optical beam sources (LEDs and laser diodes). Finally, the work deals with the question of safety of wireless optical data transfer.

The practical part of the work is realized by an optical wireless link Ronja Tetrapolis, which is licensed under the GPU / GNL. The device is practically built and tested without its optical subsystem. Device is made from available off-the-shelf components, reaching transfer speed of 10Mb/s full-duplex and is compatible with the IEEE802.3 standard.

Keywords: optical wireless link, scintillation, extinction, turbulence, LED, laser, security, Ronja Tetrapolis

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce doc. Mgr. Milanu Adámkovi, Ph.D. za odborné vedení při vzniku této práce, a jeho rady a připomínky k průběhu řešení. Taktéž děkuji svému otci za cenné připomínky ke konstrukčnímu řešení a za náměty patří díky Ing. Davidu Mizerovi.

Motto:

" Do not look into laser beam with remaining eye!"

“Nedívejte se do paprsku laseru zbývajícíím okem!”

Autor neznámý

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
Bc. Lukáš Chobot

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 PRINCIP FSO SYSTÉMŮ	11
1.1 VÝHODY A NEVÝHODY FSO TECHNOLOGIE	12
2 VLASTNOSTI A PARAMETRY FSO SYSTÉMŮ	13
2.1 VNITŘNÍ PARAMETRY	13
2.1.1 BER	14
2.2 VNĚJŠÍ PARAMETRY	15
3 ATMOSFERICKÉ VLIVY NA SPOLEHLIVOST KOMUNIKACE	16
3.1 DOSTUPNOST A VÝKONOVÁ REZERVA	17
3.2 ATMOSFÉRICKÝ ÚTLUM (EXTINKCE)	20
3.3 ATMOSFÉRICKÁ TURBULENCE (SCILINTACE).....	25
3.4 ÚTLUM OKENNÍCH TABULÍ	30
3.5 ZAJIŠTĚNÍ SMĚROVÉ STABILITY SPOJE	31
4 LED VS. LASER NA STRANĚ VYSÍLAČE	32
4.1 SPOLEHLIVOST	33
4.2 ATMOSFÉRICKÉ VLIVY	34
4.3 PŘENOSOVÁ RYCHLOST	35
4.4 DOSAH SPOJE.....	35
4.5 VÝKON / CENA.....	35
5 FSO A OCHRANA ZDRAVÍ	37
5.1 KLASIFIKACE LASERU	38
6 ARCHITEKTURA FSO SÍTÍ	41
6.1 (MULTI) POINT-TO-POINT ARCHITEKTURA.....	41
6.2 POINT-TO-MULTIPOINT ARCHITEKTURA.....	41
6.3 MESH ARCHITEKTURA	42
6.4 POROVNÁNÍ ARCHITEKTUR.....	43
7 BEZPEČNOST FSO SYSTÉMŮ	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	47
8 RONJA TERAPOLIS	48
8.1 TWISTER2.....	53
8.1.1 Blok vysílače	54
8.1.2 Blok přijímače	54
8.1.3 Blok napájení	55
8.2 VYSÍLAČ TX	57
8.2.1 Blok vysílače	57
8.2.2 Blok napájení	58
8.3 PŘIJÍMAČ RX.....	60
8.3.1 Blok přijímače	61
8.3.2 Blok napájení	63

8.4	OŽIVENÍ MODULŮ	65
8.5	NASTAVENÍ PREEMFÁZE	67
8.6	MĚŘENÍ NED	69
8.7	MĚŘENÍ PACKETLOSS	71
8.8	KONFIGURACE A NASTAVENÍ V OS WINDOWS/LINUX.....	72
8.8.1	Konfigurace pro OS Linux	73
8.8.2	Konfigurace pro OS Windows	73
9	SROVNÁNÍ S KOMERČNĚ DOSTUPNÝMI PRODUKTY	75
9.1	SDM10-DE 25	75
9.2	RONJA TETRAPOLIS	76
9.3	ELSPEDY 100-200 RTX.....	77
9.4	LIGHTPOINTE AIRELITE 100	78
9.5	POROVNÁNÍ PRODUKTŮ	79
	ZÁVĚR	81
	CONCLUSSION	83
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	85
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ	90
	SEZNAM TABULEK.....	92
	SEZNAM PŘÍLOH.....	93

ÚVOD

Představa o přenosu informace prostřednictvím volného prostoru pomocí modulovaného světelného signálu je poměrně stará, a přestože významný pokrok byl zaznamenán v průběhu posledních desítek let, koncepce zůstává v podstatě stejná. Úzký paprsek viditelného nebo neviditelného světla, který je vysílán na jedné straně prochází volným prostorem a je přijímán koncovou stanicí. Toto řešení se nazývá FSO – z anglického Free Space Optical communication – tedy optická komunikace volným prostorem, česky OBS jako Optický Bezdrátový Spoj (dále v textu už jen „FSO“).

Prvním významným průkopníkem přenosu informace (dat) pomocí světelného paprsku byl Alexander Graham Bell (1848 – 1922) s jeho vynálezem „photophonu“. Tento bezdrátový telefon dokázal modulovat úzký světelný paprsek řeči a přenášet jej stovky metrů, kde byl demodulován. Sám Bell tento „photophon“ označil za svůj největší vynález, větší než telefon. Plný potenciál tohoto objevu se však projevil až s objevem laseru a kabelových optických spojů, kde se prvně použilo svazku světla, jako nosiče dat.

Použitím bezdrátové optické technologie tedy zaniká nutnost metalické nebo optické kabeláže, stejně tak jako zajištění licence pro radioreleový RR (dále v textu už jen RR) spoj. Veškerá optická technologie funguje v bezlicenčním volně přístupném pásmu. Technologie FSO je postavena na využití světla jako nosiče informace podobně jako je tomu u optických kabelových technologií. Jediným rozdílem je zde médium – tedy prostředí, ve kterém se přenos uskutečňuje. Zatímco komunikace optickými vlákny je ověřeným a akceptovaným standardem, FSO je poměrně novou technologií. Nabízí však šířku pásma porovnatelnou s optickými vlákny i konstrukce jeho vysílače a přijímače je podobná.

S rozšiřováním sítí v městských zástavbách a nutností překlenovat překážky, které znemožňují použití metalické, nebo optické kabeláže vzniká v dnešní době velký prostor pro bezdrátové spoje. Pomineme-li menší dosah, nabízí bezdrátové optické spoje oproti mikrovlnným radioreleovým spojům provoz bez spojených nákladů za licenci, nulové okolní rušení a vyšší přenosové rychlosti při často nižší koncové ceně. Právě díky těmto vlastnostem se FSO spojům dostává stále větší obliby.

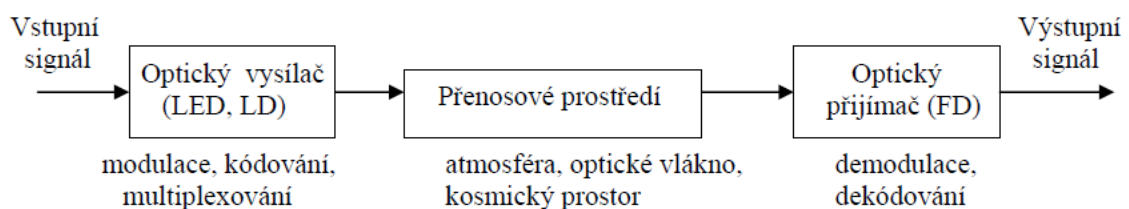
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRINCIP FSO SYSTÉMŮ

FSO technologie je navenek podobná bezdrátové rádiové technologii, při bližším seznámení je však obdobou kabelových optických spojů. FSO je tak označována jako „bezdrátová optika“ s jediným rozdílem, a tím je médium, tedy prostředí, kterým se světelný paprsek šíří. Na rozdíl od radiové technologie je nosičem informace u FSO světlo ve viditelném nebo neviditelném spektru, a to v úzce směřovém svazku. To umožňuje komunikaci na vzdálenost metrů až jednotek kilometrů při rychlostech dosahujících až jednotek Gb/s. Na rozdíl od kabelového optického spoje, kde je prostředí šíření paprsku známé, vzniká u FSO celá řada problémů a proměnných.

FSO technologie funguje vždy v páru při zajištění přímé viditelnosti a na obou stranách linky se nacházejí stejná zařízení. Těmi jsou vysílač a přijímač, které jsou doplněny řídicími obvody. Do datové sítě se připojují nejčastěji pomocí UTP kabelu nebo optického kabelu. FSO zařízení jsou pro síť transparentní a ve výsledku se projeví jen zpožděním, které ideálně dosahuje hodnoty 1ms.

Principem FSO systému je přeměna elektrické energie na světelnou ve formě úzkého paprsku a jeho modulací, nejčastěji OOK. Paprsek s minimální rozbíhavostí pak putuje skrze čočku volným prostorem, kde atmosférické vlivy způsobují nejčastěji jeho útlum nebo jej jinak deformují. Na straně přijímače je pak pomocí čoček paprsek soustředěn na přijímací fotodiodu, kde je signál přeměněn zpětně na elektrický a následně demodulován.



Obr. 1. Obecné blokové schéma optického komunikačního systému

1.1 Výhody a nevýhody FSO technologie

FSO technologie nabízí v porovnání s RR technologií celou řadu výhod:

- k instalaci a provozu není potřeba žádná licence ani povolení
- je imunní vůči RF elektromagnetickému rušení
- úzký světelný svazek zaručuje vysokou selektivitu, a tedy žádné rušení s okolními linkami
- nízká latence
- možnost vysokých přenosových rychlostí
- nemožnost nebo velká náročnost odposlechu přenosu dat
- příslib kvantové kryptografie
- protokolově transparentní

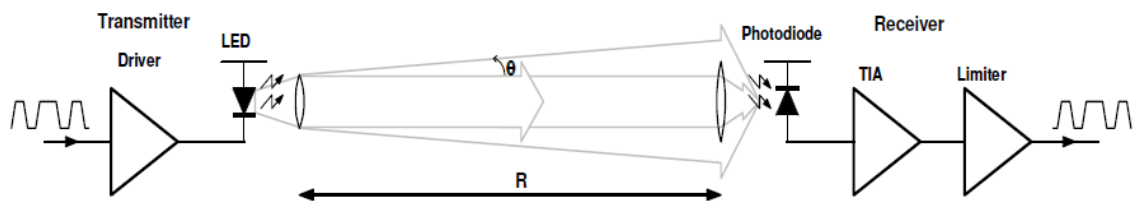
Mezi nevýhody lze zařadit:

- z principu umožňuje pouze spojení point-to-point, které lze ale dále rozšiřovat do jiných architektur
- větší závislost na atmosférických vlivech, možné výpadky přenosu dat (např. při silné mlze nebo přerušení světelného svazku)
- nutnost přímé viditelnosti z vysílače na přijímač

2 VLASTNOSTI A PARAMETRY FSO SYSTÉMŮ

Při bližším pohledu na technologii FSO a její uplatnění je třeba brát v potaz některé vlivy na něj působící. Ty se obecně dělí na vnitřní a vnější.

Je důležité si také uvědomit, že mnoho těchto parametrů nejsou nezávislými veličinami, ale jsou ovlivňovány jinými parametry a jsou často na sobě závislé. Systém optimalizován na velkou vzdálenost (více než 1km) nebude dosahovat optimálních výsledků na vzdálenosti kratší. Celý systém FSO je tedy závislý na jeho koncové aplikaci, jeho dostupnosti a také ceně.



Obr. 2. Zjednodušené schéma optického přenosu informace [19]

2.1 Vnitřní parametry

Vnitřní parametry jsou vztaheny k návrhu FSO, a jsou tedy ovlivněny jeho konstrukcí, a to jak elektroniky, tak mechaniky. Jsou to:

Na straně vysílače:

- vyzařovaný optický výkon
- vlnová délka
- šířka vysílaného pásma
- úhel divergence paprsku – úhel kužele paprsku emitovaného z vysílače. Úhel přímo ovlivňuje, jak rychle se bude svazek světla rozšiřovat s rostoucí vzdáleností.

Na straně přijímače pak:

- citlivost – minimální přijímaný optický výkon, který je nutný detekovat na straně přijímače k zachování jeho správné funkčnosti.
- bit error rate (BER) - poměr chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů
- průměr přijímací čočky

2.1.1 BER

BER je při posuzování kvality FSO spoje jedním z nejdůležitějších parametrů. Hodnota BER je totiž přímo závislá na kvalitě přenosového kanálu, kterou v případě FSO nelze přímo ovlivnit. BER je zkratkou Bit ErroRate – tedy poměrem chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů za danou dobu měření.

$$BER = \frac{bE}{vp * t} \quad (1)$$

Kde:

- vp - je přenosová rychlost
- t - celková doba měření
- bE - celkový počet špatně přijatých bitů

Výsledné číslo nám říká, jaká je pravděpodobnost přijetí chybného bitu ještě před následnou opravou chyb.

Hodnoty BER, kterých se snažíme dosáhnout u FSO systémů, jsou minimálně 10^{-9} , ideálně však 10^{-12} .

Hodnota BER, se zvyšuje, tedy dochází k větší chybovosti, dochází-li k rušení, zejména pak šumu na straně přijímače (ale i vysílače a zesilovačů), optickými ztrátami nebo rozptylem. Zde se tedy projeví veškeré atmosférické rušení, útlum nebo špatná bitová synchronizace přijímače. Hodnota této veličiny tedy bude narůstat s délkou linky a jejím

útlumem. K zajištění přijatelných hodnot BER se u FSO systémů dosahuje zvýšením vysílaného optického výkonu, snížením délky spoje, optimalizací vlnové délky nebo jednoduše snížením přenosové rychlosti spoje. [27]

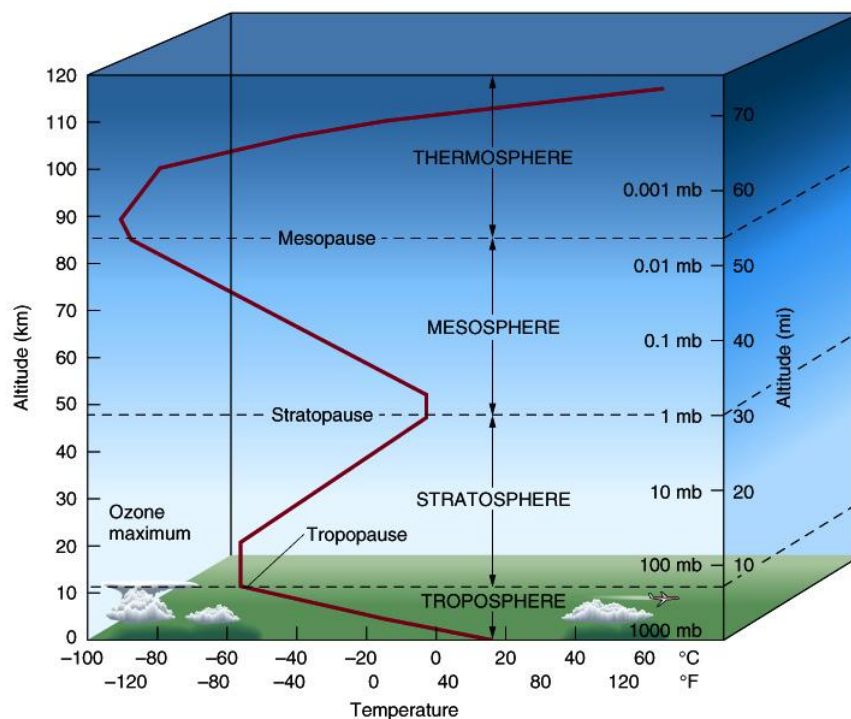
2.2 Vnější parametry

Externí parametry se vztahují k prostředí, ve kterém má systém pracovat, jako je přímá viditelnost, atmosférický útlum, vzdálenost nasazení systému a ztráty. Tyto parametry nelze kromě vzdálenosti nasazení systému přímo změřit ani ovlivnit a k jejich kvantifikaci používáme odborný odhad nebo matematické modelování.

3 ATMOSFERICKÉ VLIVY NA SPOLEHLIVOST KOMUNIKACE

Optická pojítka jsou silně závislá na klimatu a fyzických vlivech na místo jejich instalace. Hlavními faktory ovlivňujícími použitelnost systému jsou atmosférický útlum, scintilace, útlum okenních tabulí (pokud je systém namontován uvnitř budovy), pozice, pohyb budovy, sluneční interference a překážky v přímém výhledu.

Atmosférické vlivy si zaslouží zvláštní pozornost, jelikož FSO systémy jsou instalovány v troposféře, tedy prostředí, kde vodní pára kondenzuje, tvoří se mlhy, oblačnost, projevuje se zde déšť, sníh, vznikají bouřky, větrné turbulence a jiné vlivy měnící se v prostoru a čase.



Obr. 3. Rozdělení atmosféry[33]

Hlavními jevy, ke kterým dochází, při šíření optického paprsku jsou:

- extinkce optické intenzity vlivem absorpce nebo rozptylu na molekulách nebo aerosolech (mlha) a také vlivem turbulencí troposféry
- fluktuace optické intenzity vlivem turbulencí troposféry, působením deště nebo sněhu a jinou deformací optického svazku
- krátkodobé přerušení svazku (ptáci, hmyz,...)

Popsané jevy extinkce a fluktuace působí vždy současně a vzájemně se ovlivňují.

3.1 Dostupnost a výkonová rezerva

Dostupnost je garantovaná funkčnost systému na danou vzdálenost. Udává se v procentech, přičemž snahou je dosáhnout dostupnosti 99,9% a lepší. Je dána nejen vzdáleností, na kterou je systém nasazen, ale závisí rovněž na místním klimatu a atmosférickým podmínkám a v neposlední řadě na návrhu přijímače. Dostupnost je úzce spjata s výkonovou rezervou systému.

Rovnice popisující FSO systém je, pokud vynecháme různé rušivé vlivy, poměrně jednoduchá:

$$P_{rec} = P_{trans} * \frac{d_2^2}{(d_1 + (D * R))^2} * 10^{(-\alpha * \frac{R}{10})} \quad (2)$$

Kde:

P	- je výkon,
d_1	- průměr vysílací apertury [m],
d_2	- průměr přijímací apertury [m]
D	- úhel divergence paprsku [mrad] (1/e pro Gaussův svazek)
R	- vzdálenost linky [km]
α	- atmosférický útlum [dB/km]

Jak z rovnice vyplývá, celkový přijatý výkon je exponenciálně závislý na atmosférickém útlumu a vzdálenosti linky. Pokud bude požadovaná dostupnost spoje 99,9%, jsou tyto dva faktory těmi nejdůležitějšími. Při návrhu FSO systému je jeho dostupnost klíčovým parametrem a váže se na něj jeho spolehlivost a výkonová dynamická rezerva. Faktor, který jako jediný nedokážeme ovlivnit, je atmosférický útlum.

Rovnici lze jinak vyjádřit takto:

$$P_{m.Rec} = P_{m.Trans} - \alpha_{celk.} + \gamma_{Rec} [dB] \quad (3)$$

Kde:

$P_{m.Rec}$	- střední hodnota přijatého výkonu
$P_{m.Trans}$	- střední hodnota vysílaného výkonu
$\alpha_{celk.}$	- celkový útlum linky
γ_{Rec}	- celkový zisk přijímače

Celkový útlum linky $\alpha_{celk.}$ je součtem dílčích útlumů, pro jednoduchost jej lze zapsat takto:

$$\alpha_{celk.} = \alpha_{12} + \alpha_{atm} [dB] \quad (4)$$

Kde:

α_{12}	- útlum šířením volným prostorem
α_{atm}	- útlum způsobený atmosférickými jevy

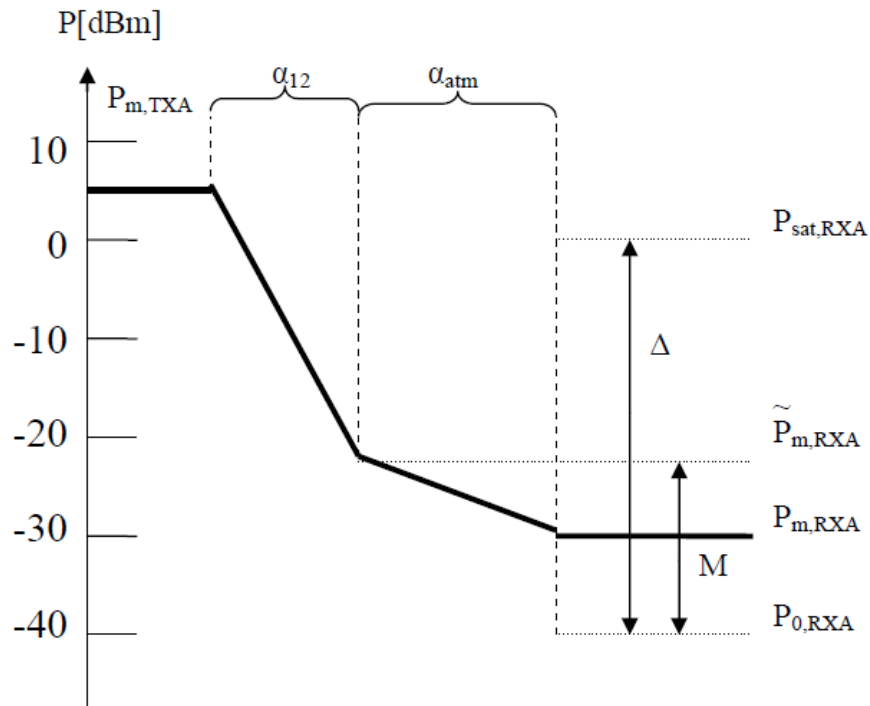
Útlum α_{12} je dán šířením vlny ve volném prostoru a je závislý pouze na vzdálenosti linky, tedy vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem. Považuje se za konstantní pro daný spoj. Útlum α_{atm} je většinou opět součtem více atmosférických vlivů a je podrobněji popsán v dalších kapitolách.

Zisk přijímače lze vyjádřit takto:

$$\gamma_{celk} = \gamma_{Rec} + \gamma_{add} = \left| 20 \log \frac{d_2}{d_1} \right| + \gamma_{add} [dB] \quad (5)$$

Kde:

γ_{Rec}	- geometrický zisk na přijímači
γ_{add}	- přidání zisk, dán rozdílným rozložením optické intenzity na straně přijímače a vysílače
d_1	- průměr vysílací apertury [m]
d_2	- průměr přijímací apertury [m]

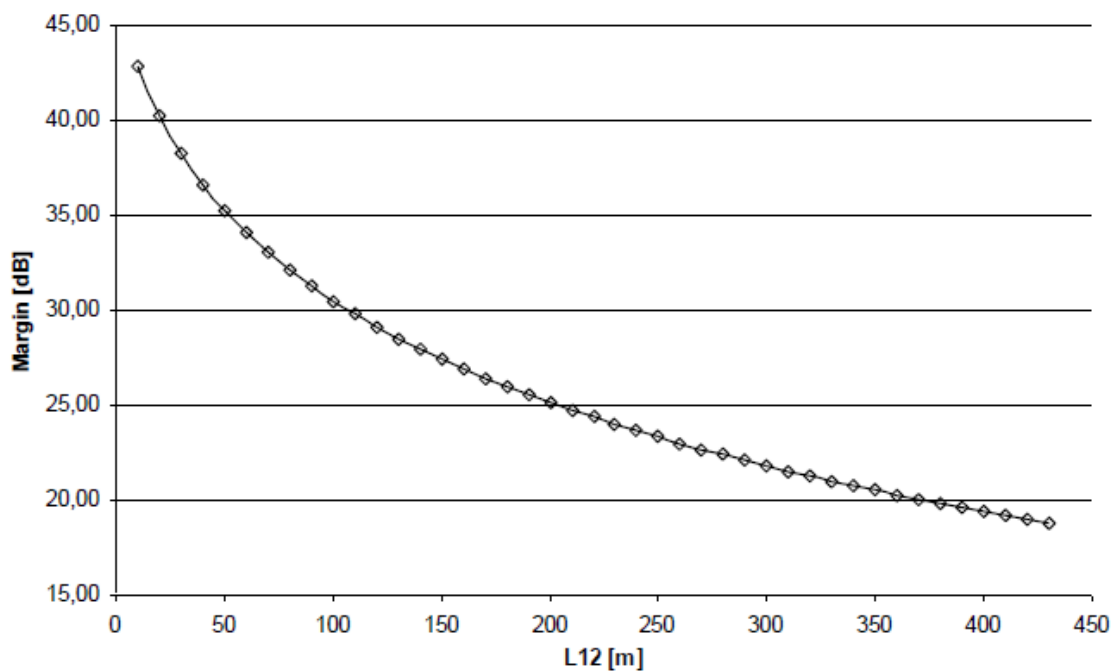


Obr. 4. Výkonové úrovně FSO spoje [32]

Kde:

- $P_{m,TXA}$ - úroveň vysílaného výkonu pro ideální atmosféru
- $P_{m,RXA}$ - úroveň přijatého výkonu pro ideální atmosféru
- $\tilde{P}_{m,RXA}$ - střední hodnota přijatého výkonu pro ideální atmosféru
- $P_{sat,TXA}$ - saturační práh přijímače
- $P_{0,RXA}$ - citlivostní práh přijímače
- Δ - dynamický rozsah přijímače
- M - linková rezerva

V praxi je požadavek na dostupnost spoje určen dynamickou rezervou linky (M) 30dB. Dostupná rezerva spoje klesá se vzdáleností (viz. Obr.5.)

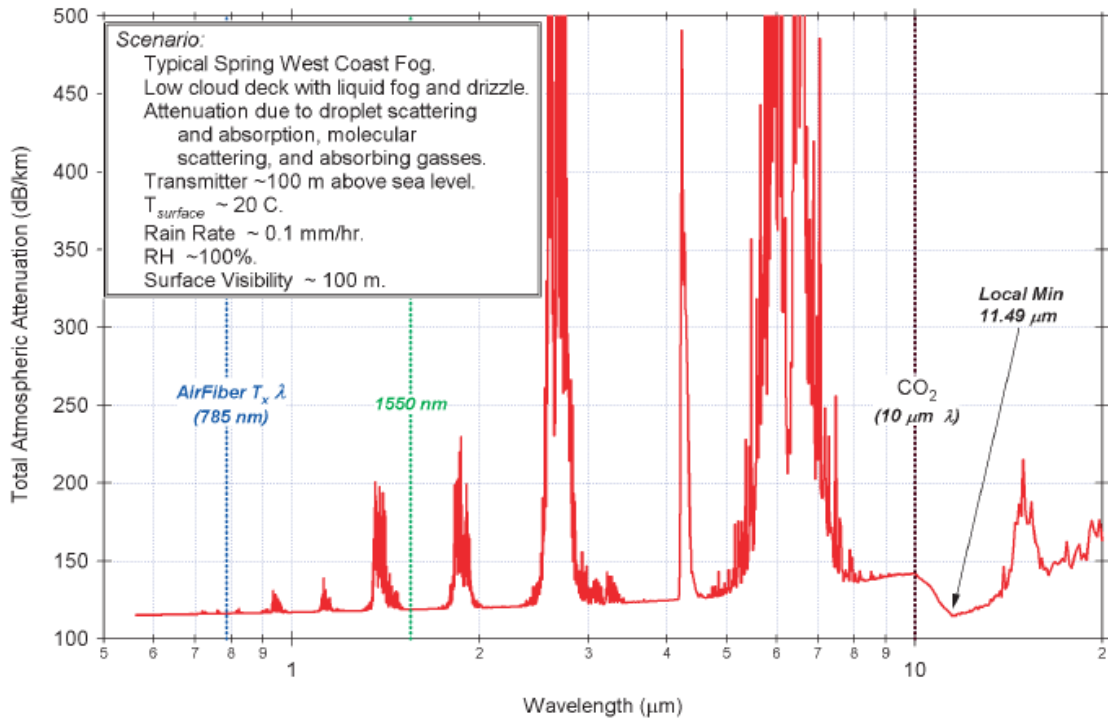


Obr. 5. Závislost rezervy spoje na vzdálenosti linky [14]

3.2 Atmosférický útlum (extinkce)

FSO většinou fungují bez jakýchkoliv problémů i při zhoršené viditelnosti. Pojítka mají dostatečnou výkonovou rezervu pro funkci i za nepříznivých podmínek. Největším omezením optické komunikace volným prostorem je však mlha. Ta vzniká kondenzací vodní páry v přízemní vrstvě vzduchu. Skládá se z malých vodních kapiček nebo ledových krystalků, které mají v průměru stovky mikronů. Na optický signál ale působí tak, že jej absorbují, rozptýlí nebo odrazí. To má za následek značný výkonový pokles přijímaného signálu a citelně tak omezuje jeho efektivní použitelnou vzdálenost. Silná mlha je značným omezením optických pojítek při komunikační vzdálenosti větší než cca 100m. Dalšími nezanedbatelnými vlivy jsou i nízké mraky, déšť, sníh, vzdušný prach a zejména jejich vzájemná kombinace.

Během přenosu optického paprsku ve volném prostoru jsou fotony pohlcovány nebo rozptylovány atmosférickými částicemi o rozměrech 1 – 5000 μm a způsobují měnící se útlum v závislosti na jejich rozložení.



Obr. 6. Závislost útlumu atmosféry na vlnové délce vysílače [11]

Jak je patrné z Obr.6., je útlum atmosféry při vlivu mlhy různý pro různé vlnové délky. V obrázku jsou vyznačeny dvě dnes nejpoužívanější vlnové délky FSO systémů, tedy 785nm (modře) a 1550nm (zeleně).

Vhodnou volbou vlnové délky můžeme tedy kompenzovat útlum atmosféry způsobený absorpcí paprsku.

Bylo zjištěno, že Mieův rozptyl je hlavní příčinou útlumu intenzity optického paprsku na dané vzdálenosti. Útlum paprsku způsobený rozptylem můžeme spočítat z následující rovnice: [13][11]

$$\alpha_{scat} = \frac{17}{V} \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,195V} [dB] \quad (6)$$

Kde:

V [km] - je viditelnost

λ [nm] - je vlnová délka vysílaného paprsku

Viditelnost je definována jako vzdálenost, na které optická intenzita klesne na 5% své původní hodnoty. Viditelnost V lze dále spočítat pomocí propustnosti τ z následující rovnice:

$$V = \frac{\ln(\tau_{th}) * d_L}{\ln(\tau_M)} \cong \frac{-3,27m}{\ln(\tau_M)} [m] \quad (7)$$

Kde:

- d_L [km] - odpovídá vzdálenosti linky
- τ_{th} - práh propustnosti (5%)
- τ_M - naměřená propustnost [%] v minutovém měřítku

Abychom odhadli spolehlivost a kvalitu optického spoje, koeficient útlumu α_{scat} je považován za stochastický proces, jehož rozložení odpovídá logaritmicko-normálnímu rozložení.

Pro další studium a výpočty útlumu způsobeného mlhou, deštěm nebo sněhem spoléháme na dva přístupy – empirický a teoretický (mikrofyzický model). Empirický přístup je na rozdíl od teoretického relativně jednoduchý a lehce implementovatelný. Jedním z empirických modelů k výpočtu útlumu signálu v případě jasného nebo mlhavého počasí (bez deště nebo sněhu) je Kimův model, který je pro vlnové délky 785 – 1550nm velmi přesný: [13]

$$\alpha_{fog} = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q} [dB] \quad (8)$$

Kde q je parametr vztažený k rozdělení velikosti plochy :

$q =$	1,6	$V > 50\text{km}$
	1,3	$6 \text{ km} < V < 50\text{km}$
	$0,16V+0,34$	$1 \text{ km} < V < 6\text{km}$
	$V - 0,5$	$0,5\text{km} < V < 1\text{km}$
	0	$V < 0,5\text{km}$

V případě deště je celkový útlum relativně nezávislý na vlnové délce optického paprsku. Akceptovaným modelem je:

$$\alpha_{rain} = \frac{2,9}{V} [dB] \quad (9)$$

Útlum v případě padajícího sněhu je daleko vyšší než u deště, zejména kvůli velikosti sněhových vloček. Vypočítá se dle vztahu:

$$\alpha_{snow} = \frac{58}{V} [dB] \quad (10)$$

Pokud budeme uvažovat teoretický mikrofyzický model, předpokládáme, že vícenásobný rozptyl je zanedbatelný a všechny částice rozptylu jsou rovnoměrně rozloženy v cestě přenášeného paprsku.

Rozptyl zsvětla způsobený mlhou zde vzniká hlavně Mieovým rozptylem a celkový útlum způsobený absorbcí můžeme zanedbat. Celkový útlum tedy můžeme vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\beta_{fog} = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_{ext}(m, r/\lambda) n(r) dr \quad [dB/km] \quad (11)$$

Kde:

- m - je refrakční index kapiček mlhy
- r - je rádius kapiček mlhy
- Q_{ext} - účinnost zániku
- $n(r)$ - je rozložení velikosti kapiček (modifikovaná gamma)

Pro deštivé podmínky vypadá rovnice takto:

$$\beta_{rain} = 4,34 \int_{r_1}^{r_2} \alpha_{scat}(r) n(r) dr \quad [dB/km] \quad (12)$$

Kde:

- $n(r)$ - je rozložení velikosti kapiček (modifikovaná gamma)

r - je rádius kapiček mlhy

Množství srážek lze spočítat takto:

$$R = 4,8 \int_0^{\infty} r^3 v(r) n(r) dr \quad [mm/h] \quad (13)$$

Kde rychlost kapek $v(r)$ deště v bezvětří je dána vztahem:

$$v(r) = 9,65 - 10,3e^{-1,2r} \quad [m/s] \quad (14)$$

Model zohledňující útlum způsobený sněhem je:

$$\beta_{snow} = 0,3619 \frac{\rho_w R}{C_3 v_t} \quad [dB/km] \quad (15)$$

Kde rychlost sněhových vloček v_t je dána vztahem:

$$v_t = 0,1155 \sqrt{\frac{g C_3}{\rho_a C_D}} \quad [m/s] \quad (16)$$

Kde:

- ρ_w - je hustota vody v g/cm^3
- R - je množství sněhových srážek v mm/h
- C_3 - je tloušťka sněhových vloček v g/cm^2
- ρ_a - je hustota vzduchu v g/cm^3
- C_D - je koeficient tahu pro sníh

Ačkoliv mají sněhové vločky na pohled komplikovaný tvar (často fraktální útvar), nemají danou velikost či rozměry. Pro jednoduchost se tedy uvažuje tvar koule. [13]

3.3 Atmosférická turbulence (scilintace)

Atmosférické turbulence (nebo také scilintace, vlnění) si lze představit jako změnu intenzity světla v čase a prostoru ve směru vysílaného signálu k přijímači na danou vzdálenost. Přijímaný signál na straně přijímače tedy kolísá, a to kvůli teplotně indukovaným změnám v indexu lomu vzduchu ve směru vysílaného signálu. Ty jsou způsobeny zejména tepelným zářením, které může pocházet např. z průmyslové výroby (teplý kouř vypouštěný z komína) nebo přírodními jevy vlivem slunce (vlnění vzduchu nad velmi zahřátým povrchem, asfaltová silnice, rozpálená střecha).

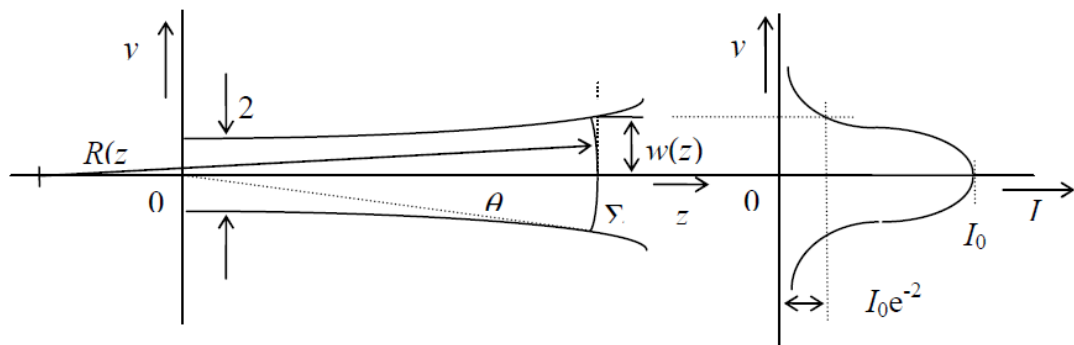
Vznikají tak nestabilní oblasti (masivy) s rozdílnou teplotou a indexem lomu. Tyto nehomogenní oblasti se dále mohou trhat na menší nestálé části, a tedy vznikají turbulence.

Tyto změny indexu lomu světla v časově a teplotně nestabilních oblastech se pak chovají jako soustava čoček, které odrážejí vysílaný světelný paprsek do a mimo jeho optimální trasu. Časové měřítko těchto výchylek je přímo úměrné objemu vzduchu o objemu vysílaného paprsku, který je potřeba k „překročení“ vysílaného paprsku. Proto je taky vztahován k síle větru. [10]

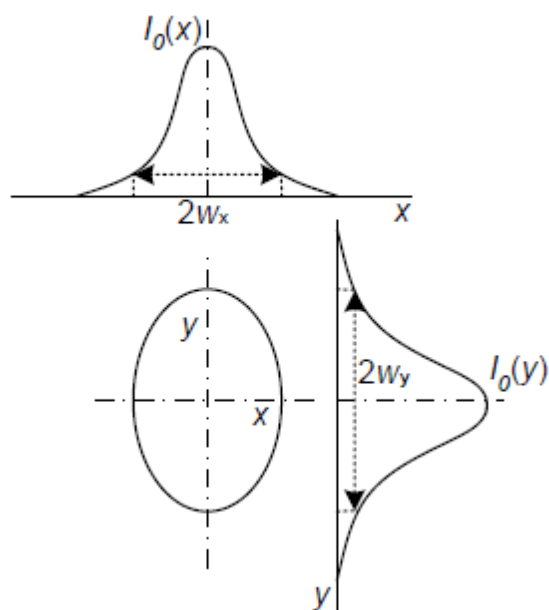
Bylo vypořádáno, že pro malé výchylky je distribuce přijímaných intenzit blízka k logaritmickému normálnímu rozložení. V případě FSO, kde se předpokládá horizontální směr přenosu, a tedy i vyšší měřítko výchylek, se distribuce více podobá exponenciále.

Parametr, který se často používá k měření síly tohoto vlnění je strukturní parametr indexu lomu C_n^2 a lze jej určit pomocí relativní variace optické intenzity. Ten přímo souvisí s rychlostí větru a zhruba nám říká, jak je atmosféra turbulentní.

Uvažujme optický svazek s Gaussovým rozložením, jež produkují běžně dostupné FSO systémy s využitím LED nebo laseru.



Obr. 7. Optický svazek s Gaussovým rozložením [18]



Obr. 8. Profil Gaussova svazku, Eliptická stopa optického svazku a její intenzitní profil pro $I_0(x) = I_0(y)$ [18]

Pak platí v dané rovině $z = konst.$ obecně následující vztah mezi optickým výkonem P a optickou intenzitou $I(x,y)$:

$$P = \int_s I(x, y) dS = \int_s I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w_x}\right)^2} e^{-2\left(\frac{y}{w_y}\right)^2} dS \quad (17)$$

Kde:

I_0 - je hustota optické intenzity v počátku souřadnicových os

- x, y - jsou souřadnice na příslušných osách
 w_x, w_y - je pološířka svazku
 dS - je element plochy

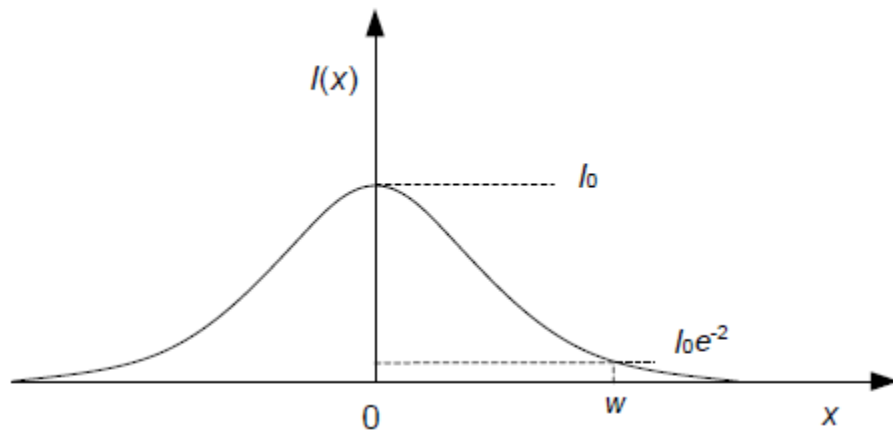
Pro zjednodušení rovnice budeme uvažovat, že stopa Gaussova svazku bude kruhová. Vztah pak bude vypadat takto:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w}\right)^2} ds = 0,5 I_0 \pi w^2 \quad (18)$$

Kde:

- I_0 - je hustota optické intenzity v počátku souřadnicových os
 x - je radiální vzdálenost od středu svazku
 w - je pološířka kruhového svazku

V případě, že není optický paprsek ovlivněn atmosférickými turbulencemi, bude jeho profil kopírovat ideální Gaussův svazek.

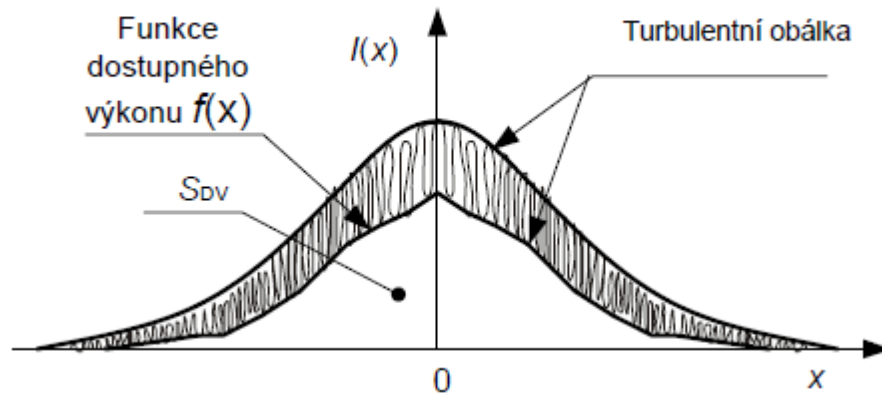


Obr. 9. Ideální Gaussův svazek (kruhově symetrický) [18]

Optická intenzita v ideálním případě bez turbulencí je pak dána vztahem:

$$I(x) = I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w}\right)^2} \quad (19)$$

V případě průchodu optického paprsku atmosférickými turbulencemi dochází k fluktuaci úrovně optické intenzity následujícím způsobem:



Obr. 10. Fluktuace úrovně optické intenzity při průchodu svazku turbulentní atmosférou [18]

Fluktuace optického signálu vytváří tzv. turbulentní obálku, která je seshora ohraničena ideálním Gaussovým svazkem, zesepa pak mírou fluktuace signálu, která v hraničícím případě může dosahovat až k ose x . [18]

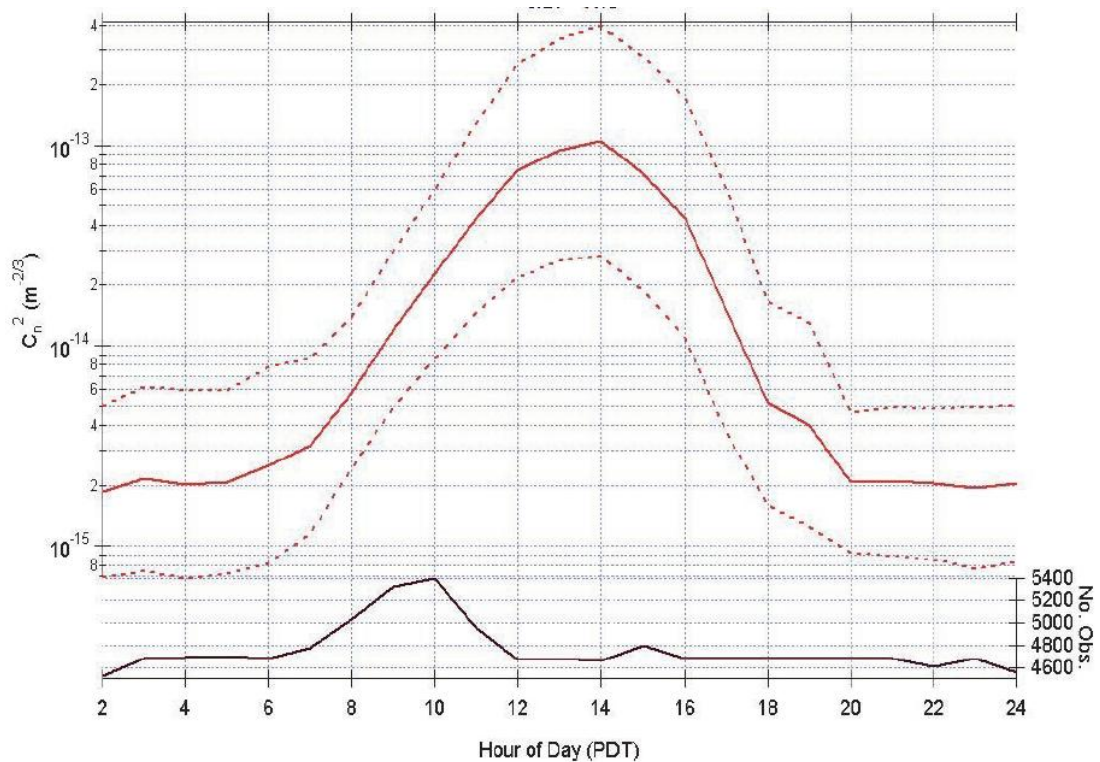
Funkce dostupného výkonu S_{DV} by pak nabývala nulové hodnoty pro všechna x . Jinak je vyjádřena takto:

$$S_{DV} = \int_x f(x) dx \quad (20)$$

V ideálním případě rozložení optické intenzity Gaussovského svazku tedy:

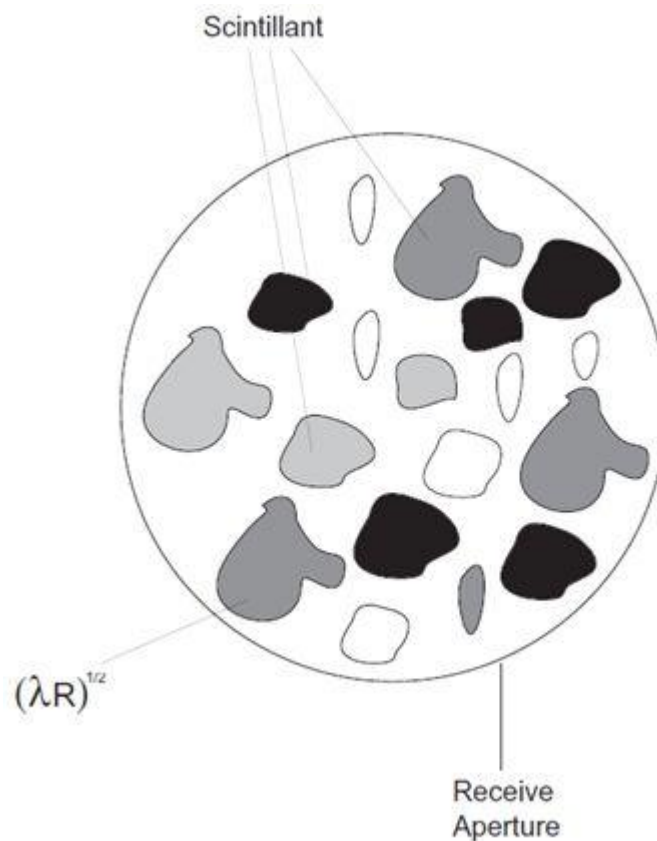
$$S_{DV} = \int_x I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w}\right)^2} dx \quad (21)$$

Na Obr.11. lze pozorovat měření parametru C_n^2 , které proběhlo v zařízení AirFiber ve městě San Diego, Kalifornii, USA. Nejdůležitějším a také nejzajímavějším zjištěním je fakt, že se tento parametr mění s denní dobou. Nejhorších výsledků, tedy nejvyšší míry vlnění, bylo zaznamenáno v poledne, kdy je teplota obecně nejvyšší.



Obr. 11. Závislost parametru C_n^2 na denní době [11]

Efekt vlnění na straně přijímací apertury je graficky znázorněn na Obr.12. Nákres představuje plochu přijímače s tmavými a světlými oblastmi, náhodně distribuovány na celkové ploše. Velikost těchto „fleků“ škáluje zhruba podle λR^2 . Z toho vyplývají dvě fakta. Za prvé, čím delší je vlnová délka, tím větší je oblast fleku. V praxi to tedy znamená, že čím méně fleků budeme detekovat na přijímači, tím menší budou i rozdíly jejich intenzit. Pokud však bude na přijímači detekován jeden velký flek, nastane nutnost velkého zvýšení vysílacího výkonu, abychom zajistili přijatelné hodnoty BER. Za druhé, velikost těchto fleků je úměrná druhé mocnině délky tohoto spojení. Delší spoj tedy bude vytvářet větší fleky, což má dopad na celkový výkon systému. [11]



Obr. 12. Efekt scilintace na straně přijímací apertury [11]

Nicméně při spojích kratších než 1km má většina FSO systémů dostatečnou dynamickou rezervu pro kompenzaci tohoto efektu. Při delších spojích nebo spojích s nižší dostupností se tento nedostatek musí kompenzovat vícenásobným vysílacím paprskem.

3.4 Útlum okenních tabulí

Jednou z výhod FSO systému je možnost jeho instalace uvnitř budovy. Odpadá tak nutnost přístupu ke střeše nebo venkovní fasádě, což někdy může být problém, pokud provozovatel linky není majitelem objektu.

I když okenní tabule umožní průchod optického signálu, vždy vzniká nějaký útlum. Číré sklo má útlum zhruba 4% pro každou plochu zejména kvůli odrazům. Pokud vezmeme v potaz běžnou okenní tabuli s dvojitým vakuově utěsněným sklem, výsledný útlum optického signálu bude zhruba 16% - tvoří jej 4 plochy, každá s 4% útlumem. Okenní tabule s jakýmkoliv přidaným povrchem (antireflexivní, kouřová, zrcadlová) tedy budou

mít daleko větší dopad na útlum optického signálu a typicky bude jejich útlum záviset na vlnové délce FSO systému. FSO technologie využívající vlnovou délku 1550nm je v tomto ohledu nejvhodnější. Před nasazením se však doporučuje změřit útlum okenní tabule a podle toho určit vhodnost takového systému. [10]

3.5 Zajištění směrové stability spoje

Navzdory obecné představě že budova je pevný nehybný bod, je vlastně jakákoliv budova nebo jiný bod upevnění neustále (i když minimálním) pohybu. To může být způsobeno více faktory, jako například tepelnou dilatací, větrem nebo vibracemi. I minimální pohyb v řádech milimetrů totiž na vzdálené straně může znamenat značnou výchylku. Z toho důvodu může u FSO systému s přísně směrovou charakteristikou vysílaného optického signálu takováto výchylka celkově přerušit komunikaci.

Největším úskalím je pohyb ve směru změny elevace a azimutu. Pohyb lineární ve směru vysílaného signálu většinou nepředstavuje problém.

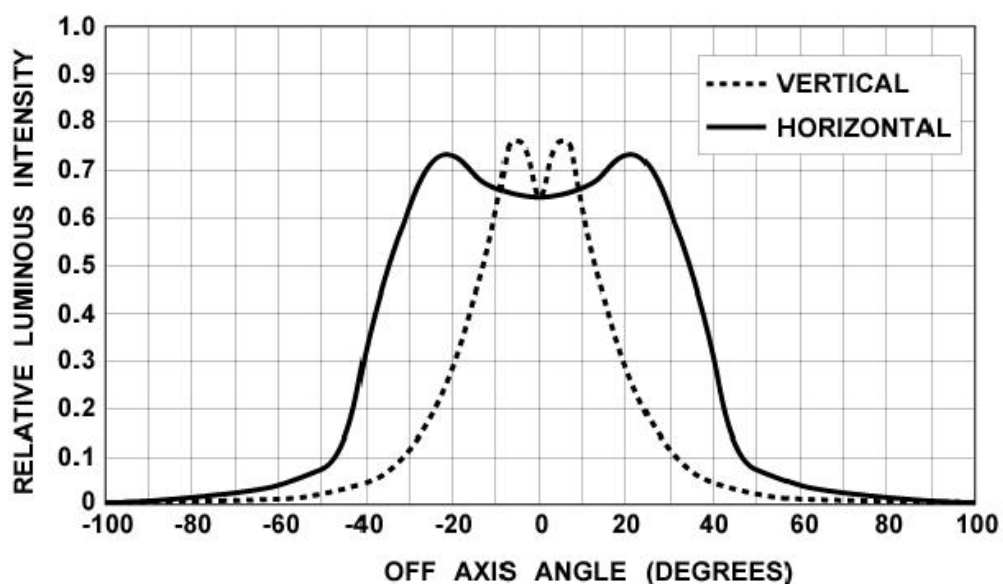
Jednou z klíčových vlastností nasazení celého systému je tedy jeho přesné nastavení pozice. Vysílač FSO produkuje velice úzký směrový optický paprsek, který musí přesně dopadat na přijímač na druhé straně. Typický vysílaný optický paprsek FSO má průměr několik centimetrů, na straně přijímače to však může být i v jednotkách metrů. Vždy záleží na vzdálenosti. Jednou z vlastností FSO systémů je, že tyto přijímače mají omezené FOV (z anglického Field Of View – tedy zorné pole). Pro správnou funkčnost FSO je velmi důležité, aby vysílaný optický paprsek i FOV přijímače byly vhodně uzpůsobeny.

FSO systémy jsou navrženy tak, aby byly odolné vůči většině možných poruch způsobených umístěním na budovu. Vhodnou kombinací divergence vysílaného optického paprsku a FOV přijímače tak dosáhneme robustnosti celého systému vhodného k většině nasazení. Někteří přední výrobci také začínají do svých zařízení aplikovat další prostředek pro zvýšení spolehlivosti, tzv. Autotracking systém, což je systém aktivního zaměřování, který automaticky upravuje směr paprsku dle potřeby. [10][11]

4 LED VS. LASER NA STRANĚ VYSÍLAČE

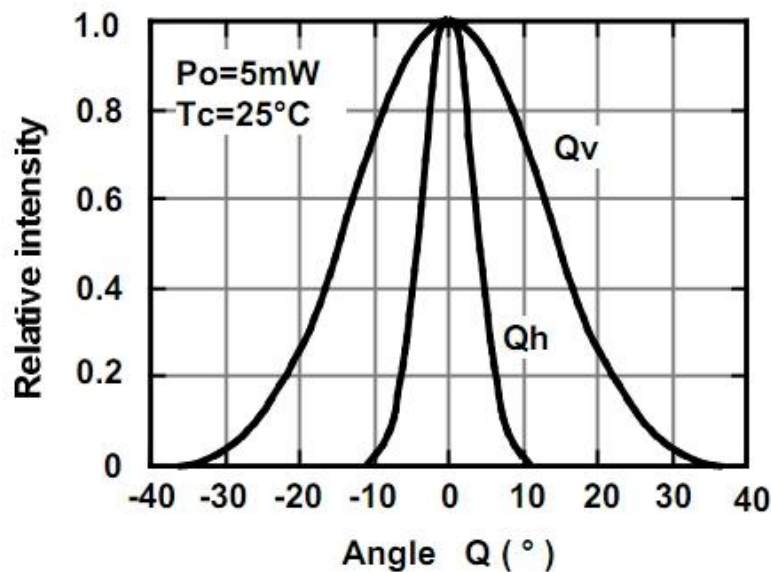
Volba použití LED diody nebo laseru pro účely FSO závisí na celkové aplikaci zařízení a parametrů, kterých chceme dosáhnout. Obě technologie mají své nesporné výhody i nevýhody ať už z pohledu ceny, výkonnosti nebo spolehlivosti.

LED dioda emituje světlo na relativně velkém povrchu $0,3\text{mm}^2$ do celé hemisféry (ve všech směrech), a to v širokém pásmu vlnových délek, uvádí se 40-100 nm. K tomu, aby se vyzařovaný úhel zmenšil, je LED zapouzdřena do těla s tvarem čočky. Jedná se tedy o zdroj multimodálního a nekoherentního světla velmi podobného obyčejné žárovce. Jeho efektivita je přibližně 10%. Vysílaný svazek LED diody není ideálním Gaussovým svazkem, ale největší pásmo světelné intenzity leží mimo osu, a to zhruba v 20° odchylce (u použité LED diody HPWT-DB00-E4000).



Obr. 13. Relativní intenzita LED

Oproti tomu u polovodičového laseru zdroj světla vzniká na povrchu $1\text{-}3\mu\text{m}^2$ a je šířen jedním směrem, a to v jedné vlnové délce. Je považován za bodový zdroj světla. Často je zapouzdřen v těle se speciální optikou. Jedná se o zdroj světla koherentního a monochromatického, jehož efektivita je 50% i více.



Obr. 14. Relativní intenzita Laser diody

Ve stručnosti jsou zde uvedeny největší rozdíly a výhody/nevýhody plynoucí z volby emitoru světla.

4.1 Spolehlivost

LED dioda je spolehlivější a robustnější prvek než polovodičový laser. LED dioda potřebuje ke svému vybuzení daleko menší proud a pracuje při teplotách, které nijak nezatěžují materiál, ze kterého je vyrobena. Je také stálá při změně okolní teploty. MMTF (střední doba poruchy) u LED diod je udávána 25 let, a to i při tropických okolních teplotách. Obvody budiče LED diody bývají díky tomu poměrně jednoduché.

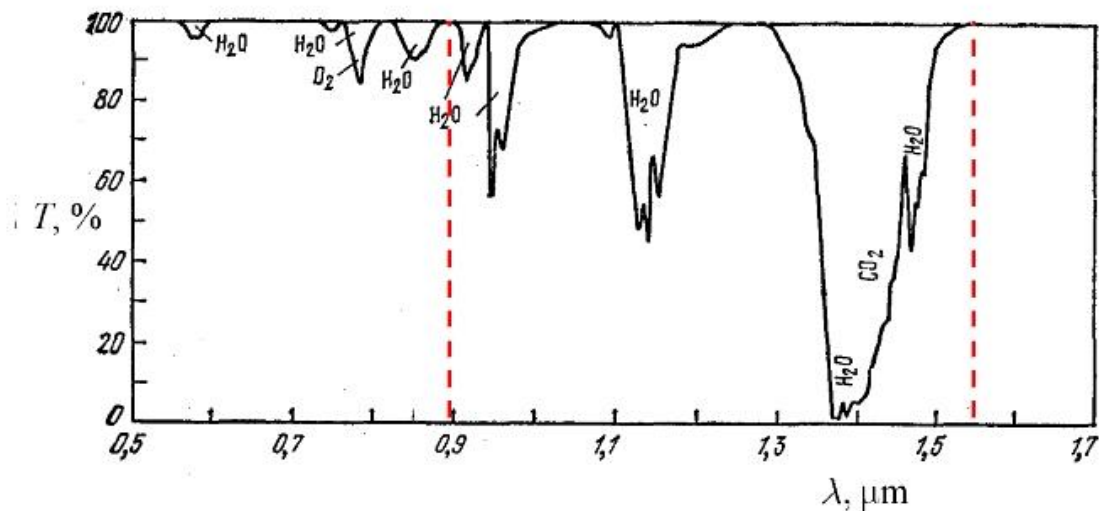
Laserové diody jsou značně závislé na okolní teplotě, a to jak z pohledu emitovaného výkonu, tak i vlnové délky. Podpůrné obvody budičů laseru tedy musí mít teplotní a výkonovou kompenzaci a jsou zákonitě složitější. Výkon laseru také s časem klesá, čímž se snižuje dynamický rozsah pojítka, i když nedojde k jeho nefunkčnosti. Výrobci vesměs neuvádí životnost svých výrobků, ale experimentálně bylo zjištěno, že životnost laseru při plném nasazení (středoevropské klimatické podmínky) dosahuje 3 let při poklesu svítivého výkonu o -6dB.

4.2 Atmosférické vlivy

Jak již bylo mnohokrát zmíněno, použitelnost optického spoje značně klesá s atmosférickými jevy, zejména s mlhou. Pokud se podíváme na závislost útlumu na vlnové délce světla, je zřejmé, že při některých vlnových délkách je atmosférické prostředí z hlediska využití FSO nepropustné, což je dáno zejména znečištěním ovzduší pevnými částicemi. Proto se nejčastěji využívá vlnových délek v tzv. „oknech“, kde je útlum při čisté atmosféře minimální (viz. Obr.15.)

Vlnová délka nekoherentního světla LED diody se pohybuje v rozmezí 50nm jeho jmenovité vlnové délky, a je vůči těmto pásmům útlumu je tedy poměrně odolná.

Na rozdíl od LED diod je emitovaný paprsek laserové diody o jedné vlnové délce a při její teplotní nestálosti hrozí, že se bude shodovat právě s vlnovou délkou pásma s velkým útlumem, což značně omezí dostupnost a kvalitu spoje.



Obr. 15. Závislost útlumu atmosféry na vlnové délce vysílače, zvýrazněny vlnové délky 900nm a 1550nm

V úvahu je třeba dále vzít skutečnost, že atmosféra není homogenní a scilintace, tedy následek tepelných rozdílů v různých oblastech vzduchu, může paprsek lámat do jiných směrů a zpětně kombinovat. Protože je laser koherentní zdroj světla, rekombinace paprsku může být konstruktivní nebo destruktivní v jakýkoliv náhodný moment, což může mít za

následek chvilkové ztráty signálu a degradaci linky. Oproti tomu LED diody s nekoherentním světlem jsou vůči tomuto jevu prakticky imunní.

4.3 Přenosová rychlost

LED diody s vysokým svítivým výkonem jsou obecně větší, než lasery s podobným výkonem. Velikost zde snižuje maximální frekvenci, kterou může být LED dioda modulována. Naopak laserové diody dokážou vyzářit vyšší výkon z menší plochy, což dovoluje rychlejší frekvence modulace, a tedy i vyšší propustnost a přenosovou rychlost. Pro rychlosti v řádech Gb/s je použití laserových diod nutností.

4.4 Dosah spoje

Větší plocha emitující světelný paprsek u LED diod dovoluje širší kolimaci světelného paprsku s menší hustotou energie. Tím je dosaženo vyšší robustnosti takového spoje při nechtěném pohybu, ale na delší vzdálenosti je paprsek již značně rozptýlen. Větší plocha LED diod také do jisté míry omezuje možnost kolimace paprsku pomocí optických čoček.

Laserová dioda naopak produkuje směrový, méně rozbíhavý paprsek, který je často již zapouzdřen s kvalitní optickou čočkou, a tím je dosaženo možnosti většího dosahu spoje. Pro velké vzdálenosti jsou ovšem kladeny vysoké nároky na preciznost optiky a stabilitu mechanismu.

4.5 Výkon / cena

Systémy využívající LED diod jako emitorů světelného paprsku mají mnoho výhod. První z nich je bezesporu cena. Na optický sub-systém není kladen takový nárok a stejně tak obvody budiče LED diod jsou poměrně jednoduché. LED diody jsou sice méně efektivní (10% oproti 50% u laseru) a potřebují více energie, nicméně při srovnání s laserovou diodou a nutností její teplené a výkonové stabilizace, vychází systém s LED diodou cenově výhodněji. Laser nabízí vyšší přenosové rychlosti a větší dosah, tyto přednosti jsou však vykoupeny značnými nároky na kvalitu optiky a řídicích obvodů celkově. [17][22]

Tab. 1. Srovnání nejdůležitějších vlastností LED a laseru

Vlastnosti	LED	Laserová dioda
Modulační rychlost	<300MHz	1GHz a více
Výkon	Závislý na rychlosti, typicky 40mW	řádově 100mW, lze opticky zesílit
Optická šířka pásma	40-100 nm	<1 nm
Filtr na přijímači	širokopásmový, vyšší šum	úzkopásmový, nižší šum
Zdroj světla	nekoherentní, neruší se	koherentní, může docházet k rušení
Min. divergence paprsku	široká, 0,5° způsobeno velikostí LED diody	úzká, 0,01° pokud je vestavěn s precizní optikou
Životnost	Vysoká životnost s minimální degradací výkonu	Střední životnost, výkon degraduje s časem
Teplotní závislost	Minimální závislost na teplotě	Vysoká závislost na teplotě
Řídící elektronika	Jednoduše modulovaný proudový zdroj	Řídící elektronika s teplotní a výkonovou stabilizací
Cena	Nízká, dostupná optika i elektronika	Vysoká, nutnost precizních optik a kompenzačních obvodů

5 FSO A OCHRANA ZDRAVÍ

S rychlým rozšiřováním FSO komunikačních systémů v obydlených oblastech vzniká i potřeba zajistit, aby vysílaný optický paprsek nebyl zdraví škodlivý, zejména aby nepoškodil oční rohovku nebo jinak neohrožoval obecné zdraví. Systémy FSO, tedy bezpodmínečně musí být navrženy tak, aby byly zdraví neškodné i při přímém pohledu do paprsku nebo dopadu na kůži. Legislativně je toto ošetřeno **Nařízením vlády ze dne 22. listopadu 2000 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením - Předpis č. 480/2000 Sb** ve které je u použitých zařízení stanoven maximální vyzářující výkon. Nebezpečí poškození zraku je zde mimořádně vysoké, a na rozdíl od pokožky bývá často trvalé. Oko má totiž tu vlastnost, že dokáže ostřit a koncentrovat světlo na jeden bod na rohovce. Toto riziko vzniká zejména při použití laserových diod, proto se další text vztahuje k laseru jako zdroji modulovaného paprsku.

Stejně jako sluneční záření, i laserové záření dopadá na přijímač (oko) v podobě paralelních paprsků, které podle jejich vlnové délky oční čočka soustředí na rohovku, na jejímž povrchu se nacházejí buňky citlivé na světlo. Stejně tak, jako přímý pohled do plného slunečního záření, i paprsek laseru o dostatečném výkonu může zrak značně poškodit.

V různých částech oka dochází k pohlcování různých vlnových délek dopadajícího světla, což chrání oko před poškozením. Záření je pohlcováno za pomoci rozkladu proteinů a jiných látek, čímž se spotřebovává tato světelná energie. Větší dávky nevhodného záření způsobují slzení, zvýšení teploty a tlaku v oku, záněty apod. Při extrémní intenzitě pak může oko utrpět nevratné poškození.

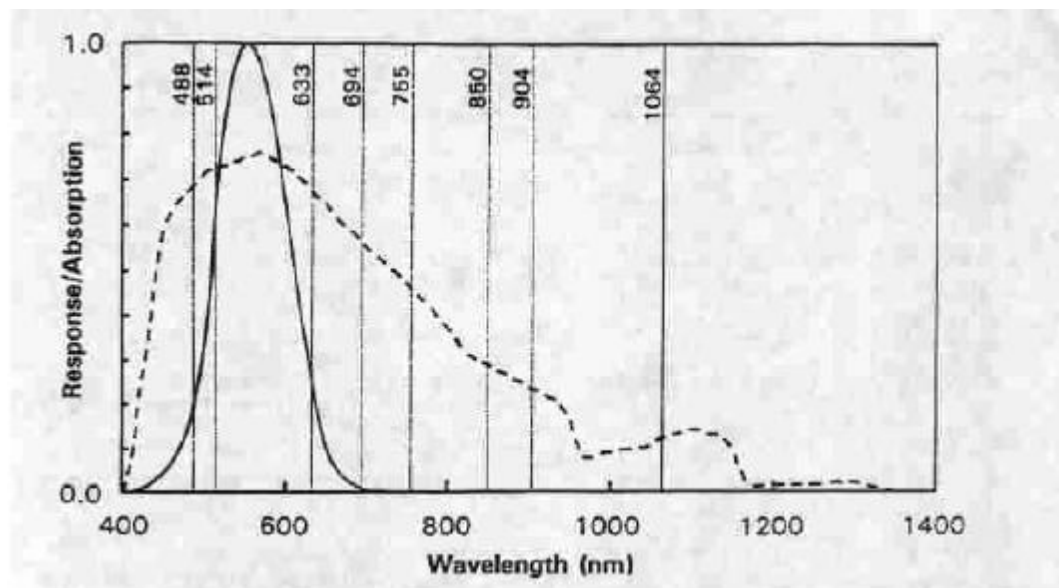
Lidské oko vnímá záření o vlnové délce 400 – 700nm, ale propouští záření až do 1400nm.

100 - 315nm - dochází k absorpci převážně v rohovce, zbytek je rozptýlen v komorové vodě.

315 – 400nm - se absorbuje v čočce za pomoci přeměny proteinu

400 – 1400nm - prochází skrz čočku a dopadá na sítnici, kde při velké intenzitě může způsobit i vážné poškození. Viditelné světlo 400-700 nm je oko schopné během 0,25 s zredukovat pomocí panenky na snesitelné množství, ale na kratší vlnové délky již nedokáže tak rychle zareagovat.

více než 1400 nm – je absorbováno v rohovce a způsobuje silné slzení a zvyšování teploty a tlaku komorové vody



Obr. 16. Citlivost lidského oka na vlnovou délku (plná čára – viditelné světlo, čárkovaná čára – celkově absorbované světlo)

5.1 Klasifikace laseru

Dlouhodobé studie působení slunečního záření a laserového záření na lidský organismus stanovily bezpečné limity působení elektromagnetického záření na lidský organismus, které vyjadřují jejich maximální možné působení. Pro každé laserové zařízení je vyžadována certifikace dle jednotlivých kategorií použití. Kategorie určuje použití laseru dle třídy (Class) a specifikuje standardní bezpečnostní zábrany tak, aby eliminovaly nebo omezily možnou újmu na zdraví.

Následuje popis 4 hlavních kategorií tříd použití laseru. Výrobce laseru je odpovědný za zařazení systému v souladu s postupy uvedenými v ČSN EN 60825-1 (a jejich změnách). Všechny lasery jsou zařazeny do jedné ze sedmi klasifikačních tříd uvedených níže: [20]

1. **Třída 1.** Lasery, které jsou bezpečné za provozních podmínek, které lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, včetně podmínek sledování svazku pomocí optických přístrojů.

2. **Třída 1M.** Lasery vyzařující v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 4 000 nm, které jsou bezpečné za provozních podmínek, které lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, ale mohou být nebezpečné, jestliže uživatel použije pro sledování uvnitř svazku optické přístroje.
3. **Třída 2.** Lasery vyzařující viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm, u kterých je ochrana zraku za normálních okolností zajištěna fyziologickými reakcemi zahrnujícími i mrkací reflex. Tato reakce může být považována za dostatečnou pro zajištění adekvátní ochrany za provozních podmínek, které lze předpokládat s dostatečně velkou pravděpodobností, včetně použití optických přístrojů pro pozorování uvnitř svazku.
4. **Třída 2M.** Lasery vyzařující viditelné záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm, u kterých je ochrana zraku za normálních okolností zajištěna fyziologickými reakcemi zahrnujícími i mrkací reflex. Ale sledování výstupu laseru může být daleko nebezpečnější, jestliže uživatel použije pro sledování uvnitř svazku optické přístroje.
5. **Třída 3R** (do roku 2001 označována 3A). Lasery vyzařující v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 10^6 nm, u kterých je přímé sledování uvnitř svazku potenciálně nebezpečné, ale riziko je menší než u laserů třídy 3B. Rovněž je pro ně požadováno menší množství výrobních požadavků a kontrolních hodnot pro uživatele než u laserů třídy 3B. Přípustná mez záření (AEL) je pětinašobkem přípustné meze záření AEL pro třídu 2 v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm a pětinašobkem přípustné meze záření AEL pro třídu 1 pro ostatní vlnové délky.
6. **Třída 3B.** Lasery, u kterých je za normálních okolností nebezpečné, jestliže dojde k přímému ozáření svazkem (ve jmenovité vzdálenosti s nebezpečím poškození zraku NOHD). Sledování difúzních odrazů je za běžných podmínek bezpečné.

7. **Třída 4.** Lasery, které jsou schopny produkovat nebezpečné difúzní odrazy. Mohou způsobit poškození pokožky a vznik požáru. Jejich používání vyžaduje mimořádnou pozornost.

V praxi se u FSO systémů setkáme pouze s lasery **Třídy 1** a **Třídy 1M**. Z výše uvedených rozdělení vyplývá, že takovýto paprsek laseru třídy 1 nezpůsobuje žádné poškození zraku při jakémkoliv pozorování. Použití laseru Třídy 1M nezpůsobuje při jakémkoliv pozorování jeho paprsku poškození zraku, s výjimkou použití optických pomůcek (jako např. dalekohled)

6 ARCHITEKTURA FSO SÍTÍ

FSO systémy mohou být navrženy k nasazení do jakékoliv topologie, jmenovitě PTP, MESH, PMP, a RING. To dává provozovatelům resp. poskytovatelům tohoto spojení volnost k rozšiřování své sítě.

6.1 (Multi) Point-to-Point architektura

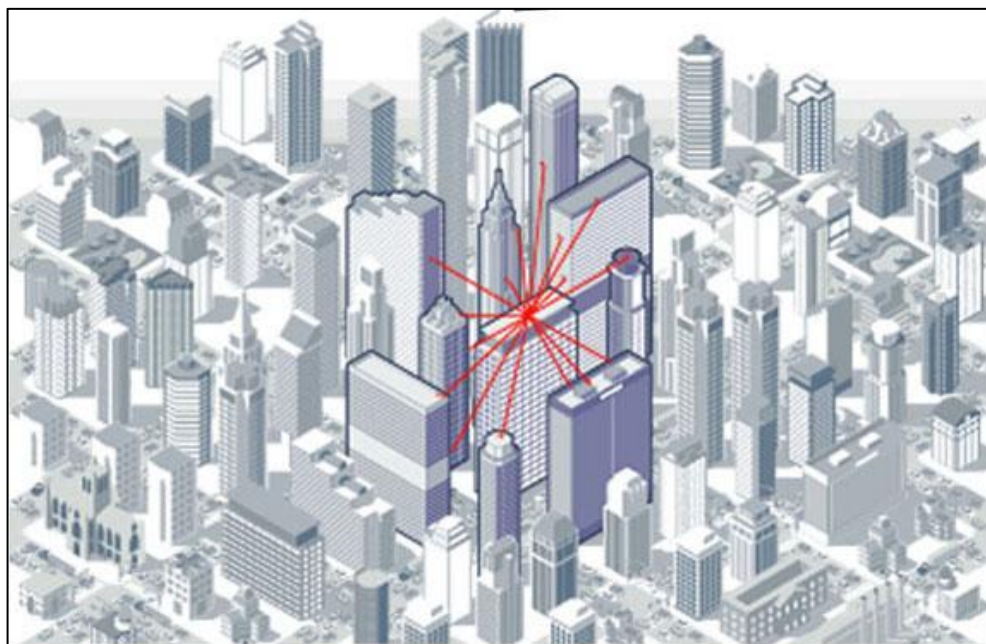
PTP architektura je elementární spojení pro všechny ostatní architektury. Vytváří se zde jednoduché spojení dvou bodů. V případech, kdy je třeba rozšířit konektivitu na vzdálenější bod, který nejsme schopni zajistit PTP spojem, je možné PTP spojovat do MPTP (viz *Obr.17.*)



Obr. 17. Architektura (Multi) Point-toPoint [10]

6.2 Point-to-Multipoint architektura

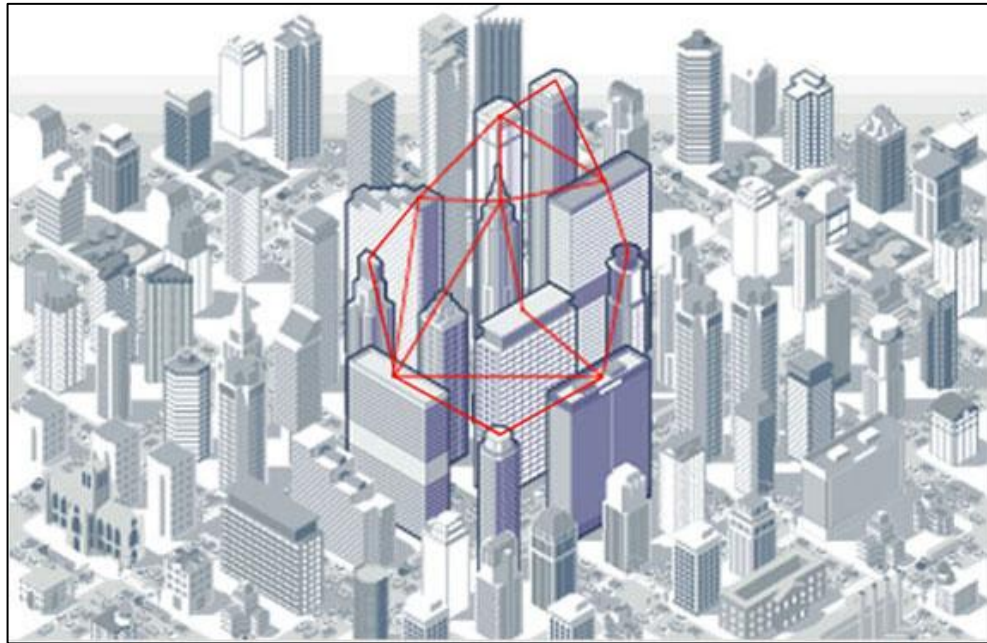
PMP architektura je založena na klasické buňkové struktuře sítě, kdy se jednotlivé uživatelské stanice připojují přímo ke stanici základnové. Pro každý takovýto FSO spoj je ale nutné mít v centrálním bodě přijímač i vysílač. Nevýhodou takového řešení je prostorová náročnost, kdy se bude v jednom bodě nacházet více linek do více směrů a celkově problematická správa. V praxi se tedy v podstatě nepoužívá.



Obr. 18. Architektura Point-to-Multipoint [10]

6.3 Mesh architektura

Struktura MESH sítí se skládá z více propojených uzlů s určitou redundancí. V takovéto síti je každý uzel napojen na ostatní uzly buďto přímo nebo pomocí “skoků“ skrze další uzly. Míru redundance určuje počet nadbytečných spojů k dalšímu uzlu. Čím větší redundance se v síti vyskytuje, tím je systém robustnější / kvalitnější. Mesh sítě nabízí vysokou spolehlivost a jednoduchost přidání dalších uzlů, ale jsou omezeny vzdáleností jednotlivých uzlů.



Obr. 19. Architektura MESH [10]

6.4 Porovnání architektur

Pokud budeme porovnávat různé architektury, MESH je jedinou architekturou, která nabízí vysokou dostupnost a spolehlivost. To je zajištěno redundancí spojů a uzlů, které v případě výpadku nebo poruše převezmou a přesměrují komunikaci. Její škálovatelnost je spolu s kruhovou architekturou nejvyšší a nové uzly lze relativně snadno přidávat. Na druhou stranu je tato technologie také nejdražší, jelikož představuje nutnost vybudování vícenásobných linek ke spojení se sousedícími uzly. Přenosové pásmo je zde sice sdíleno, ale lze jej rozšířit přidáním dalšího uzlu.

V případě PTP spojů získáváme celou šířku pásma pro komunikaci mezi spojenými stranami. Také nevyžadují žádnou komplexní architekturu nebo plánování. Jednoduchou nesdílenou linkou tedy vytváříme spojení pouze dvou bodů. Tato architektura je v dnešní době nejvíce využívána, právě pro potřeby jednoduchých spojů.

PMP architektura nabízí centralizaci řízení sítě, ale její použití znamená rovněž nízkou škálovatelnost, celkovou náročnost řešení a v případě výpadku jednoho ze spojení, nemožnost jeho přesměrování.

Kruhová topologie nabízí část výhod MESH a PTP technologie. Nové uzly se stejně jako v MESH přidávají relativně snadno, šířka pásma se ale s přidávajícími uzly snižuje.

Při vysokých objemech dat se tedy může vyskytnout problém. V případě výpadku jednoho uzlu je však vždy následující uzel spojen s jiným (ve smyslu přerušného kruhu). Konektivita i při výpadku jednoho z uzlů je tedy zachována.

FSO dnes nejčastěji využívá PTP spojení, což většinou řeší nutnost delších spojů v městské zástavbě při jinak zahlceném RF pásmu. Jednoduchost a nenáročnost řešení je zde prioritou. Sítě MESH zde vytváří další prostor pro využití FSO systémů vedle běžných RR spojů. Tato architektura zajišťující spolehlivost a jednoduchost rozšíření je zajímavá zejména pro providery. [21]

7 BEZPEČNOST FSO SYSTÉMŮ

Obecně jsou bezdrátové systémy vnímány jako méně bezpečné než kabelové spoje. Ve skutečnosti je FSO spoj daleko bezpečnější než RR nebo jiné bezdrátové radiové technologie. Důvody jsou zřejmé:

- Laserový paprsek nelze zachytit spektrálním analyzérem ani RF metrem
- Úzký svazek paprsku nelze jednoduše napojit, je nutné mít stejný přijímač a vhodně jej umístit aniž by došlo k narušení či přerušení spoje
- Generovaný svazek vysílače je zpravidla neviditelný (podle zvoleného typu vysílače) a velice úzký, což jej činí velice těžce zjištěitelným a ještě hůře napojitelným
- Data mohou být dále kódována pro ještě vyšší stupeň bezpečnosti

Je zřejmé, že takovýto úzce směrový paprsek bude těžké, ne-li nemožné, aktivně odposlouchávat. Bezpečnost takového přenosu dat je tedy už z principu vysoká. U klasických elektromagnetických (např. Wi-Fi) způsobů šíření signálu hraje otázka zabezpečení velkou roli. Vlny se totiž šíří prostředím ve všech směrech a tedy i odposlouchávání takového systému může být velice diskrétní a nenápadné. Oproti tomu u FSO systému není možné komunikaci narušit nebo odposlouchávat jinak, než fyzickým „napojením“ paprsku. To ovšem představuje vysokou náročnost, jelikož paprsek je zpravidla velmi úzký a samotné vysílače se nacházejí často ve vysokých výškách. Další překážkou je skutečnost, že vlnová délka paprsku nemusí být běžnou technikou zaznamatelná a už vůbec ne viditelná. Narušení by představovalo fyzicky nainstalovat do cesty paprsku propustné zrcadlo, a to tak, aby se nepřerušil vysílaný paprsek. FSO zařízení jsou totiž často navržena tak, že pokud dojde k přerušení jednoho z paprsků, druhý přestane vysílat a automaticky se přepne do tzv. samo-opravovacího módu. V tom případě nejsou vysílána žádná data, která by mohla být zneužita.

S možností odposlouchávání optického signálu úzce souvisí rozptyl paprsku. Ten se totiž se zvětšující se vzdáleností od vysílače kuželovitě rozšiřuje. S úspěchem se této vlastnosti využívá při optických spojeních na delší trasy, kdy i nepatrný pohyb báze na straně vysílače znamená na vzdálenosti 1km vychýlení paprsku i o jednotky metrů. Pokud tedy bude přijímaný paprsek o dostatečném průměru (tedy rozptýlen), lze tento problém

eliminovat, jelikož při jeho větším rozptylu i nadále zčásti dopadá na přijímač. Stejně tak ale dopadá paprsek i na okolí přijímače, kde může být potenciálně zneužit. V praxi se u levnějších řešení využívá právě rozptylu kužele paprsku k eliminaci pohybu vysílače, u dražších se využívá samo-naváděcího pomocného paprsku a podpůrné elektroniky k zachování úzkého paprsku a přesného zaměření na přijímací stranu.

Jediným možným způsobem jak jednoduše zachytit optický paprsek je instalace přijímače za nynější přijímač a využít tak signálu, který překrývá okolí přijímače. Za předpokladu, že budeme znát veškeré informace o signálu a jeho kódování (resp. použijeme totožný přijímač), budeme schopni odposlechnout jednu stranu přenosu. K obousměrnému odposlouchávání by se analogicky musel nainstalovat přijímač i na druhou stranu linky. Omezení této možnosti odposlechu je opět otázkou uzpůsobení dopadajícího kužele optického signálu, popřípadě vhodnou instalací, kde zbytkový signál bude dopadat na zeď nebo jinou bezúrazovou plochu. Taktéž můžeme přijímač instalovat uvnitř budovy (za sklem), kde odposlech „zpoza“ přijímače opět nehrozí.

V neposlední řadě je také třeba zmínit, že optický přenos informace je ideálním nosičem pro aplikaci kvantového šifrování. Na rozdíl od klasické kryptografie s použitím víceméně známých matematických metod, využívá kvantová kryptografie zákonů fyziky, konkrétně pak kvantové chování jednotlivých fotonů světla, které je založeno na principu nejistoty. Této metody se využívá zejména pro distribuci klíčů, kdy nám zaručuje spolehlivé a bezpečné vytvoření tajného klíče mezi oběma stranami. Jakékoliv narušení toku informace, tedy odposlechu, přenášeného samotnými fotony by pak znamenalo změnu stavu a tedy snadnou detekci na straně přijímače. Kvantového šifrování (resp. hybridního šifrování) se dnes v omezené míře využívá u přenosu dat optickými kabely. Omezeného zejména kvůli jeho finanční náročnosti. Návrh vysílače a přijímače ve smyslu FSO je dnes velice náročný, vezmeme-li v úvahu všechny vlivy, které na optický systém ve volném prostoru působí. I přesto se do kvantové kryptografie vkládají velké naděje pro řešení vysoké bezpečnosti v komunikačních sítích. [23]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 RONJA TERAPOLIS

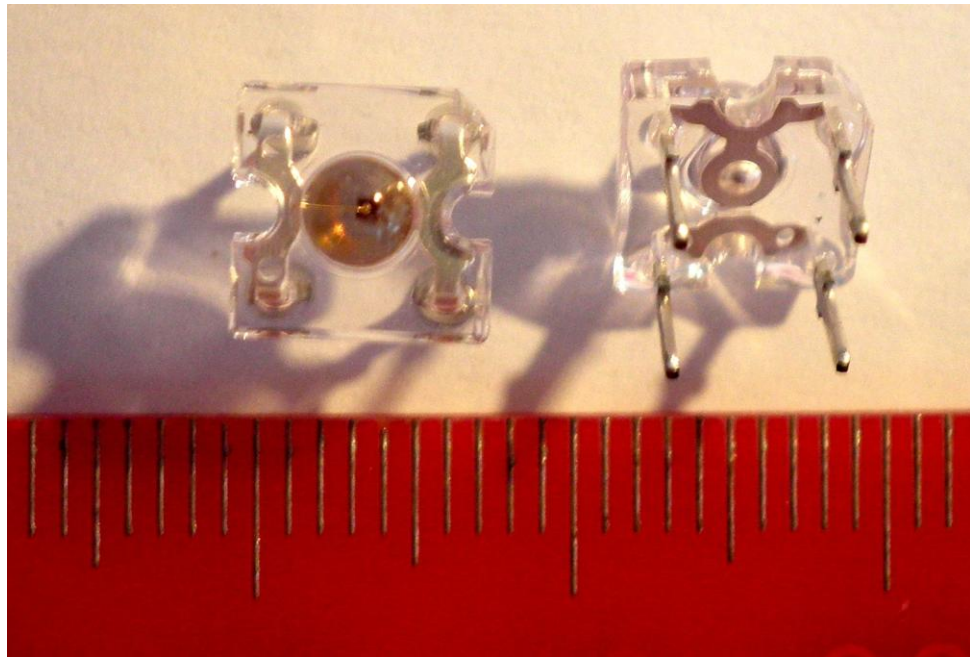
Ronja Tetrapolis je zařízení pro optickou komunikaci rychlostí 10Mbps full-duplex na vzdálenost až 1,4km ve volném prostoru. Tento projekt je založen pod GPL / GNU licenci a jeho myšlenkou je nenáročná konstrukce za pomoci běžně dostupných součástek. RONJA pojítka poskytuje i na dnešní dobu poměrně rychlý a bezpečný přenos dat v bezlicenčním pásmu viditelného světelného spektra za předpokladu přímé viditelnosti.

Tab. 2. Přehled vlastností Ronja Tetrapolis

Přenosová rychlost	10 Mbps, full-duplex, half-duplex		
Maximální vzdálenost	1.4km s použitím 130mm čoček.		
Minimální operační vzdálenost	1/15 nominální vzdálenosti. (lze ještě snížit úpravou součástek v přijímači)		
Datové rozhraní	10BaseT UTP - RJ45 konektor		
Spotřeba el. Energie	285mA @12VDC (3.42W)		
		Typická	Maximální
	Idle	185mA	245mA
	V plné zátěži (oba směry)	225mA	285mA
Vlnová délka	viditelná, 625nm (červeno-oranžová), 100nm spektrální rozptyl		
Optický výkon	17.2mW		
Divergence optického svazku	1.9mrad (s použitím 130mm čoček)		
Operační teplota	0 až +70°C (venkovní část - optické hlavice, RX, TX), 0 až +55°C (vnitřní část – Twister2)		
Operační vlhkost	100% (kondenzující) s vyhříváním čoček, 95% bez vyhřívání čoček		
Váha	15.5kg (jedna strana linky, závislá na zvolené konstrukci)		
Požadovaná viditelnost	min. 4km pro maximální dosah		
Optická modulace	BPSK		
Indikace pomocí LED	Napájení, Přijímání paketu, Vysílání paketu		
Zaměřovací systém	Visuální, RSSI		
Bezpečnost	Ve shodě s 480/2000 nařízením vlády o ochraně zdraví a neionizujícím záření		

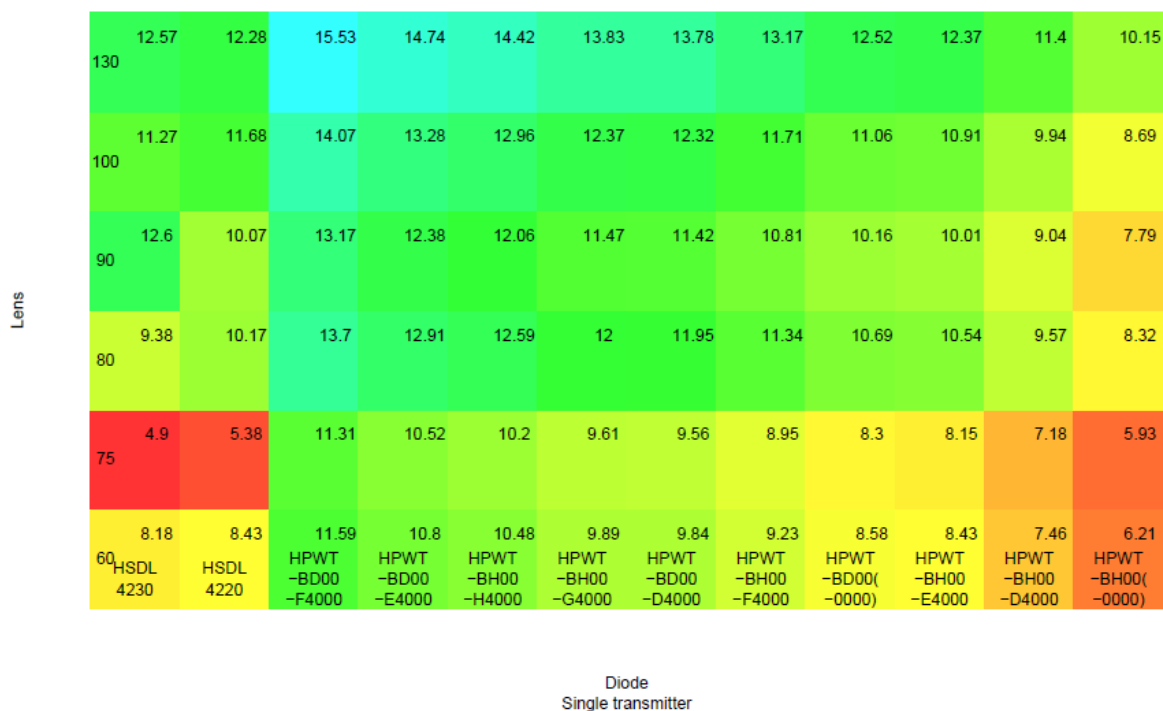
Při vhodné volbě vysílací LED diody a vysílací apertury je možné Ronju provozovat v ideálních podmínkách až na vzdálenost 1,4km. Pro správnou volbu apertury je třeba vycházet z několika vstupních parametrů:

- Vhodná volba vysílací LED diody, což je zejména otázka její dostupnosti (nejlepší typ F4000 je dnes bohužel nesehnatelný)
- Vzdálenost, na kterou bude linka provozována
- Při jaké viditelnosti bude linka provozována



Obr. 20. Vysílací LED dioda HPWT-BD00-E4000

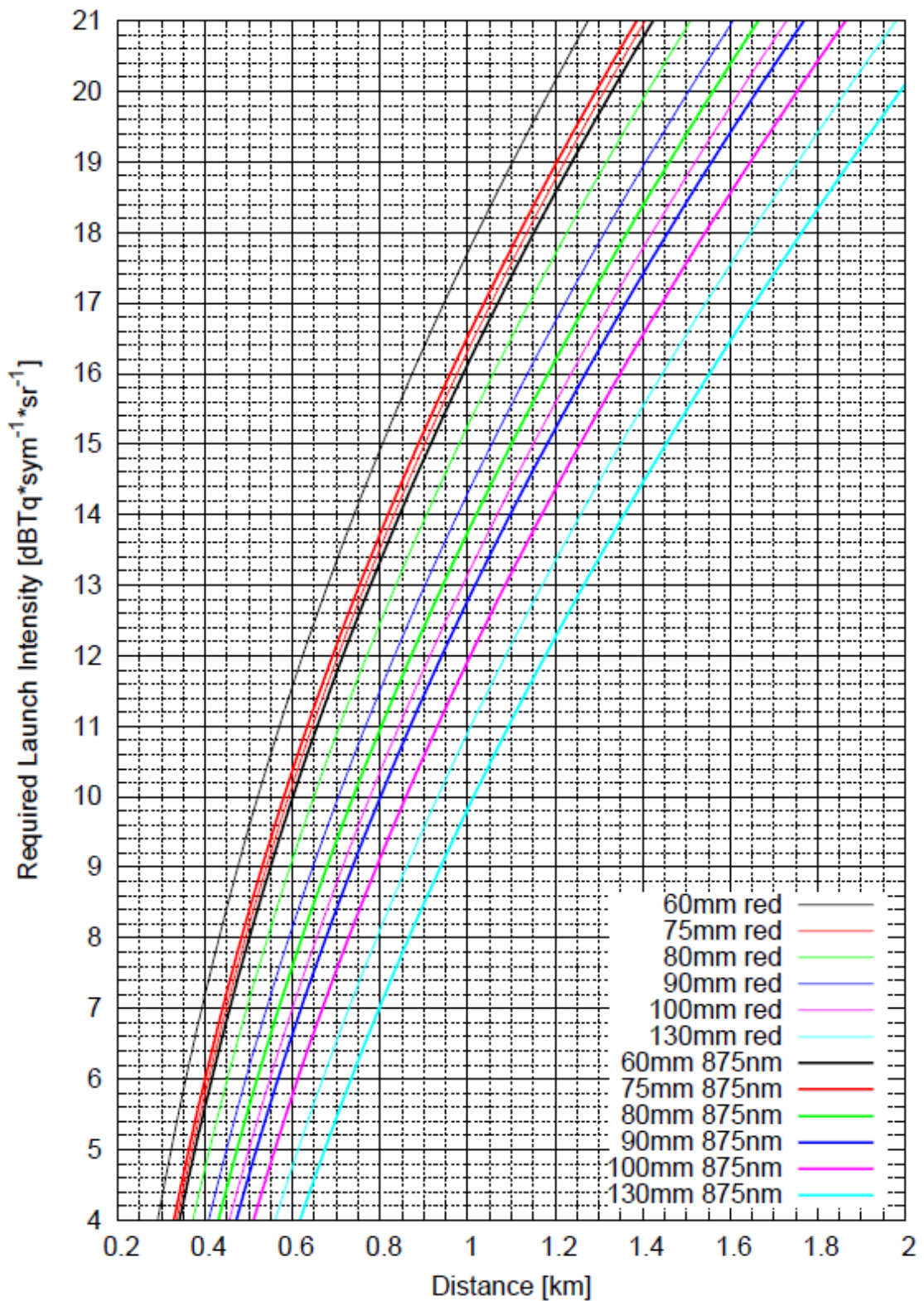
Pro použitou LED HPWT-BD00-E4000 a čočku 100mm zjistíme její vysílací intenzitu ($dB Tq * sym^{-1} sr^{-1}$) z následujícího grafu:



Obr. 21. Vysílací intenzita ($dB Tq * sym^{-1} sr^{-1}$) pro různé kombinace LED a čočky [dB] [26]

Vysílací intenzita pro zvolenou kombinaci LED diody a 100mm čočky je 13,28dB. Dále pomocí této intenzity lze odhadnout dosah linky.

Pro odhad dosahu linky se vychází z následujícího grafu:



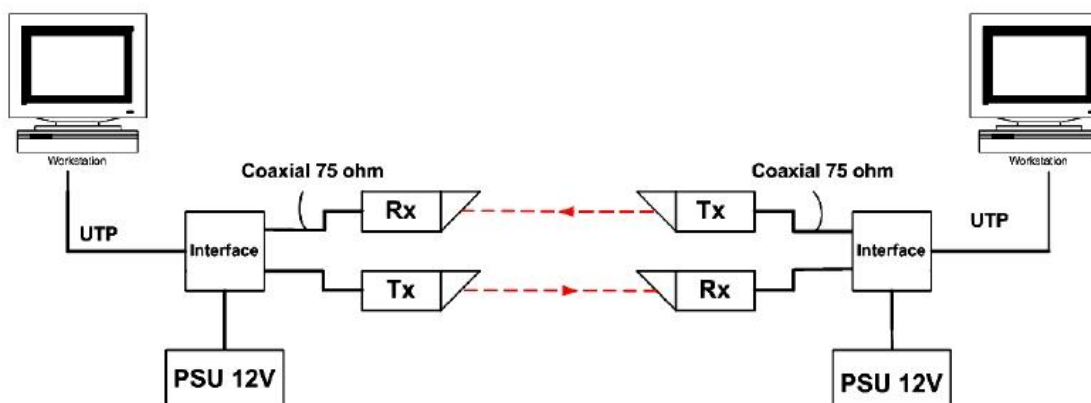
Obr. 22. Požadovaná vysílací intenzita vs. dosah (4km viditelnost = 4.25 dB/km) [26]

Pro viditelnost 4km při útlumu 4,25dB/km je maximální dosah linky 1km. Z dalších dostupných grafů lze odhadnout dosah pro nižší viditelnost, pro přehled zpracováno v následující tabulce:

Tab. 3. Maximální dosah při zvoleném průměru čočky

HPWT-DB00-E4000				
viditelnost [m]	útlum [dB/km]	dosah [m] 90mm čočka	dosah [m] 100mm čočka	dosah [m] 130mm čočka
4000	4,25	850	1000	1300
2000	8,5	650	750	980
1000	17	500	550	680
500	34	340	380	440
200	85	190	210	240
100	170	120	130	145
50	340	70	77	87

Jelikož je zařízení full-duplexní, tzn. že v jednom okamžiku může vysílat i přijímat, skládá se každá strana linky z totožných modulů. Těmi jsou vysílač (TX), přijímač (RX) a interface rozhraní (Twister2). Tyto moduly jsou navzájem propojeny 75Ω koaxiálními kabely a napájeny z interface zdrojem 12V. TX a RX moduly jsou součástí optických hlavic a modul rozhraní se zde stará o rozdělení přijímaného/vysílaného signálu a také slouží jako prostředník pro připojení PC nebo switche, což je řešeno standardním UTP RJ-45 konektorem.

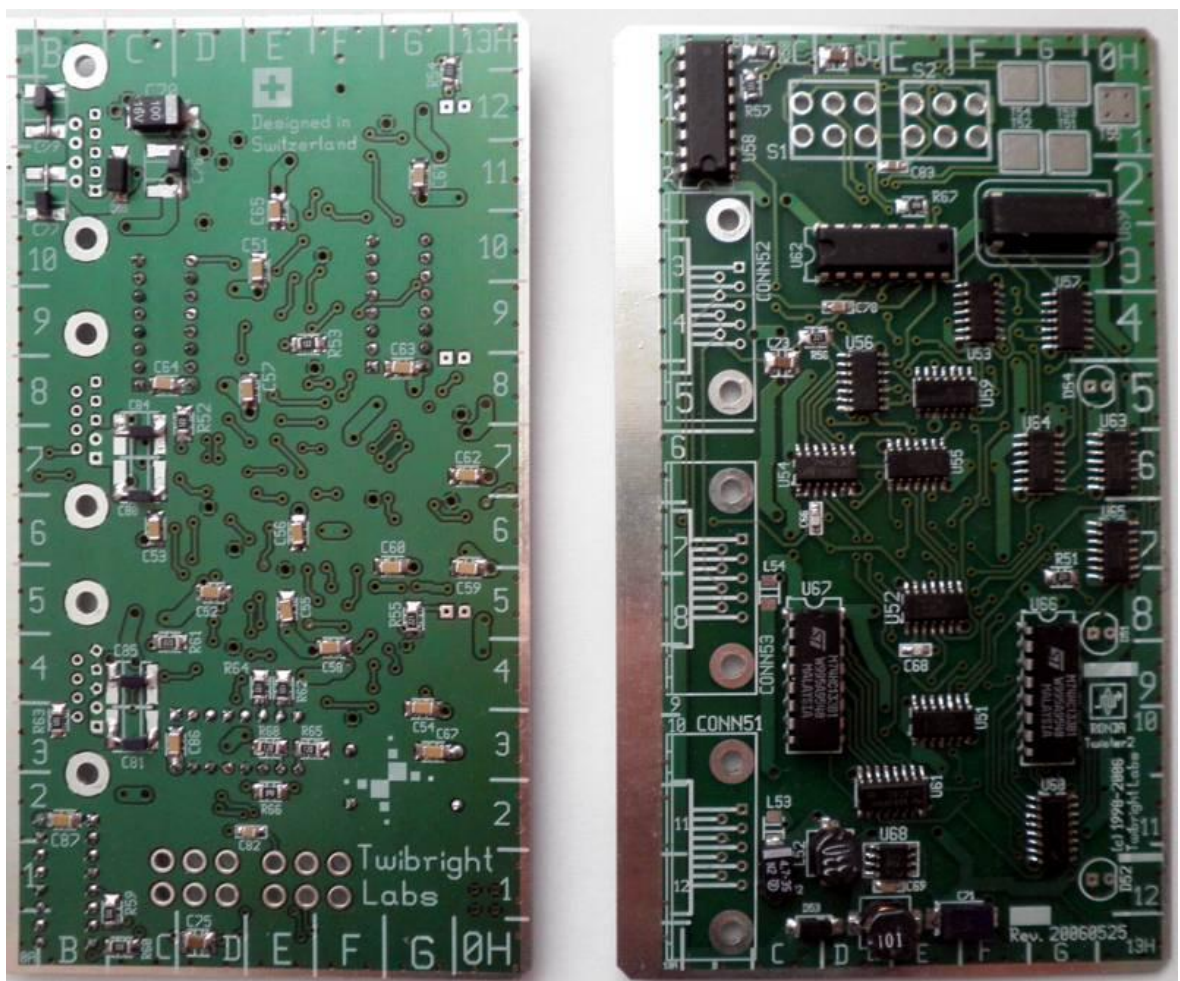


Obr. 23. Blokové schéma Ronja Tereapolis

8.1 Twister2

Twister2 je rozhraní mezi PC (switchem) a RX/TX moduly. Jeho úkolem je přidání signálu o frekvenci 1MHz do mezer mezi jednotlivými vysílanými rámcí pro vysílání a jeho zpětná filtrace při příjmu. Tento 1MHz signál je přítomen i u jiných optických Ethernet zařízení, u kabelových spojů nikoliv. Důvodem přidání tohoto signálu je udržení definované DC hodnoty signálu a odfiltrování přijatého šumu před jeho následným zesílením. Bez tohoto signálu by přenos nefungoval a pakety by se náhodně ztrácely. 1MHz signál je získáván z krystalového oscilátoru 16MHz děličkami.

Deska plošného spoje je oboustranná s množstvím propojek, součástky jsou převážně typu SMD. V konečné fázi je modul umístěn v pocínované VF těsné krabici.



Obr. 24. Osazené moduly Twister2

8.1.1 Blok vysílače

Přijímací část Twisteru2 přijímá data z kabelového UTP (T53, T54) na vstup diferenčního zesilovače (U62), který jej převádí na logické hodnoty. U54 slouží jako zásobník. Kondenzátor C66 a rezistor R52 nahrazují náběžné hrany v signálu krátkými H impulsy, vše ostatní L impulsy. (H jako HIGH pro log 1 a L jako LOW pro log 0). U52 pouze invertuje signál. Kaskáda U63-U65 rozlišuje, zda byl přijat paket a také odstraňuje synchronizační puls ze signálu. Pokud je přijímaný signál kratší než 250ns, pak je výstup permanentně v log 0. „Manchester“ signál má maximální délku zaváděcího pulsu 200ns. Ticho mezi pakety je dlouhé nejméně 9600ns.

Pulsy integrity linky by zde spustily falešné přijetí paketu, proto se zde pomocí U64 a U65 filtrují. Myšlenkou tohoto systému je, že pokud budeme přijímat velmi rychlé signály (pulsy), slijí se ve výsledku do stejnosměrné hodnoty. Naopak pokud budou pulsy s dostatečným časovým odstupem, bude zachována jejich frekvence.

Krystalový oscilátor U69 vyrábí hodiny o taktu 16MHz, který je následně dělen binární sčítačkou U59. Signál je následně multiplexován pomocí U54 a U56, který slouží i jako budič koaxiálního kabelu. TX indikátor D54 pak svítí, pokud je vysílán paket. V hustém síťovém provozu bude pro lidské oko neustále svítit, ve skutečnosti však blikat s každým prodlením mezi samotnými rámci. [26]

8.1.2 Blok přijímače

Na straně přijímače rozhraní Twister2 jsou data přijímána z koaxiálního kabelu na U62 a kaskádou zesilovačů šířky pulsu U51 a U53 rozlišujeme, zda je přijímán paket nebo ne.

Hodinový signál 16MHz je dělen 2^{18} (262,144) pomocí U60 a U61 a linkový integritní puls, který trvá 125ns (2 cykly hodinového signálu) a opakuje se každých 16,384ms je dekodován z binárního čítače. Polarita dekodéru je zvolena tak, že zvlnění přenášené čítači nemůže způsobit špatné dekodování.

Čítače integrity linky jsou resetovány po dobu přijímání paketu. Jakmile příjem paketu skončí, čítače se spustí až do chvíle prvního impulsu (16,384ms). To zabraňuje generování nekompletního impulsu nebo chyby, pokud by se impuls náhodně střelil do paketu.

Signál integrity linky je multiplexován namísto přijímaného 1MHz signálu multiplexery U55 a U54. Signál přijatého paketu je použit jako řídicí signál multiplexeru.

Budič kroucené dvojlinky (UTP kabelu) U58 je zapojen v tandemu tak, aby mohl generovat 3 úrovněový výstupní signál – pozitivní, negativní a nulu.

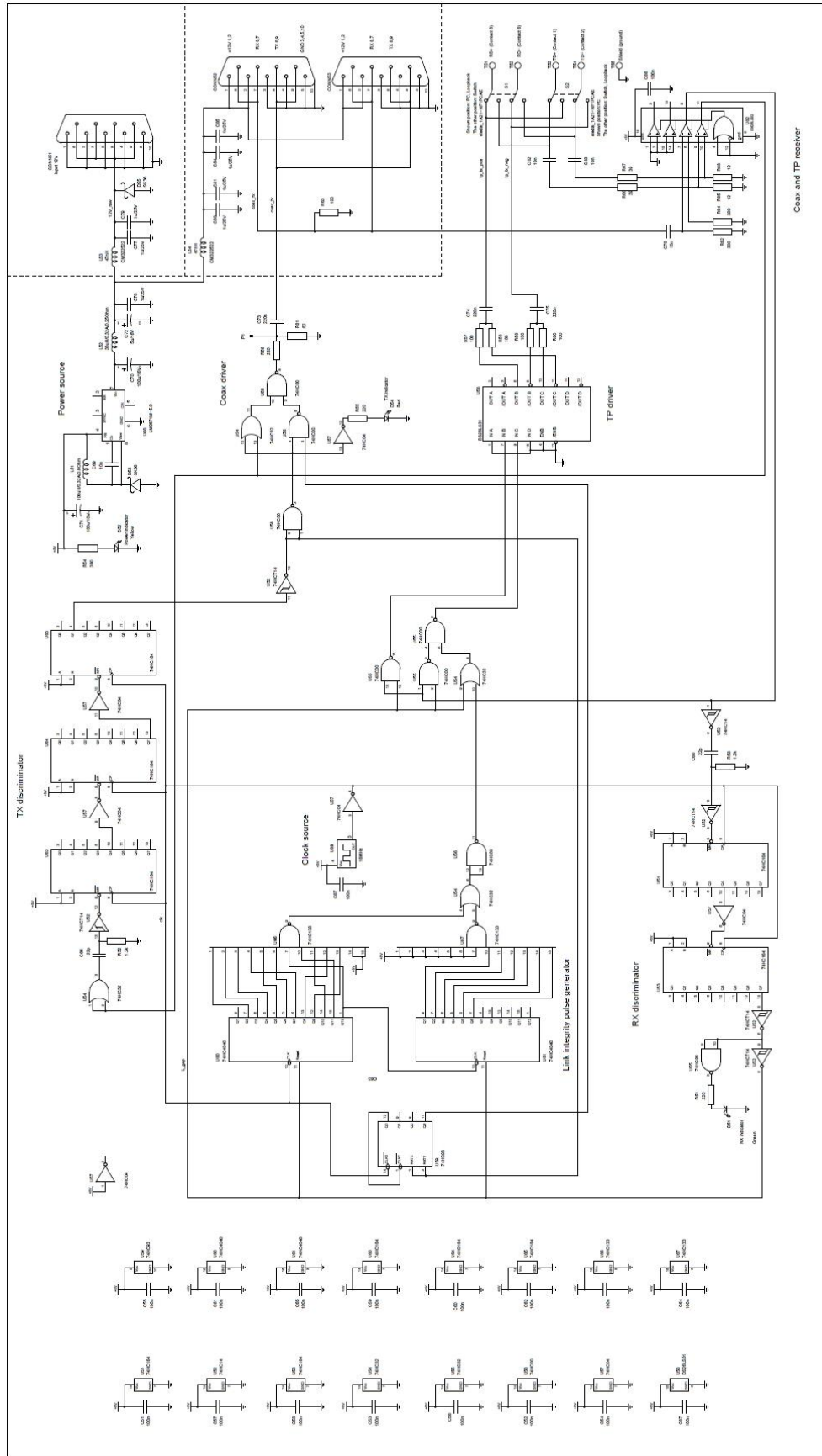
Přepínače S1 a S2 pak slouží k přepnutí RX a TX párů na UTP kabelu pro připojení k PC nebo switchi. Můžou být také nakonfigurovány jako loopback. [26]

8.1.3 Blok napájení

Integrovaný kontrolér U68 spolu s L51, D53 a C70-71 a následně L52-54, C80-81, C72, 76-79, 84, 85 filtrují šum z napájecích linek vedoucích z rozhraní Twisteru2. Současně L53-54, C72,76-77,79-81, 84-85 tvoří filtr, který zabraňuje spínanému šumu z externího napájecího zdroje vstoupit do stínění koaxiálního kabelu připojeného k CONN52 nebo CONN53.

Vnitřní napájecí obvod není filtrován cívkou, protože logické vstupy mají určitou toleranci spínaného šumu.

Dioda D55 zde slouží jako ochrana při prepólování napájecího zdroje. [26]

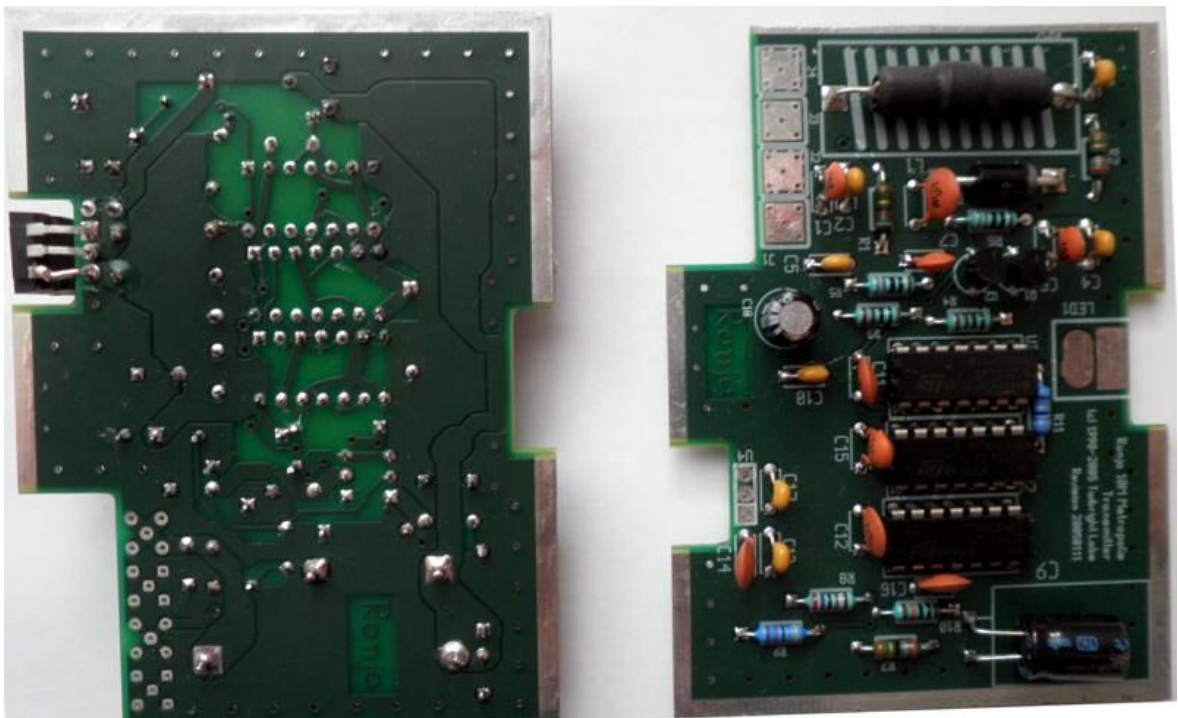


Obr. 25. Schéma interface Twister2 [26]

8.2 Vysílač TX

Modul vysílače TX se skládá z vysílací LED diody HPWT-BD00-F4000 (nebo jiné HPWT-xx00) s oranžovo-červeným vysílaným světelným spektrem o vlnové délce 635nm a velikostí apertury 3mm. Modul je připojen koaxiálním kabelem, který přenáší TX signál o hodnotě 700mVpp s frekvencí 1-10MHz, stínění je uzemněno. Druhým kabelem je modul napájen +12V, GND. Tento modul je uzavřen v hlavici spolu s optikou.

Deska plošného spoje je oboustranná s množstvím propojek, součástky jsou klasické vývodové, pouzdra typu DIL. Modul je v konečné fázi umístěn do VF těsně pocínované krabičky.



Obr. 26. Osazené moduly Vysílače TX

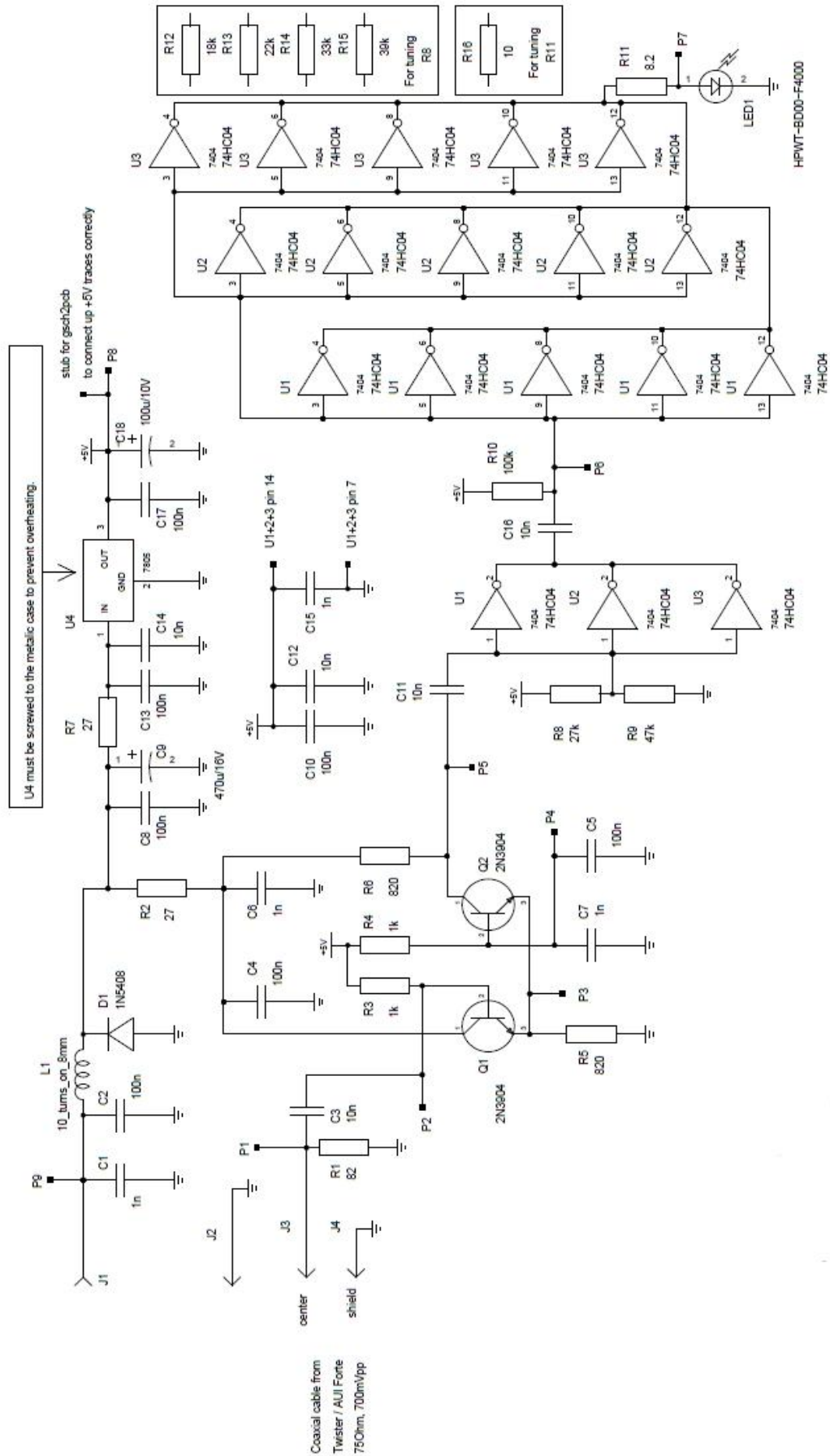
8.2.1 Blok vysílače

Přivedený signál z koaxiálního kabelu je nejprve impedančně přizpůsoben R1 a dále je kondenzátorem C3 propuštěna pouze střídavá složka na soustavu tranzistorů Q1 a Q2, které jsou zapojeny jako Limiter. Ten při velkém vstupním signálu ořeže amplitudu výstupního podobně jako OZ. Pomocí rezistorů R5 a R6 se nastavuje pracovní bod

každého z tranzistorů. Tyto tranzistory musí být pro správnou funkci spárovány podle jejich zisku. Protože má vysílací dioda odběr cca 70mA, je dále signál zesílen paralelně zapojenými obvody U1-U3, které tvoří budič. Kondenzátory C10, C12 a C15 slouží k filtraci špiček vznikajících při překlápění hradel. [26]

8.2.2 Blok napájení

Napájecí napětí 12V je na vstupu filtrováno pomocí C1, C2 a L1. Dioda D1 slouží jako ochrana proti přepólování napájecího napětí. Potřebné napětí 5V pro CMOS hradla získáváme pomocí stabilizátoru U4 a nutných filtračních kondenzátorů C14, C17 a C18. Rezistorem R7 se sráží přiváděné napětí a ulevuje tak výkonově stabilizátoru, který by jinak tento ztrátový výkon musel přeměnit v teplo. Stabilizátor je pak připevněn mechanicky ke krabičce, která zároveň slouží i jako chladič. [26]



Obr. 27. Schéma vysílače TX [26]

8.3 Přijímač RX

Přijímač tvoří čirá 5mm Si-PiN fotodioda SFH203. Modul je připojen koaxiálním kabelem s výstupem signálu 700mVpp. Přijímaný optický signál musí obsahovat 1MHz obdélníkový signál mezi jednotlivými pakety. Modul je připojen koaxiálním kabelem pro výstup signálu a druhým koaxiálním kabelem pro napájecí napětí 12V. Dále je vyveden RSSI výstup pro přesnější zaměření systému v praxi. RSSI generuje na výstupu stejnosměrné napětí nelineárně závislé na síle přijímaného signálu.

Pro tento modul není navržen plošný spoj, a to z důvodu rušení a parazitních kapacit, které vznikaly při všech dosud vyzkoušených návrzích. Součástky jsou proto pájeny přímo v pocínované krabici stylem point-to-point.



Obr. 28. Osazený modul Přijímače RX

8.3.1 Blok přijímače

Jako přijímač je použita Si-Pin fotodiody SFH203, která převádí optickou energii na elektrickou. Při vlnové délce 635nm je její efektivita 0,434A/W. Reakční doba je 5ns, což ji předurčuje k použití pro frekvence 10MHz. Výstup diody je filtrován horní propustí C151 a R103 a dále zesílen MOSFET tranzistorem Q101. Fotodiody a MOSFET zavádějí parazitní kapacitu asi 13pF. Zisk tranzistoru Q101 je dán vztahem:

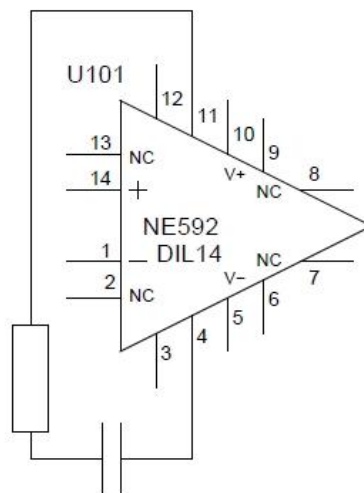
$$gain = -\frac{R_{tia}}{1 + sR_{tia}C_x} g_m R_D [-] \quad (22)$$

Kde:

- g_m - transkonduktance Q101 (strmost)
- C_x - celková kapacita na katodě fotodiody
- R_{tia}, R_D - R101 a R106

Z rovnice vyplývá, že parazitní kapacita ubírá integračnímu članku (dolní propusti) na jeho AC charakteristice. Aby byl původní datový puls správně dekodován, je v následující části obvodu horní propust'. Pro R_{tia} a R_D jsou zvoleny hodnoty 100k Ω a 560 Ω , strmost tranzistoru Q101 je 27mS při předpětí G1 0V a G2 4V.

Střídavá složka výstupu ze zesilovače je dále filtrována kondenzátory C156 a C157 a přivedena na videozesilovač NE592 U101 v provedení DIL14 pro jeho lepší vlastnosti a stabilitu. Ten zde slouží jako zesilovač a derivátor s kapacitní zpětnou vazbou mezi piny 11 a 4. [26] [19]



Obr. 29. Zapojení zpětné vazby NE592 [26]

Pomocí změny R a C ve zpětné vazbě U101 lze upravit minimální funkční vzdálenost spoje podle následujícího vztahu:

$$R = 32 * (N^2 - 1) [\Omega] \quad (23)$$

$$C = \frac{270pF}{N^2} [pF] \quad (24)$$

Kde:

- N - kolikrát je třeba zmenšit min. vzdálenost
- $270pF$ - výchozí kapacita C161 pro maximální zisk zesilovače

Minimální funkční vzdálenost spoje je definována jako 1/15 maximálního dosahu (viz. Tab.3.) a je závislá na použité apertuře a vysílací LED diodě.

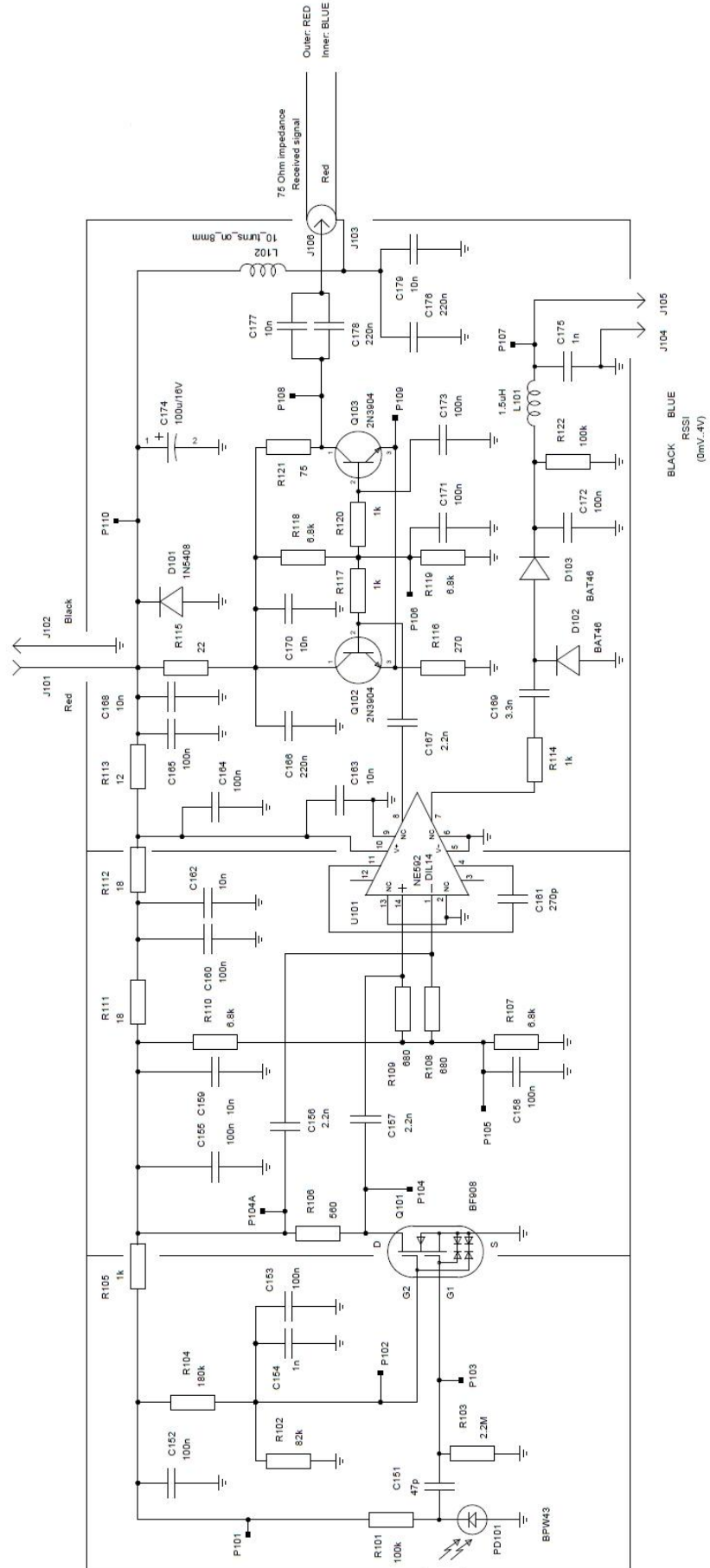
Nezapojené vývody jsou uzemněny. Na výstupu z pinu 7 videozesilovače je napětí usměrněno diodami D102 a D103 a po jeho filtraci pomocí C172, C175 a L101 je využit jako výstup pro RSSI měření síly signálu.

Výstup z pinu 8 videozesilovače je filtrován kondenzátorem C167 a přiveden na bázi tranzistoru Q102, který spolu s Q103 tvoří limiter a pracují do zátěže 75Ω R121. Ten je zde zvolen tak, aby celkový přenášený výkon do 75Ω koaxiálního kabelu byl co

neoptimálnější. Výstup je dále filtrován paralelní kombinací kondenzátorů C177 a C178. Maximální SNR bylo změřeno 16,3dB, což odpovídá BER lehce nad 10^{-9} . [26] [19]

8.3.2 Blok napájení

Jakkoliv se může na první pohled zdát, že filtrování napájení jednotlivých obvodů je předimenzované, vzhledem k výrazné náchylnosti celého modulu přijímače k rušení, je toto opatření více než nutné. Napájení 12V je přivedeno z modulu vysílače, zem tvoří stínění koaxiálního kabelu. Tlumivka L101 zde filtruje nežádoucí 50Hz šum, kondenzátory C174,164,165,163, 168, 160, 162, 159, 152, 155 tvoří filtry na příslušných větvích. [26]



Obr. 30. Schéma přijímače TX [26]

8.4 Oživení modulů

Po kompletním osazení modulů a jejich pečlivém překontrolování přichází na řadu oživení a otestování jednotlivých modulů při připojeném napájecím napětí 12V.

Tab. 4. Kontrolní body Twister2

Twister2 - kontrolní body	
Součástka - pin	Průměrné DC napětí (V)
U56 - 11 U62 - 6,7,9,10	0
P1	0,67V
U57 - 4 U60 - 1,2,3,4,5,6,7 U60 - 9,12,13,14,15 U61 - 2,3,4,5,6,7,9 U69 - 3	2,5V
U54 - 6 U62 - 16 U66, U67 - 9	5V
CONN52 - 1 U67 - 8	12V

Při zapnutí napájecího napětí 12V se musí rozsvítit žlutá kontrolní LED dioda signalizující přítomnost napájení. Pokud ne, modul se musí ihned vypnout a překontrolovat obvody napájení, zda nedošlo ke zkratu, prepólování či vadě součástky. Pokud je vše v pořádku, lze pokračovat v ověření kontrolních bodů.

Modul interface Twister2 je na kontrolu nejnáročnější, zejména kvůli malým kontaktním ploškám SMD součástek. Popřípadě lze jeho kontrolu vynechat a zkontrolovat až pokud se vyskytne problém při dalším testování packet-lossu.

Tab. 5. Kontrolní body RX přijímač

RX přijímač - kontrolní body				
Kontrolní bod	DC napětí min.	DC napětí max.	Upravit	Poznámka
P101	P110 - 0,7V	P110		
P102	3,5V	4V	R104	
P103	0mV	0,1mV		
P104	5V	6V	R106	Měřit při RSSI <2V
P105	P110/2 - 0,5V	P110/2 + 0,5V		
P106	P110/2 - 0,7V	P110/2 + 0,5V		
P107	0V bez signálu	4V plný signál		RSSI, liší se kus od kusu, 0V může odpovídat 60mV
P108	P110 - 1,3V	P110 - 0,9V		
P109	P106 - 0,8V	P106 - 0,6V		
P110	11,5V	12,5V		

Kontrola RX přijímače je nejdůležitější a nesmí se v žádném případě vynechat. Před připojením napájecího napětí je nutné mít připojen multimetr v režimu ampermetru a rozsahem „200mA“ mezi body P104 a P104A (viz. Schéma modulu RX), kde v tuto chvíli chybí rezistor R106. Po připojení napájecího napětí 12V na J101 (+) a J102 (GND) a změření procházejícího proudu zvolíme hodnotu R106 podle tabulky Tab.6. a pokračujeme v ověření kontrolních bodů.

Tab. 6. Volba R106

DC Proud [mA]	R106 [Ohm]
3 - 3,6	1.8k
3,6 - 4,4	1.5k
4,4 - 5,5	1.2k
5,5 - 6,5	1k
6,5 - 8	820
8 - 10	680
10 - 12	560
12 - 14	470
14 - 17	390
17 - 20	330
20 - 24	270
24 - 30	220
30 - 36	180

Pokud je na kontrolním bodu P103 napětí vyšší než 0,1mV, je s největší pravděpodobností proražen tranzistor Q101 a je nutné jej vyměnit. Zde je třeba dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci s tímto tranzistorem, jelikož je velmi náchylný na statickou elektřinu i způsob pájení. Je nutné jej pájet krátce a při použití pájecí pistole „necvakat“ při kontaktu s jeho vývody.

Tab. 7. Kontrolní body TX vysílač

TX vysílač - kontrolní body				
Kontrolní bod	Signál na COM1		Bez signálu na COM1	
	AC	DC	AC	DC
P1	600 ~ 700mVpp	0V	0V	0V
P2	600 ~ 700mVpp	P8 - 0,1 ~ P8	0V	P8 - 0,1 ~ P8
P3	0 ~ 100mVpp	P8 - 0,8 ~ P8 - 0,5V	0V	P8 - 0,8 ~ P8 - 0,6V
P4	0 ~ 40mVpp	P8 - 0,1 ~ P8	0V	P8 - 0,1 ~ P8
P5	4 ~ 4,4Vpp	P9 - 2,2 ~ P9 -2V	0V	P9 - 4,4 ~ P9
P6	P8/2-0,4 ~ P8/2+0,1Vpp	P8/2-0,4 ~ P8/2+0,1V	0V	P8-0,2 ~ P8
P7	124 ~ 136mApp	62 ~ 68mA	0mA	0mA
P8	0 ~ 50mVpp	4,8 ~ 5,2V	0V	4,8 ~ 5,2V
P9	0 ~ 20mVpp	11,5 ~ 12,5V	0V	11,5 ~ 12,5V

Stejně překontrolujeme kontrolní body modulu vysílače, hodnoty by měly odpovídat hodnotám v *Tab.7.*

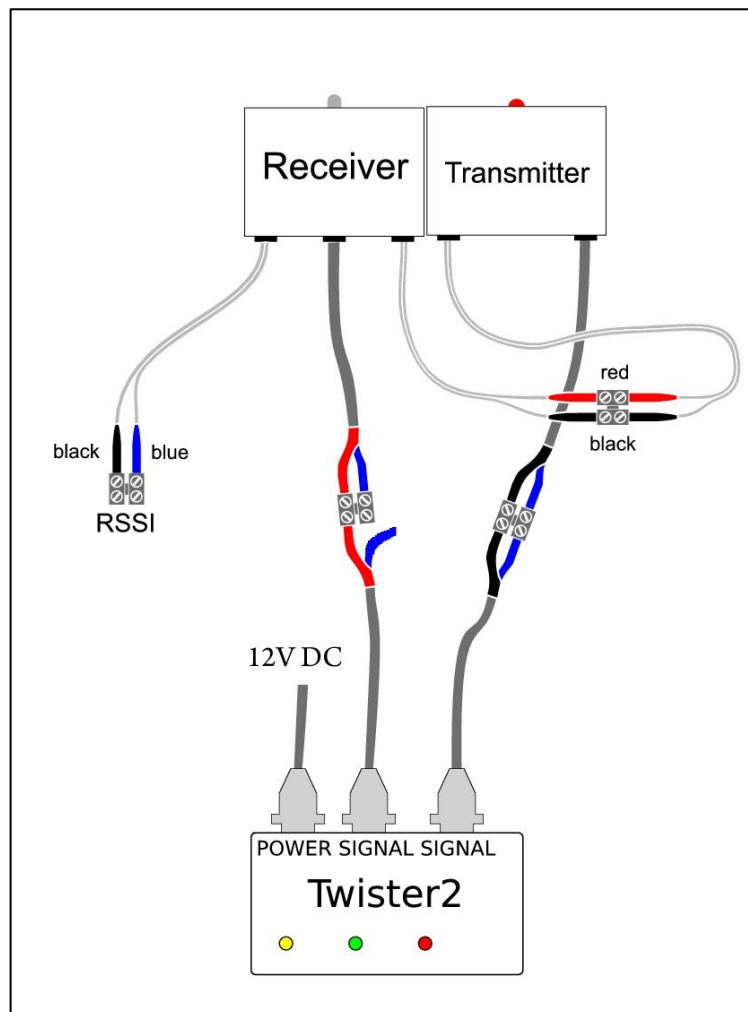
8.5 Nastavení preemfáze

K nastavení preemfáze, tedy střídý signálu LED diody je zapotřebí:

- PC s full-duplex síťovou kartou (NIC)
- Linux OS (postačí i Live CD verze)
- Nainstalovaný Bertest
- Moduly Twister2, RX, TX

Oba moduly zapojíme do interface Twister2 s tím rozdílem, že signál RX není jako jediný zapojen. Nejjednodušeji jej lze dočasně odpájet z RX modulu. Modul Twister2 je

připojen do PC RJ-45 konektorem, přepínače jsou v poloze „PC“ a je napájen zdrojem 12V.



Obr. 31. Zapojení modulů pro test preemfáze

Veškeré zadávání příkazů v Linuxu probíhá pomocí terminálu. Po rozbalení Bertest-experimental tedy pokračujeme v okně terminálu takto:

```
zeus@olymp:~$ sudo ethtool -s eth0 speed 10 duplex full autoneg off
cd bertest-experimental
sudo make
sudo ./permanent_10
```

Nastaví se síťový adaptér na rychlost 10Mbit/s full-duplex a vypne se autonegotiation. Poté se zkompiluje bertest a spustí test pro preemfázi.

Při potvrzení posledního příkazu dojde ke spuštění testu, přičemž je nutné sledovat intenzitu světla LED diody modulu TX. Pokud se intenzita mění při spuštění / zastavení testu (poslední řádek v terminálu, ukončeno ctrl+c), je třeba upravit hodnotu R8 z dostupných hodnot 18-39kΩ.

Tab. 8. Úprava preemfáze

Výsledek	Akce
Vyšší intenzita při spuštěném testu	Zvýšit R8
Nižší intenzita při spuštěném testu	Snížit R8
Bez rozdílu	OK

8.6 Měření NED

NED (Noise Equivalent Distance) – je vzdálenosti mezi vysílačem TX a přijímačem RX, při které je energie šumu ekvivalentní energii užitečného signálu. Jinými slovy hledá se vzdálenost kdy SNR je rovno 0dB. K měření je zapotřebí:

- PC s full-duplex síťovou kartou (NIC)
- Linux OS (postačí i Live CD verze)
- Nainstalovaný Bertest
- Moduly Twister2, RX, TX
- Zrcadlo
- Okolní podmínky zaručující nízkou hladinu osvětlení

Oba moduly jsou zapojeny do interface Twister2, ten je připojen do PC RJ-45 konektorem a přepínače jsou v poloze „PC“. Napájen je zdrojem 12V.

V terminálu linuxového OS pokračujeme takto

```
zeus@olymp:~$ sudo ethtool -s eth0 speed 10 duplex full autoneg off
sudo ifconfig eth0 192.168.1.1 netmask 255.255.255.0
sudo arp -i eth0 -s 192.168.1.2 MAC
sudo route add 192.168.1.2 eth0
sudo tcpdump -i eth0
```

V novém terminálovém okně pak spustíme příkaz `ping 192.168.1.2` a sledujeme pakety, které `tcpdump` zachytí. Úkolem je nalézt takovou vzdálenost RX a TX modulů od zrcadla,

kdy *tcpdump* zaznamená zdvojené a jednoduché pakety v poměru zhruba 50:50, tedy 50% packetloss.

NED lze pak spočítat takto:

$$NED = 1,8 * 2d [m] \quad (25)$$

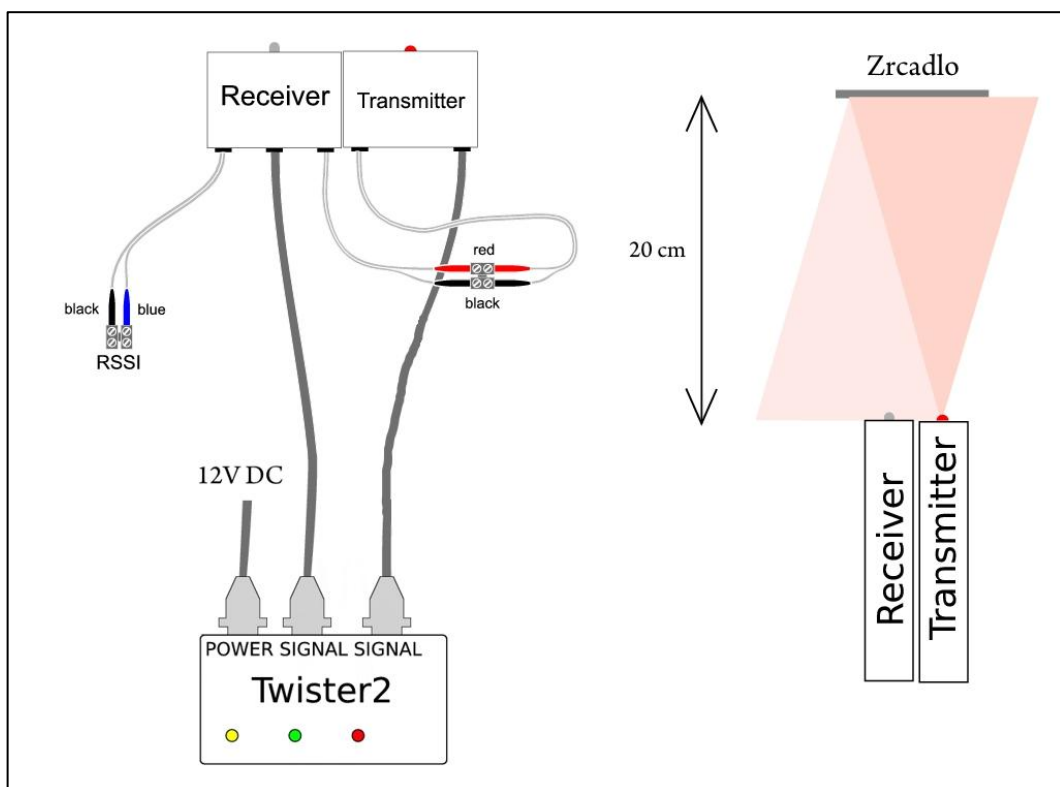
Přesněji pak (za podmínky použitý výstupních hodnot Bertestu):

$$NED = d * 10^{\frac{SNR}{20}} [m] \quad (26)$$

Kde:

- d - vzdálenost RX a TX od zrcadla
- SNR - odstup signál/šum

Protože je autorův nástroj Bertest pro přesnější vyhodnocení NED v současné době nefunkční (vrací prázdný soubor), je zapotřebí testovat méně přenou variantou ping. Měření je pouze informativní a slouží zejména k otestování integrity interface Twister2 a jeho modulů. Na výsledek má velký vliv okolní osvětlení i kvalita použitého zrcadla.



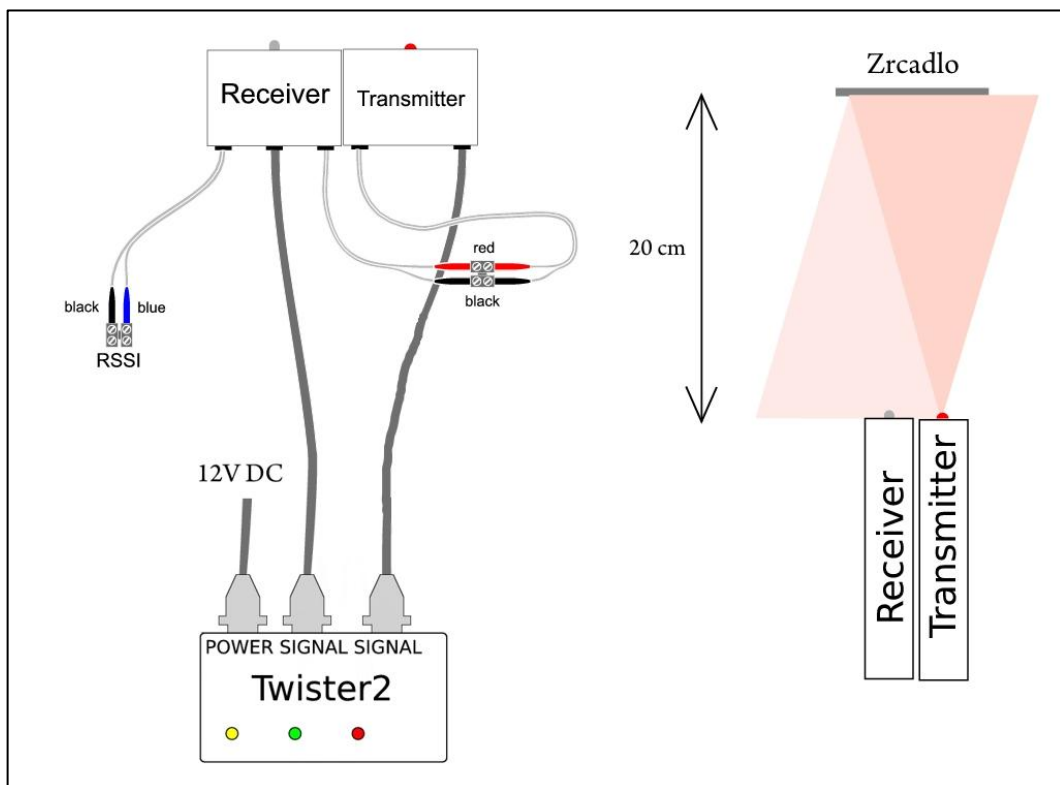
Obr. 32. Zapojení modulů pro test NED, BER a PacketLoss

8.7 Měření PacketLoss

PacketLoss určuje, kolik paketů se ztratilo „někde“ na cestě mezi vysílačem a přijímačem. Jednoduše lze otestovat takto:

- PC s full-duplex síťovou kartou (NIC)
- Linux OS (postačí i Live CD verze)
- Nainstalovaný Bertest
- Moduly Twister2, RX, TX
- Zrcadlo
- Okolní podmínky zaručující nízkou hladinu osvětlení

Oba moduly jsou zapojeny do interface Twister2, ten je připojen do PC RJ-45 konektorem a přepínače jsou v poloze „PC“. Napájen je zdrojem 12V.



Obr. 33. Zapojení modulů pro test NED, BER a PacketLoss

V terminálu linuxového OS pokračujeme takto

```
zeus@olymp:~$ sudo ethtool -s eth0 speed 10 duplex full autoneg off
cd bertest-experimental
sudo make
sudo ./bertest
```

Výstup bude vypadat takto:

1102885167.075454000	0	0	1024	2224
1102885167.645578000	0	0	1024	2224
1102885168.215306000	0	0	1024	2224
1102885168.785415000	0	0	1024	2224
1102885169.355167000	0	0	1024	2224
1102885169.925561000	0	0	1024	2224

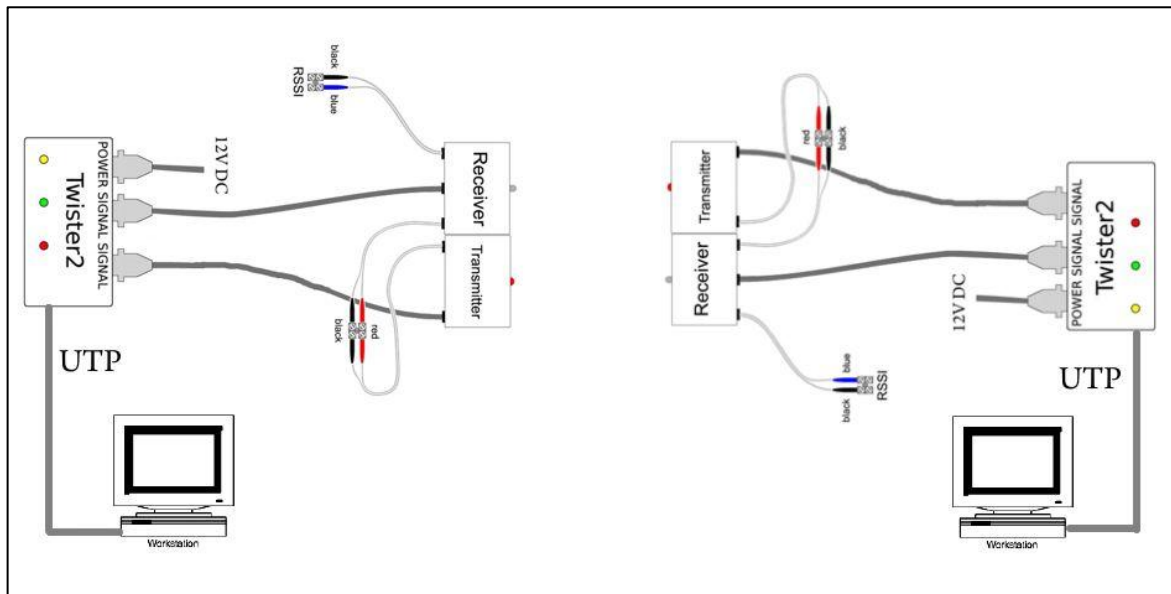
Druhý a třetí sloupec říká, jaký je packetloss při 10MHz a 5MHz. Prakticky by zde neměl být žádný packetloss (tedy 0 ve druhém a třetím sloupci). Jakákoliv ztráta packetu znamená chybu v elektronice.

8.8 Konfigurace a nastavení v OS Windows/Linux

Pokud předchozí testování všech modulů, zejména pak PacketLoss nevykazují žádné ztracené packety, lze přistoupit k propojení dvou PC a konečné konfiguraci sítě v prostředí Windows/Linux. Obě zařízení jsou zapojeny podle *Obr. 34*.

- 2 PC, obě s full-duplex síťovou kartou (NIC)
- OS Windows (XP, Vista, 7) nebo Linux
- 2 Moduly Twister2, RX, TX

Následující popis je jen zevrubným vodítkem nutných nastavení ke správnému funkčnímu provozu pojitka Ronja. Tato práce si neklade za cíl popis vytvoření sítě mezi dvěma PC, k čemuž je většinou nutné správně nastavit další volby a také firewall. Za předpokladu, že je vše správně zkonfigurováno, jsou po následujících nastaveních oba PC viditelné navzájem a příkazem `ping 192.168.1.X` z příkazového řádku se vrací odezva <1ms a nulový packetloss. Přenosová rychlost je 10Mb/s.



Obr. 34. Připojení dvou PC optickým pojitkem Ronja

8.8.1 Konfigurace pro OS Linux

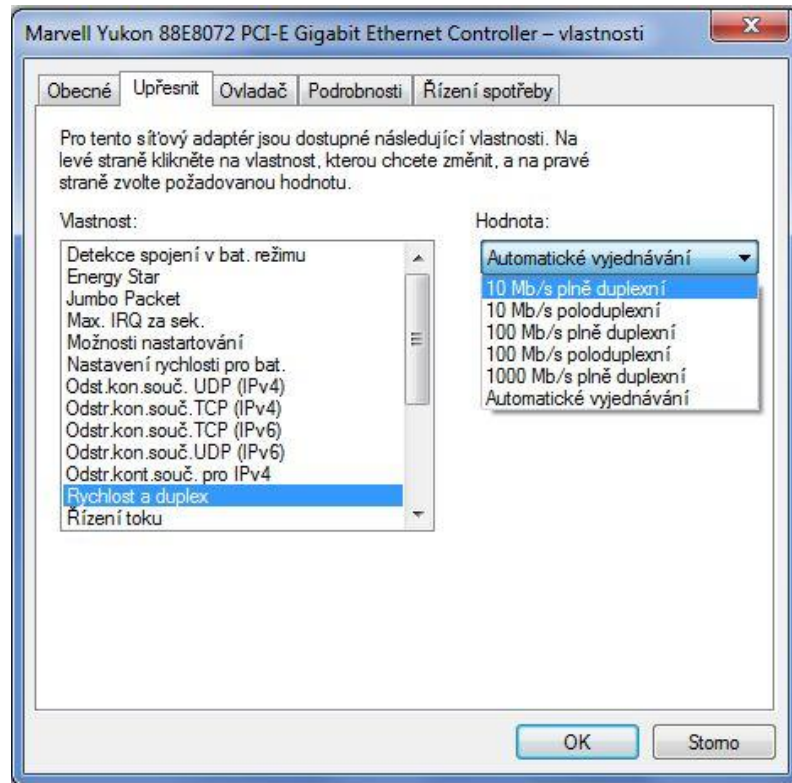
V případě, že budou připojeny PC s OS Linux, je třeba nastavit síťovou kartu každého z nich v terminálu takto:

```
zeus@olymp:~$ sudo ethtool -s eth0 speed 10 duplex full autoneg off
sudo ifconfig eth0 192.168.1.1 netmask 255.255.255.0
```

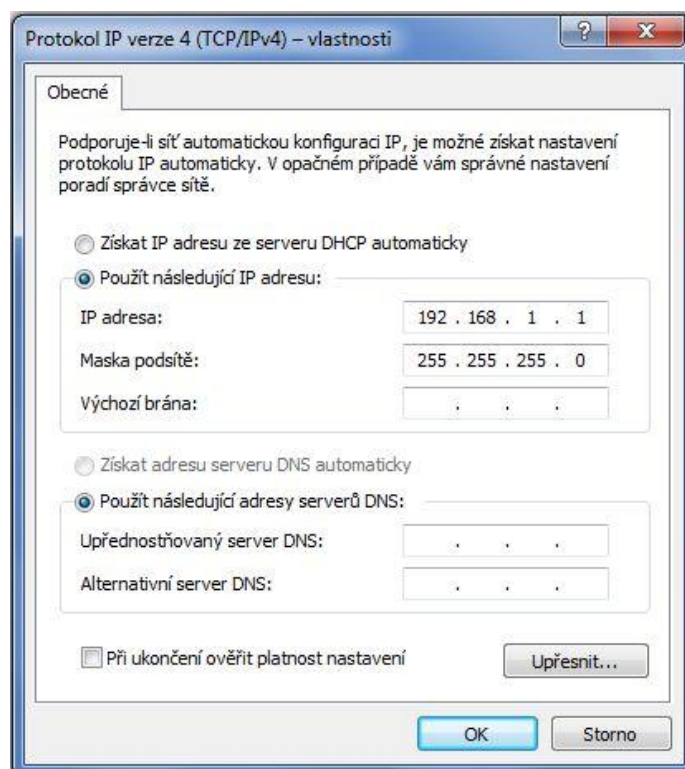
Analogicky je pak třeba na druhém PC nastavit síťovou adresu např. *192.168.1.2*

8.8.2 Konfigurace pro OS Windows

Konfigurace v prostředí Windows sestává z přepnutí režimu síťové karty na 10BASE-T a vypnutí Autonegotiation. To se provádí skrze *Ovládací panely -> Síť a internet -> Síťová připojení*. Zde je zapotřebí přepnout ve vlastnostech adaptéru nastavení dle *Obr.35*. (pro různé adaptéry a verze systému se může nabídka lišit). V konfiguraci protokolu ipv4 je třeba nastavit síťovou adresu a masku dle *Obr.36*. Druhé zařízení se nastaví analogicky, síťová adresa pak *192.168.1.2*



Obr. 35. Nastavení adaptéru v prostředí Windows 7



Obr. 36. Konfigurace IP adresy

9 SROVNÁNÍ S KOMERČNĚ DOSTUPNÝMI PRODUKTY

9.1 SDM10-DE 25

Mikrovlnný spoj SDM10-DE je určen pro spojení dvou zařízení nebo počítačových sítí na bázi Ethernetu. Spoj má přenosovou rychlost 25Mbit/s, což umožňuje přenos jednoho datového kanálu s rychlostí do 20Mbit/s. Ethernetové rozhraní podporuje automaticky rozlišení rychlosti 10 a 100Mbit/s. Spoj pracuje s kmitočtovou modulací ve volném kmitočtovém pásmu 10,3 až 10,6 GHz nebo podle volby zákazníka na vyhrazených kmitočtech. Spoj se dodává s parabolickými anténami o průměru 35, 65 nebo 120 cm. [29]

- Přenosová rychlost 25Mb/s
- Rozhraní Ethernet 100BASE-TX
- Automatické rozlišení rychlosti Ethernet 10/100
- Jeden plně duplexní datový kanál
- Spoj pracuje ve volném pásmu 10 GHz
- Integrovaný management na bázi WWW a SNMP
- Orientační cena je cca **155 000 – 220 000,- Kč** včetně



Obr. 37. Radioreléový spoj SDM10-DE
25 [29]

9.2 Ronja Tetrapolis

Ronja Tetrapolis je zařízení pro optickou komunikaci rychlostí 10Mbps full-duplex na vzdálenost až 1,4km ve volném prostoru. Tento projekt je založen pod GPL / GNU licenci a jeho myšlenkou je nenáročná konstrukce za pomoci běžně dostupných součástek. RONJA pojítko poskytuje i na dnešní dobu poměrně rychlý a bezpečný přenos dat v bezlicenčním pásmu viditelného světelného spektra za předpokladu přímé viditelnosti

- Přenosová rychlost 10Mb/s
- GPL / GNU licence
- Teoretická garantovaná vzdálenost 400m (maximální negarantovaná 1,4 km)
- připojení do sítě přes UTP kabel s konektorem RJ-45
- V současném stavu nemožnost sériové výroby
- Není zaručena opakovatelnost parametrů
- Bez garance dostupnosti
- Občas problematická z hlediska připojitelnosti
- Časová náročnost zaměření
- Dokumentace je místy nedostatečná
- Cena **5 000 – 20 000,- Kč** za profesionální výrobu



Obr. 38. Ronja Tetrapolis [26]

9.3 Elspeedy 100-200 RTX

Firma Elspeedy je elektronickou divizí české společnosti ANTARES-AZV s.r.o., která se zaměřuje na vývoj, výrobu a prodej moderních elektronických zařízení pro datovou komunikaci. Její výrobky jsou postavené na bázi využití světelného paprsku a jsou primárně využity pro výstavbu internetových sítí. Elspeedy 100-200 RTX je levnější verzí optického spoje s kratším garantovaným dosahem. Dražší varianta 100-1000 RTX nabízí dosah až 1km. [31]

- nejmenší varianta optického pojítka s nejlepším poměrem cena/výkon
- garantovaná vzdálenost 200 m
- dosažitelná vzdálenost 400 m
- minimální pracovní vzdálenost 30 m, pro zkoušení optického pojítka na kratší vzdálenost je třeba zastínit čočky přijímačů
- přenosová rychlost 100 Mbit/s
- připojení do sítě přes UTP kabel s konektorem RJ-45 nebo přes optické multimódové vlákno s konektorem SC
- robustní mechanika z nerez a eloxovaného hliníku
- Cena **36 000,- Kč** včetně DPH



Obr. 39. Elsppeedy 100-200 RTX [31]

9.4 LightPointe AireLite 100

LightPointe je firma sídlící v San Diegu, Kalifornii v USA zabývající se bezdrátovými point-to-point řešeními. Zařízení AireLite 100 nabízí přenosovou rychlost 100Mbps na vzdálenost 500m. Platforma nabízí i web SNMP management. Opět je to levnější varianta oproti AireLite 100E, která navíc nabízí větší dosah (1km) [30]

- Webový SNMP management
- připojení do sítě přes UTP kabel s konektorem RJ-45
- Power over Ethernet (PoE)
- Full-duplex Fast Ethernet 100Mbps přenosová rychlost
- Umožňuje upgrade software a systémového firmware
- Robustní konstrukce
- Cena **6 900 USD (~120 000,- Kč)**



Obr. 40. LightPointe AireLite 100 [10]

9.5 Porovnání produktů

V první řadě je potřeba si uvědomit, čím optické pojítka Ronja není – není to profesionální produkt s garancí dostupnosti a technických parametrů. Jeho výroba je otázkou amatérského až poloprofesionálního přístupu, a právě pro tuto cílovou skupinu je určen.

Prvně je třeba určit dostupnost spoje – ta pro Ronju není nijak kvalifikována. Požadavek na dostupnost vyžaduje dynamickou rezervu 30dB, takže i při použití 130mm čoček s maximálním teoretickým dosahem 1,4km se při rezervě 30dB dá Ronja kvalifikovat jako pojítka s garantovaným dosahem asi 400m.

V porovnání s komerčně dostupnými spoji Elspeedy nebo Lightpointe dosahuje Ronja zhruba stejné garantované vzdálenosti, ale při rychlosti „pouze“ 10Mbit/s. Kvalita mechanické části je závislá na zvolené konstrukci a zaměření na delší trasy dle zkušeností zdoluhavá. Produkt Elspeedy je na trhu krátce a stále je zde tedy prostor k jeho dílčím úpravám. V porovnání s produktem zavedené značky Lightpoite překvapí zejména cenou, ostatní parametry jsou srovnatelné. Produkt Lightpointe nabízí přidanou hodnotu v podobě velice kvalitního zpracování, SNMP managementu a možnosti upgrade systémového firmware. Každá z těchto výhod je ale vykoupena cenou, která je pro český trh poměrně vysoká. RR pojítka SDM10-DE 25 je zde zvoleno jako zástupce radiových spojů. Jelikož si tato práce neklade za cíl průzkum trhu a problematiky RR spojů, nebude pravděpodobně zástupcem s nejlepším poměrem cena/výkon. Nabízí za poměrně vysokou cenu spoj s dosažitelnou vzdáleností jednotek kilometrů, ale relativně nízkou rychlostí.

Obecně jsou optické bezdrátové pojítka konkurenty radioreléových spojů. Oproti nim nabízejí celou řadu nesporných výhod (viz.1.1). Zatímco největším nepřítelem optických spojů je mlha, radioreléovým spojům nejvíce vadí silný déšť. Nezřídka jsou tyto dvě technologie nasazeny současně, kdy nejčastěji RR spoj tvoří zálohu FSO spoje. Tím je dosaženo téměř 100% dostupnosti spoje

Tab. 9. Srovnání s komerčními produkty

	RONJA Tetrapolis			ELSPEDY 100-200 RTX		LightPointe AireLite 100
Přenosová rychlost	10 Mbps, full-duplex, half duplex			100Mbps, full duplex		100Mbps, full duplex
Maximální vzdálenost	1.4km s použitím 130mm čoček, cca 400m při 30dB rezervě			200m s rezervou 30dB, 400m s rezervou 26dB		500m
Minimální operační vzdálenost	1/15 nominální vzdálenosti			30m		neuvádí se
Datové rozhraní	RJ-45 UTP, 10BaseT UTP			RJ-45 UTP: Ethernet 10/100 Mbps,		RJ-45 UTP, 10/100-Base-TX
Spotřeba el. Energie	285mA @12VDC (3.42W)			5,58 - 9,3W		20W
	Spotřeba	Typická	Maximální	Vstupní napětí zdroje	100-240V @ 50Hz	napájecí napětí 48V (PoE)
	Idle	185mA	245mA	Výstupní napětí FSO	8 - 15VDC @ 630mA	
V plné zátěži (oba směry)	225mA	285mA				
Vlnová délka	625nm , 100nm spektrální rozptyl			658nm		850nm
Typ světla	nekoherentní, nepolarizované, LED			koherentní, polarizované, LASER		koherentní, polarizované, LASER
Optický výkon	17.2mW			20mW/10mW, třída zařízení 1M		neuvádí se, třída zařízení 1M
Divergence světelného paprsku	1.9mrad (130mm čočky)			0,435mrad		neuvádí se
BER	lepší než 10 ⁻⁹			lepší než 10 ⁻⁹		neuvádí se
Operační teplota	0 až +70°C (venkovní část - optiké hlavice, RX, TX), 0 až +55°C (vnitřní část)			-30 až +70°C		-30 až +60°C
Operační vlhkost	100% (kondenzující) s vyhříváním, 95% bez vyhřívání čoček			0 - 100% kondenzující		až 95% nekondenzující
Váha	15.5kg (jedna strana linky, podle konstrukce)			5kg (jedna strana linky)		4,5kg
Životnost	Neuvádí se			3 roky při poklesu výsilacího výkonu o -6 dB		neuvádí se
Zaměřovací systém	visuální, RSSI přijímače			visuální, RSSI přijímače		neuvádí se
Bezpečnost	Ve shodě s 480/2000 nařízením vlády o ochraně zdraví a neionizujícím záření			Ve shodě s 480/2000 nařízením vlády o ochraně zdraví a neionizujícím záření		IEC/EN 60825-1/A2
Cena	cca 5 000-10 000,- Kč , v případě profesionální výroby 20 000,- Kč včetně DPH			36 000,- Kč včetně DPH		6 900 USD = 117 300,- Kč

ZÁVĚR

Bezdrátové optické spoje dnes nabízí výhodnou alternativu ke klasickým radioreléovým spojům, a to zejména v oblastech, kde jsou již radiové frekvence obsazeny, a dochází tak k velkému rušení. FSO technologie tak působí daleko kompaktněji, protože odstraňuje největší nedostatky klasických radiových spojů, jimiž jsou nutnost přidělování kmitočtů, zakoupení licence, vzájemné rušení a nedokonalá bezpečnost. I z pohledu ochrany zdraví, kde se u mikrovlnného záření a obecně elektromagnetického vlnění setkáváme s kritickými názory ze strany hygieniků, je optická technologie vhodným řešením. Při dodržení norem vysílaného výkonu, totiž úzký světelný kužel nepředstavuje pro lidský organismus žádné nebezpečí.

V teoretické části se tato práce zabývala studiem a popisem FSO zařízení a jeho parametry, zejména pak atmosférickými vlivy na samotnou kvalitu přenosu, jejichž porozumění je nezbytným předpokladem k celkovému pochopení problematiky bezdrátového optického přenosu. Dá se říci, že z pohledu náchylnosti FSO na rušení vlivem klimatických podmínek jsou tato zařízení méně robustní oproti radiovým spojům, nabízí však větší potenciál přenosové kapacity, jsou imunní vůči elektromagnetickému rušení a nevytváří elektromagnetický smog. Také z pohledu bezpečnosti je tato technologie na vyšší úrovni a s příslibem kvantového šifrování může představovat jeden z nejbezpečnějších přenosů dat vůbec. FSO je poměrně novou technologií, a tak stále nabízí celou řadu možností, jak vylepšit vlastnosti, které v současnosti tvoří jeho nedostatky.

V praktické části byl zrealizován optický spoj Ronja Tetrapolis, který je dostupný pod GPU/GNL licencí a jeho dokumentace je volně šiřitelná. Při návrhu jsem vycházel ze vstupních parametrů a pomocí dostupných informačních materiálů teoreticky odhadl jeho maximální dosah. Jelikož cílem práce nebylo sestavení celé optické konstrukce, došlo jen na praktické ověření jeho funkčnosti na krátkou vzdálenost (cca 1m). Výsledkem jsou oživené a zkontrolované moduly, které byly umístěny do VF těsných pocínovaných krabiček. Celý projekt Ronja je poměrně náročný, ať už z pohledu časového, tak i technického. Největší úskalí v elektronické části představuje odladění přijímače RX. I po zhruba 10 letech od jeho návrhu, nedostupnost funkčního tištěného spoje jen potvrzuje jeho náchylnost k rušení a sebemenším odchýlkám od doporučené vnitřní konstrukce. Po odladění je výsledkem nízkonákladový bezdrátový optický spoj poskytující rychlost 10Mb/s a splňující standard IEEE802.3 pro Ethernetové sítě. Funkčnost byla odzkoušena

v OS Linux (Ubuntu) a Windows 7 Pro. Moduly jsou takto připraveny pro montáž optické části a praktické nasazení.

Vzhledem k původnímu návrhu, který vznikl zhruba před 10 lety, představuje v současné době Ronja jen stěží konkurenci v porovnání s dnešními profesionálními produkty. Stále však nabízí zajímavou alternativu k RR spojům pro malé vzdálenosti nebo nenáročné PTP propojení dvou sítí. Ceny RR spojů začínají na částce zhruba 100 000,- Kč a v porovnání s FSO spoji nabízí většinou menší přenosové rychlosti, avšak se zásadně větším dosahem. Vhodnost jedné či druhé technologie tedy bude vždy záležet na individuálním posouzení konkrétního případu a podmínek použití zařízení.

CONCLUSION

Wireless optical links offers a convenient alternative to conventional radiofrequency links, especially in areas where radio frequencies are already occupied, which leads to major interference. The FSO technology seems to be more compact because it removes the greatest ills of conventional radio links, which are the need for allocation of frequencies, licensing, interference and imperfect security. Even from the perspective of human health, the view on the microwave radiation and electromagnetic waves generally differ among various studies. On the contrary, a narrow light beam in compliance with maximal power densities, do not represent any danger to human health whatsoever.

The theoretical part of this paper is focused on studying and describing the FSO device and its parameters and especially atmospheric effects on the transmission performance. Their understanding is necessary for an overall understanding of wireless optical transmission. From this perspective, the FSO appears less robust than radio links, but offers greater potential of transmission capacity, is immune to electromagnetic interference and does not create electromagnetic smog. Also in terms of security is at a higher level and with the promise of quantum encryption would be considered one of the most secure data transmission ever used. The FSO technology is relatively new, and thus still offers ways to improve its features.

In the practical part of the thesis was realised a Tetrapolis Ronja optical link, which is available under the GPU / GNL license and documentation is freely distributable. Its design is based on input parameters, using the available documentation and estimating the theoretical maximum range. Since the aim of this work was not to build the entire optical system, there has been done only practical verification of its operation at a short distance of about 1m. The modules were throughoutly tested and checked and finally placed into HF tight tinplate boxes. Whole Ronja project is quite challenging, both in terms of time and technical ability. The biggest stumbling in electronic part was tuning of RX receiver. Even after 10 years of its design, the unavailability of a working and operational printed circuit board only confirms its susceptibility to interference, and the slightest deviation from the recommended internal design. After tuning, the result is low-cost wireless optical link providing speeds 10Mb/s compliant with IEEE802.3 standard for Ethernet networks. Functionality was verified on Linux (Ubuntu) and Windows 7 Pro OS. Modules are ready for mounting into an optical subsystem and its practical application.

Because of the initial design, which was about 10 years ago, Ronja hardly presents competitive product when compared with today's professional links. However it still offers an interesting alternative to the RR links at small distances, or short PTP links connecting two networks. Starting cost of RR links sits at the amount of 100 000 CZK roughly. In comparison with the FSO links, the RR offers lower data rates, but at significantly greater range. The suitability of either of these technologies will therefore always depend on the particular case.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] T, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. [s.l.] : Europa Sobotáles, 2005. ISBN 80-86706-13-3
- [2] V, Váňa. *Atmel AVR programování v jazyce C*. [s.l.] : BEN, 2003. ISBN 80-7300-102-0
- [3] M, Burkhard. *C pro mikrokontroléry*. [s.l.] :BEN, 2003. ISBN 80-7300-077-6
- [4] J, Horst. *Informační a telekomunikační technika*. [s.l.] :BEN, 2004. ISBN 80-86706-08-7
- [5] P, Bastian. *Praktická elektrotechika*. [s.l.] : Europa Sobotáles, 2004. ISBN 808670615X
- [6] C, Hurley. *How to cheat at securing a wireless network*. [s.l.] : Syngress, 2006. 453 s. ISBN 978-1-59749-087-0
- [7] S, Hranilovič. *Wireless optical communication systems*. [s.l.] : Springer, 2005. 196 s. ISBN 978-0-387-22784-9
- [8] A.K, Majumdar, J.C, Ricklin. *Free-space laser communications*. [s.l.] : Springer, 2008, 418 s. ISBN 978-0-387-28652-5
- [9] F.H.P, Fitzek, M.D, Katz. *Cognitive wireless networks*. [s.l.] :Springer, 2007, 714 s. ISBN 978-1402059780
- [10] LIGHTPOINTE WHITE PAPER SERIES : *Understanding the Performance of Free-Space Optics*. USA : Optical Society of America, 2003. s. 26. Dostupné z WWW: <<http://www.lightpointe.com>>.
- [11] BLOOM, Scott. *The physics of free space optics*. USA : AirFiber, 2002. s. 22.
- [12] MEHRA, Monika. *FREE SPACE OPTICS: High bandwidth solution in network world*. USA : Engg College, 2007. s. 6.
- [13] AWAN, M.S., et al. *Weather Effects Impact on the Optical Pulse Propagation in Free Space*. Austria : Graz University of Technology, 2009. s. 5.
- [14] ŠPORIK, Jan. *THE INCREASE OF AVAILABILITY OF FSO DATA LINKS BY REDUCING THE DISTANCE OF FSO'S HEADS*. VUT Brno, 2010. 5 s. Oborová práce. VUT Brno.
- [15] KOLKA, Zdenek; WILFERT, Otakar; BIOLKOVA, Viera. *Reliability of Digital FSO Links in Europe*. USA : World Academy of Science, 2007. s. 4.

- [16] LEITGEB, E., et al. *Analysis and Evaluation of Optimum Wavelengths for Free-Space Optical Transceivers*. Austria : Institute of Broadband Communications, 2010. s. 7.
- [17] *Laser vs. Infrared* [online]. USA : Plaintree Systems Inc., 2007 [cit. 2011-06-04]. Dostupné z WWW: <www.plaintree.com>.
- [18] DORDOVÁ, Lucie. *METODA STANOVENÍ CHARAKTERISTIK ATMOSFÉRICKÉHO PŘENOSOVÉHO PROSTŘEDÍ V OPTICKÉ OBLASTI SPEKTRA*. VUT Brno, 2009. 23 s. Dizertační práce. VUT Brno.
- [19] KHUMSAT, Phanumas; WATTANAPISI, Noppadol. *Low-Cost Laser-Based Wireless Optical Transceiver for 10-Mbps Ethernet Link*. Thailand : Faculty of Engineering, Prince of Songkla Univesity, 2006. s. 4.
- [20] *POSUZOVÁNÍ BEZPEČNOSTI PROVOZU LASERŮ VE VOJENSKÝCH VÝCVIKOVÝCH PROSTORECH*. Praha : Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2005. 20 s.
- [21] SANS Institute. *Free-Space Optics: A Viable, Secure Last-Mile Solution?*. USA : SANS Institute, 2002. s. 11.
- [22] MOURSUND, Carter. *LEDs vs. Laser Diodes for Wireless Optical Communication*. USA : ClearMesh Networks, 2006. s. 3. Dostupné z WWW: <www.clearmesh.com>.
- [23] *Lupa.cz* [online]. 2004 [cit. 2011-06-04]. Kvantová kryptografie pro bezpečnou distribuci klíčů. Dostupné z WWW: <www.lupa.cz>.
- [24] *Modulatedlight.org* [online]. 2007 [cit. 2011-06-04]. Optical (through-the-air) communications. Dostupné z WWW: <www.modulatedlight.org>.
- [25] *Fsona.com* [online]. 2007 [cit. 2011-06-04]. FSO Guide. Dostupné z WWW: <www.fsona.com>.
- [26] *Http://ronja.twibright.com/* [online]. 1998, 2010 [cit. 2011-06-04]. Ronja Tetrapolis. Dostupné z WWW: <http://ronja.twibright.com/>.
- [27] *Rp-photonics.com* [online]. 2009 [cit. 2011-06-04]. Encyclopedia of Laser physics and technology. Dostupné z WWW: <http://www.rp-photonics.com>.
- [28] SRINIVASAN, R. *The climate effects on line of sight (LOS) in FSO communication*. India, 2010. 10 s. Oborová práce. Sathyabama University, Chennai, TamilNadu, India.

- [29] *Svm.cz* [online]. 2000, 2005 [cit. 2011-06-04]. Mikrovlnný spoj pro přenos dat. Dostupné z WWW: <<http://www.svm.cz>>.
- [30] *Lightpointe.com/* [online]. 2010, 2011 [cit. 2011-06-04]. High capacity wireless solutions. Dostupné z WWW: <<http://www.lightpointe.com>>.
- [31] *Elspeedy.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-06-04]. Elspeedy 100-200. Dostupné z WWW: <<http://elspeedy.cz>>.
- [32] JAROŠ, Jan . *Analýza anemometrických záznamů a vliv větrných turbulencí na fluktuaci radiokomunikačního signálu*. Pardubice, 2009. 43 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [33] *Http://burro.cwru.edu* [online]. [cit. 2011-06-06]. Planetary Atmospheres: the Terrestrial Worlds. Dostupné z WWW: <<http://burro.cwru.edu/Academics/Astr201/Atmosphere/atmosphere1.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Ampér, základní jednotka soustavy SI pro elektrický proud.
AC	Střídavý proud, též AC (alternating current), jehož směr se periodicky střídá.
DC	Stejnoseměrný elektrický proud.
FET	Unipolární tranzistor (FET – Field Effect Transistor) Řízen napětím (elektrostatickým polem) na gate.
FOV	Z angl. Field Of View, zorné pole.
FSO	Bezdrátový optický spoj, z angl. Free Space Optics.
GND	Elektrické uzemnění.
GPU/GNL	General Public Licence, volně šiřitelná licence.
LASER	Laser(ová) dioda, zdroj koherentního světla.
LED	Led dioda, z angl. Light Emiting Diode.
mApp	Miliampér špička-špička (peak-to-peak).
MESH	Architektura sítě složená s redundantních spojů.
MOS	Z angl. Metal-Oxide-Semiconductor. Architektura transistoru.
mVpp	Milivolt špička-špička (peak-to-peak).
NIC	Z angl. Network Interface Card, též síťová karta.
NED	Noise Equivalent Distance, vzdálenost kdy je SNR rovno 0 (viz. SNR)
OBS	Optický bezdrátový spoj, viz. FSO.
OOK	On Off Keying, modulace signálu.
PC	Personal Computer, osobní počítač.
PiN	Z angl. Positive-Intrinsic-Negative , velice rychlá fotodioda.
PMP	Point To Multipoint, centralizovaná architektura sítí.
PoE	Power over Ethernet, je napájení po datovém síťovém kabelu, bez nutnosti přivést napájecí napětí k přístroji dalším samostatným kabelem.

PTP	Point To Point, architektura sítí, jednoduchý spoj bod-bod.
RF	Radiofrekvenční.
RING	Kruhová architektura sítí.
RSSI	Z angl. Received Signal Strength Indicator. Indikace síly signálu.
RR	Radioreléový (spoj).
RX	Receiver, přijímač.
SMNP	Je součástí sady internetových protokolů. Slouží potřebám správy sítí.
SMD	Z angl. Surface Mount Device, součástky pro povrchovou montáž.
SNR	Signal to Noise Ratio, odstup signál-šum.
STP	Stíněná kroucená dvojlinka.
SWITCH	Aktivní síťový prvek propojující jednotlivé segmenty sítě.
TP	Kroucená dvojlinka.
TX	Transmitter, vysílač.
UTP	Nestíněná kroucená dvojlinka.
V	Volt, základní jednotka soustavy SI pro elektrické napětí.
Wi-Fi	Označuje 802.11, bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích.
WWW	Je systém provázaných hypertextových dokumentů na Internetu.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Obecné blokové schéma optického komunikačního systému</i>	11
<i>Obr. 2. Zjednodušené schéma optického přenosu informace [19]</i>	13
<i>Obr. 3. Rozdělení atmosféry[33]</i>	16
<i>Obr. 4. Výkonové úrovně FSO spoje [32]</i>	19
<i>Obr. 5. Závislost rezervy spoje na vzdálenosti linky [14]</i>	20
<i>Obr. 6. Závislost útlumu atmosféry na vlnové délce vysílače [11]</i>	21
<i>Obr. 7. Optický svazek s Gaussovým rozložením [18]</i>	26
<i>Obr. 8. Profil Gaussova svazku, Eliptická stopa optického svazku a její intenzitní profil pro $I_0(x) = I_0(y)$ [18]</i>	26
<i>Obr. 9. Ideální Gaussův svazek (kruhově symetrický) [18]</i>	27
<i>Obr. 10. Fluktuace úrovně optické intenzity při průchodu svazku turbulentní atmosférou [18]</i>	28
<i>Obr. 11. Závislost parametru C_n^2 na denní době [11]</i>	29
<i>Obr. 12. Efekt scilintace na straně přijímací apertury [11]</i>	30
<i>Obr. 13. Relativní intenzita LED</i>	32
<i>Obr. 14. Relativní intenzita Laser diody</i>	33
<i>Obr. 15. Závislost útlumu atmosféry na vlnové délce vysílače, zvýrazněny vlnové délky 900nm a 1550nm</i>	34
<i>Obr. 16. Citlivost lidského oka na vlnovou délku (plná čára – viditelné světlo, čárkovaná čára – celkově absorbované světlo)</i>	38
<i>Obr. 17. Architektura (Multi) Point-toPoint [10]</i>	41
<i>Obr. 18. Architektura Point-to-Multipoint [10]</i>	42
<i>Obr. 19. Architektura MESH [10]</i>	43
<i>Obr. 20. Vysílací LED dioda HPWT-BD00-E4000</i>	49
<i>Obr. 21. Vysílací intenzita $dB_Tq * sym - 1sr - 1$ pro různé kombinace LED a čočky [dB] [26]</i>	50
<i>Obr. 22. Požadovaná vysílací intenzita vs. dosah (4km viditelnost = 4.25 dB/km) [26]</i>	51
<i>Obr. 23. Blokové schéma Ronja Tereapolis</i>	52
<i>Obr. 24. Osazené moduly Twister2</i>	53
<i>Obr. 25. Schéma interface Twister2 [26]</i>	56
<i>Obr. 26. Osazené moduly Vysílače TX</i>	57

<i>Obr. 27. Schéma vysílače TX [26]</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 28. Osazený modul Přijímače RX.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 29. Zapojení zpětné vazby NE592 [26]</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 30. Schéma přijímače TX [26]</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 31. Zapojení modulů pro test preemfáze</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 32. Zapojení modulů pro test NED, BER a PacketLoss</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 33. Zapojení modulů pro test NED, BER a PacketLoss</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 34. Připojení dvou PC optickým pojítkem Ronja</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 35. Nastavení adaptéru v prostředí Windows 7</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 36. Konfigurace IP adresy.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 37. Radioreléový spoj SDM10-DE 25 [29]</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 38. Ronja Tetrapolis [26]</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 39. Elspedy 100-200 RTX [31]</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 40. LightPointe AireLite 100 [10]</i>	<i>78</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Srovnání nejdůležitějších vlastností LED a laseru</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2. Přehled vlastností Ronja Tetrapolis</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 3. Maximální dosah při zvoleném průměru čočky</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 4. Kontrolní body Twister2</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 5. Kontrolní body RX přijímač</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 6. Volba R106</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 7. Kontrolní body TX vysílač</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 8. Úprava preemfáze.....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 9. Srovnání s komerčními produkty</i>	<i>80</i>

SEZNAM PŘÍLOH

- PI Seznam součástek Twister2
- PII Seznam součástek Vysílač TX
- PIII Seznam součástek Přijímač RX
- PIV Předlohy a plány osazení Twister2
- PV Předlohy a plány osazení Vysílač TX
- PVI Rozmístění součástek pro Přijímač RX
- PVII Fotodokumentace hotových modulů
- PVIII Výkres krabičky pro Twister2
- PIX Výkres krabičky pro Vysílač TX
- PX Výkres krabičky pro Přijímač RX

PŘÍLOHA P I: SEZNAM SOUČÁSTEK – TWISTER2

Klíč	Druh	Hodnota	Pouzdro	PCB Sektor
C51	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	10e
C52	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	5d
C53	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	6c
C54	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	3g
C55	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	5e
C56	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	6e
C57	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	8e
C58	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	4f
C59	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	5h
C60	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	6g
C61	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	11g
C62	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	7h
C63	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	8g
C64	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	8c
C65	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	11e
C66	KONDENZÁTOR	22p	SMD 0805	7C
C67	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	3g
C68	KONDENZÁTOR	22p	SMD 0805	9E
C69	KONDENZÁTOR	10n	SMD 0805	12D
C70	ELYT KONDENZÁTOR	100u/16V	SMD	12c
C71	ELYT KONDENZÁTOR	100u/10V	SMD	12F
C72	ELYT KONDENZÁTOR	5u/16V	SMD	12C
C73	KONDENZÁTOR	220n	SMD 1210	5C
C74	KONDENZÁTOR	220n	SMD 1210	0D
C75	KONDENZÁTOR	220n	SMD 1210	0d
C76	KONDENZÁTOR	1u/25V	SMD 1206	11c
C77	KONDENZÁTOR	1u/25V	SMD 1206	11b
C78	KONDENZÁTOR	10n	SMD 0805	4D
C79	KONDENZÁTOR	1u/25V	SMD 1206	12b
C80	KONDENZÁTOR	1u/25V	SMD 1206	7c
C81	KONDENZÁTOR	1u/25V	SMD 1206	3c

C82	KONDENZÁTOR	10n	SMD 0805	2e
C83	KONDENZÁTOR	10n	SMD 0805	2E
C84	KONDENZÁTOR	1u/25V	SMD 1206	7c
C85	KONDENZÁTOR	1u/25V	SMD 1206	4c
C86	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	3c
C87	KONDENZÁTOR	100n	SMD 1206	2b
CONN51	DB9		samec 90deg PCB	11B
CONN52	DB9		samec 90deg PCB	4B
CONN53	DB9		samec 90deg PCB	8B
D51	LED	Zelená	5mm matná	8H
D52	LED	Žlutá	5mm matná	12H
D53	SK36		SMD	13C
D54	LED	Červená	5mm matná	5H
D55	SK36		SMD	11c
L51	CÍVKA	100uH/0.32A/ 0.6Ohm	SMD	13D
L52	CÍVKA	33uH/0.32A/0. 25Ohm	SMD	12D
L53	CM322522	47nH	SMD 1206	11C
L54	CM322522	47nH	SMD 1206	8C
R51	ODPOR	220	SMD 1206	8G
R52	ODPOR	1.2k	SMD 1206	8d
R53	ODPOR	1.2k	SMD 1206	9e
R54	ODPOR	330	SMD 1206	12g
R55	ODPOR	220	SMD 1206	5g
R56	ODPOR	220	SMD 1206	4C
R57	ODPOR	100	SMD 1206	0C
R58	ODPOR	100	SMD 1206	0C
R59	ODPOR	100	SMD 1206	0c
R60	ODPOR	100	SMD 1206	0c
R61	ODPOR	82	SMD 1206	4c
R62	ODPOR	330	SMD 1206	4e
R63	ODPOR	100	SMD 1206	3b
R64	ODPOR	330	SMD 1206	4e
R65	ODPOR	12	SMD 1206	3e

R66	ODPOR	39	SMD 1206	2e
R67	ODPOR	39	SMD 1206	2E
R68	ODPOR	12	SMD 1206	3e
S1	eledis_1A21-NF1PCAE	zlaceny	6mm hole	1D
S2	eledis_1A21-NF1PCAE	zlaceny	6mm hole	1E
U51	74HC164		SMD	10E
U52	74HCT14		SMD	8E
U53	74HC164		SMD	4F
U54	74HC32		SMD	6D
U55	74HC00		SMD	6E
U56	74HC00		SMD	5D
U57	74HC04		SMD	4G
U58	DS26LS31		DIL	1B
U59	74HC93		SMD	5E
U60	74HC4040		SMD	11G
U61	74HC4040		SMD	11D
U62	DS26LS32		DIL	3D
U63	74HC164		SMD	6H
U64	74HC164		SMD	6G
U65	74HC164		SMD	7H
U66	74HC133		DIL	9G
U67	74HC133		DIL	9C
U68	LM2671M-5.0		SO-8	12D
U69	KRYSTAL. OSCILÁTOR	16MHz	DIL 14	3G

PŘÍLOHA P 2: SEZNAM SOUČÁSTEK – VYSÍLAČ TX

Klíč	Druh	Hodnota	Pouzdro	PCB Sektor
C1	KONDENZÁTOR	1n	keramický 50V	
C2	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	
C3	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	
C4	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	
C5	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	
C6	KONDENZÁTOR	1n	keramický 50V	
C7	KONDENZÁTOR	1n	keramický 50V	
C8	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	
C9	ELYT KONDENZÁTOR	470u/16V	radial 13mm	
C10	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	
C11	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	
C12	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	
C13	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	
C14	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	
C15	KONDENZÁTOR	1n	keramický 50V	
C16	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	
C17	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	
C18	ELYT KONDENZÁTOR	100u/10V	radial 8mm	
D1	1N5408			
L1	CÍVKA	1uH	vlastní	
LED1	HPWT-BD00-F4000		autoled	
Q1	2N3904		TO92	
Q2	2N3904		TO92	
R1	ODPOR	82	0.6W	
R2	ODPOR	27	250mW	
R3	ODPOR	1k	250mW	
R4	ODPOR	1k	250mW	
R5	ODPOR	820	250mW	
R6	ODPOR	820	250mW	
R7	ODPOR	27	0.6W	
R8	ODPOR	27k	250mW	

R9	ODPOR	47k	250mW	
R10	ODPOR	100k	250mW	
R11	ODPOR	8.2	250mW	
R12	ODPOR	18k	250mW	
R13	ODPOR	22k	250mW	
R14	ODPOR	33k	250mW	
R15	ODPOR	39k	250mW	
R16	ODPOR	10	250mW	
U1	74HC04		DIL	
U2	74HC04		DIL	
U3	74HC04		DIL	
U4	LM7805		TO220	

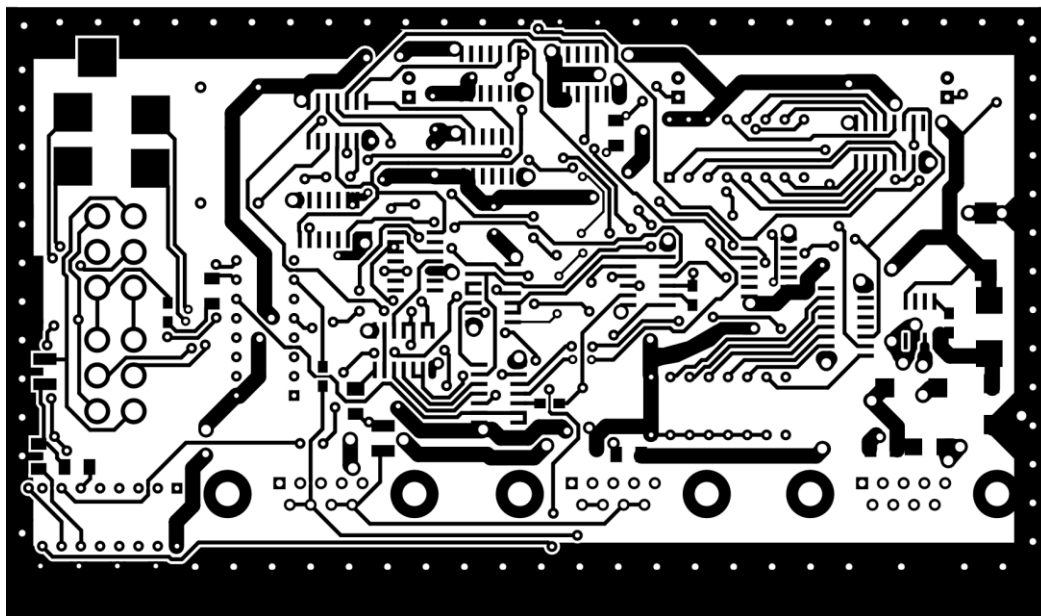
PŘÍLOHA P 3: SEZNAM SOUČÁSTEK – PŘIJÍMAČ RX

Klíč	Druh	Hodnota	Pouzdro	PCB Sector
C151	KONDENZÁTOR	47p	keramický 50V	Not on PCB
C152	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C153	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C154	KONDENZÁTOR	1n	keramický 50V	Not on PCB
C155	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C156	KONDENZÁTOR	2.2n	keramický 50V	Not on PCB
C157	KONDENZÁTOR	2.2n	keramický 50V	Not on PCB
C158	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C159	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	Not on PCB
C160	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C161	KONDENZÁTOR	270p	keramický 50V	Not on PCB
C162	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	Not on PCB
C163	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	Not on PCB
C164	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C165	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C166	KONDENZÁTOR	220n	keramický 50V	Not on PCB
C167	KONDENZÁTOR	2.2n	keramický 50V	Not on PCB
C168	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	Not on PCB
C169	KONDENZÁTOR	3.3n	keramický 50V	Not on PCB
C170	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	Not on PCB
C171	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C172	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C173	KONDENZÁTOR	100n	keramický 50V	Not on PCB
C174	ELYT KONDENZÁTOR	100u/16V		Not on PCB
C175	KONDENZÁTOR	1n	keramický 50V	Not on PCB
C176	KONDENZÁTOR	220n	keramický 50V	Not on PCB
C177	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	Not on PCB
C178	KONDENZÁTOR	220n	keramický 50V	Not on PCB
C179	KONDENZÁTOR	10n	keramický 50V	Not on PCB
D101	1N5408			Not on PCB
D102	BAT46			Not on PCB
D103	BAT46			Not on PCB

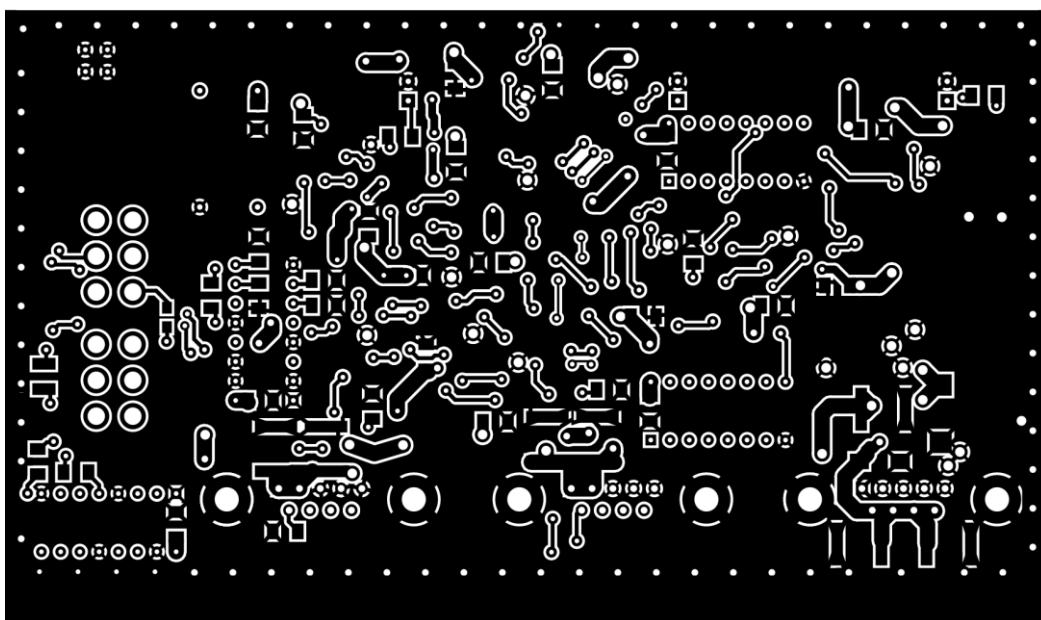
L101	CÍVKA	1.5uH	vlastní	Not on PCB
L102	CÍVKA	1uH	vlastní	Not on PCB
PD101	BPW43			Not on PCB
Q101	BF908			Not on PCB
Q102	2N3904		TO92	Not on PCB
Q103	2N3904		TO92	Not on PCB
R101	ODPOR	100k	250mW	Not on PCB
R102	ODPOR	82k	250mW	Not on PCB
R103	ODPOR	2.2M	250mW	Not on PCB
R104	ODPOR	180k	250mW	Not on PCB
R105	ODPOR	1k	250mW	Not on PCB
R106	ODPOR	560	250mW	Not on PCB
R107	ODPOR	6.8k	250mW	Not on PCB
R108	ODPOR	680	250mW	Not on PCB
R109	ODPOR	680	250mW	Not on PCB
R110	ODPOR	6.8k	250mW	Not on PCB
R111	ODPOR	18	250mW	Not on PCB
R112	ODPOR	18	250mW	Not on PCB
R113	ODPOR	12	250mW	Not on PCB
R114	ODPOR	1k	250mW	Not on PCB
R115	ODPOR	22	250mW	Not on PCB
R116	ODPOR	270	250mW	Not on PCB
R117	ODPOR	1k	250mW	Not on PCB
R118	ODPOR	6.8k	250mW	Not on PCB
R119	ODPOR	6.8k	250mW	Not on PCB
R120	ODPOR	1k	250mW	Not on PCB
R121	ODPOR	75	250mW	Not on PCB
R122	ODPOR	100k	250mW	Not on PCB
R123	ODPOR	82k	250mW	Not on PCB
R124	ODPOR	100k	250mW	Not on PCB
R125	ODPOR	120k	250mW	Not on PCB
R126	ODPOR	180	250mW	Not on PCB
R127	ODPOR	220	250mW	Not on PCB
R128	ODPOR	270	250mW	Not on PCB

R129	ODPOR	330	250mW	Not on PCB
R130	ODPOR	390	250mW	Not on PCB
R131	ODPOR	470	250mW	Not on PCB
R132	ODPOR	560	250mW	Not on PCB
R133	ODPOR	680	250mW	Not on PCB
R134	ODPOR	820	250mW	Not on PCB
R135	ODPOR	1k	250mW	Not on PCB
R136	ODPOR	1.2k	250mW	Not on PCB
R137	ODPOR	1.5k	250mW	Not on PCB
R138	ODPOR	1.8k	250mW	Not on PCB
U101	NE592		DIL14	Not on PCB

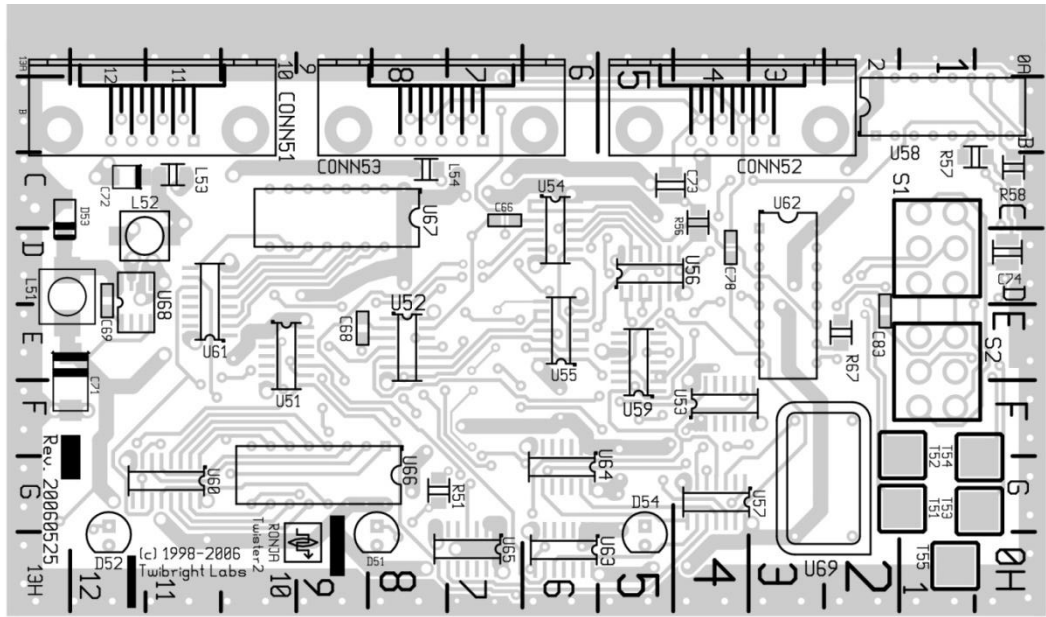
PŘÍLOHA P4: PŘEDLOHA A PLÁNY OSAZENÍ TWISTER2



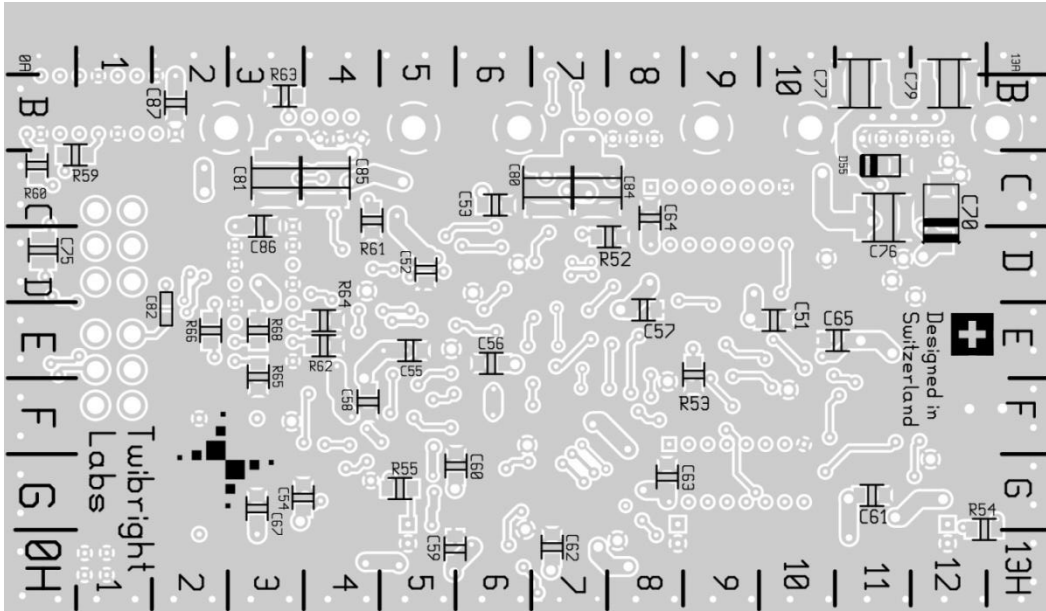
Předloha tištěného spoje Twister2 (vrchní strana)



Předloha tištěného spoje Twister2 (spodní strana)

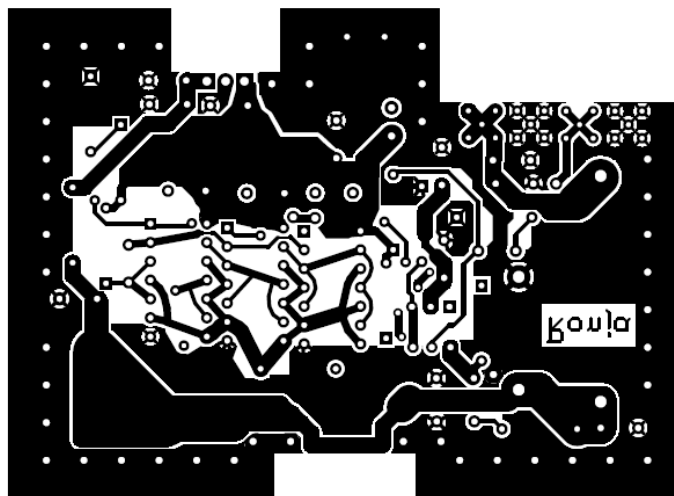


Osazení součástek plošného spoje Twister2 (vrchní strana)

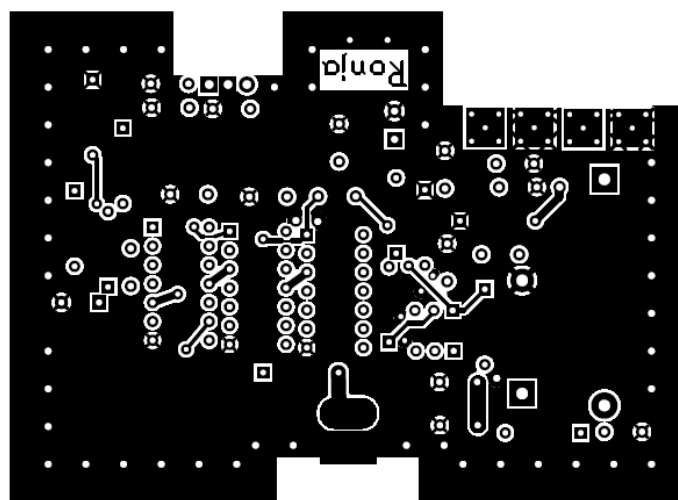


Osazení součástek plošného spoje Twister2 (spodní strana)

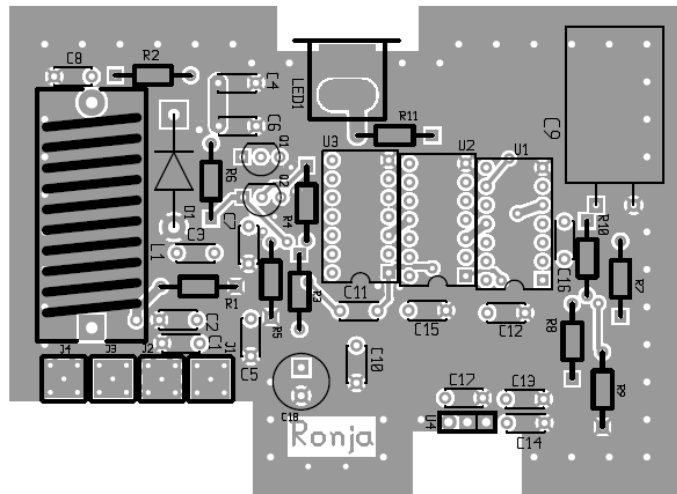
PŘÍLOHA P5: PŘEDLOHA A PLÁNY OSAZENÍ VYSÍLAČ TX



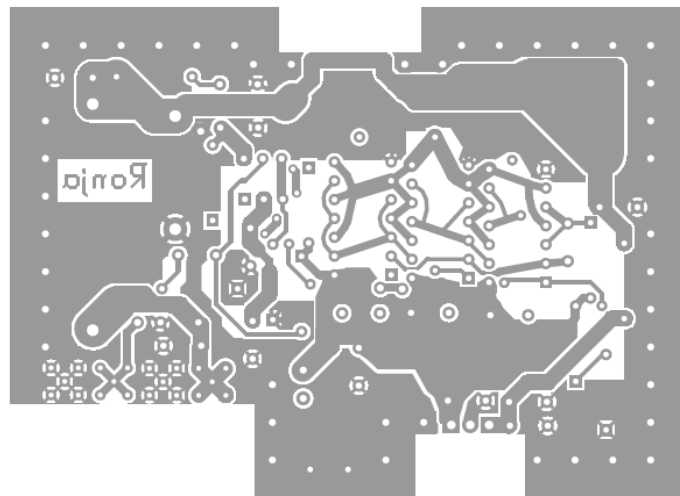
Předloha tištěného spoje TX (vrchní strana)



Předloha tištěného spoje TX (spodní strana)



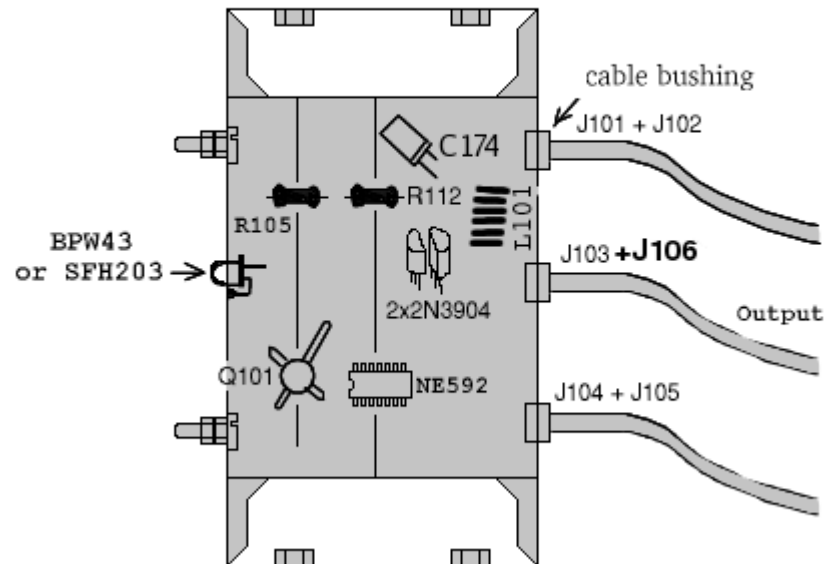
Osazení součástek plošného spoje TX (vrchní strana)



Osazení součástek plošného spoje TX (spodní strana)

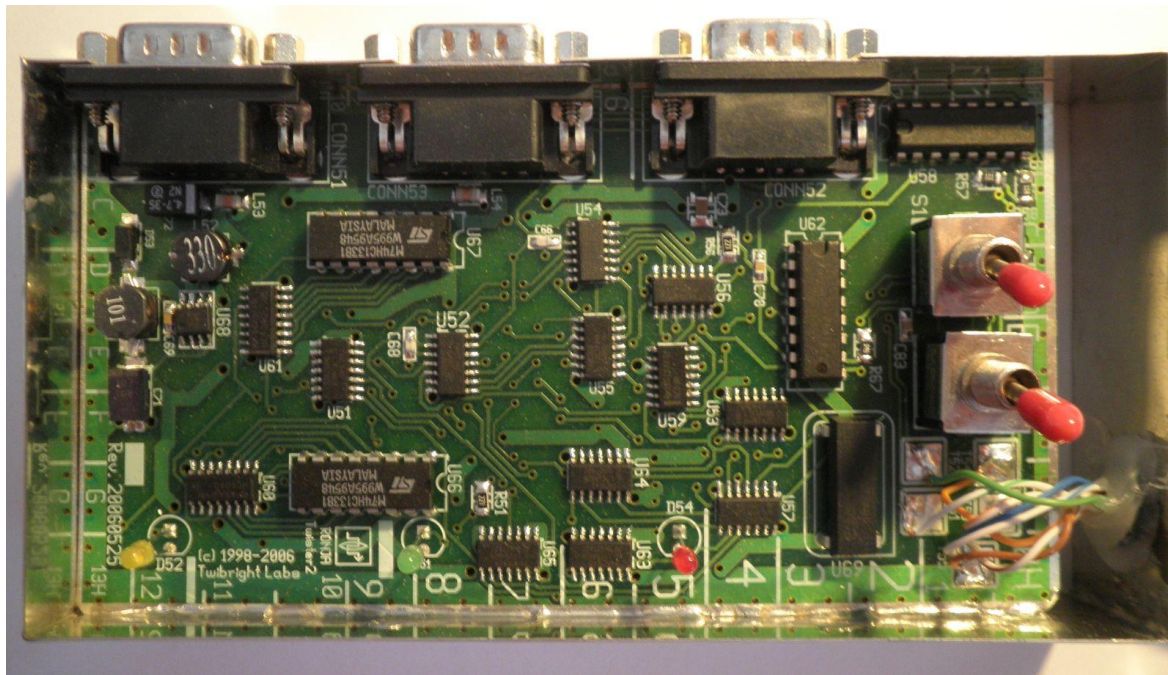
PŘÍLOHA P6: ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK PRO PŘIJÍMAČ RX

Receiver Component Placement

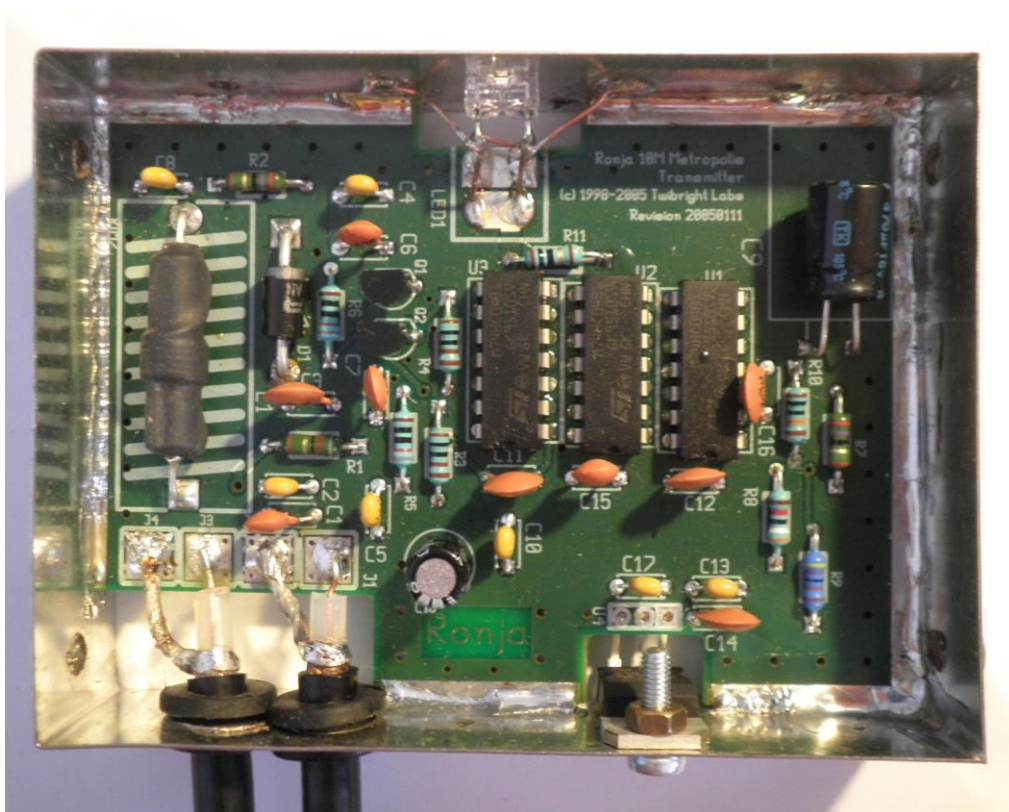


Osazení součástek v krabičce RX

PŘÍLOHA P7: FOTODOKUMENTACE HOTOVÝCH MODULŮ



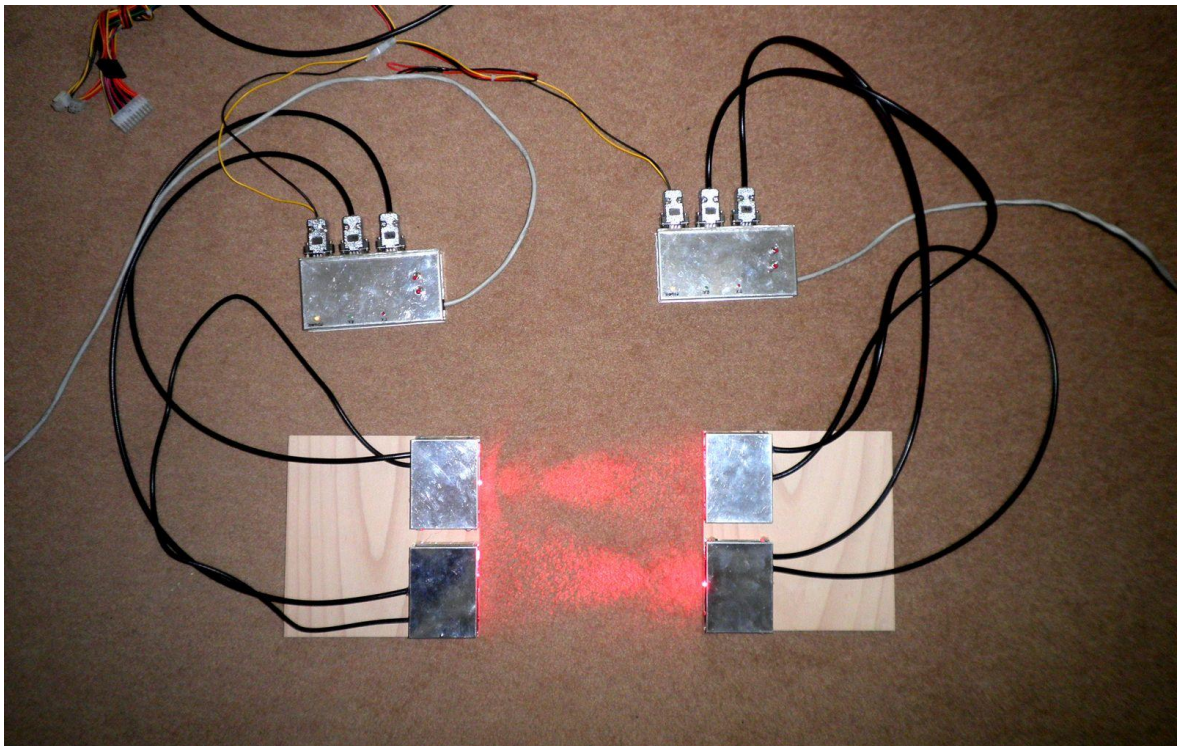
Kompletní modul Twister2



Kompletní modul TX

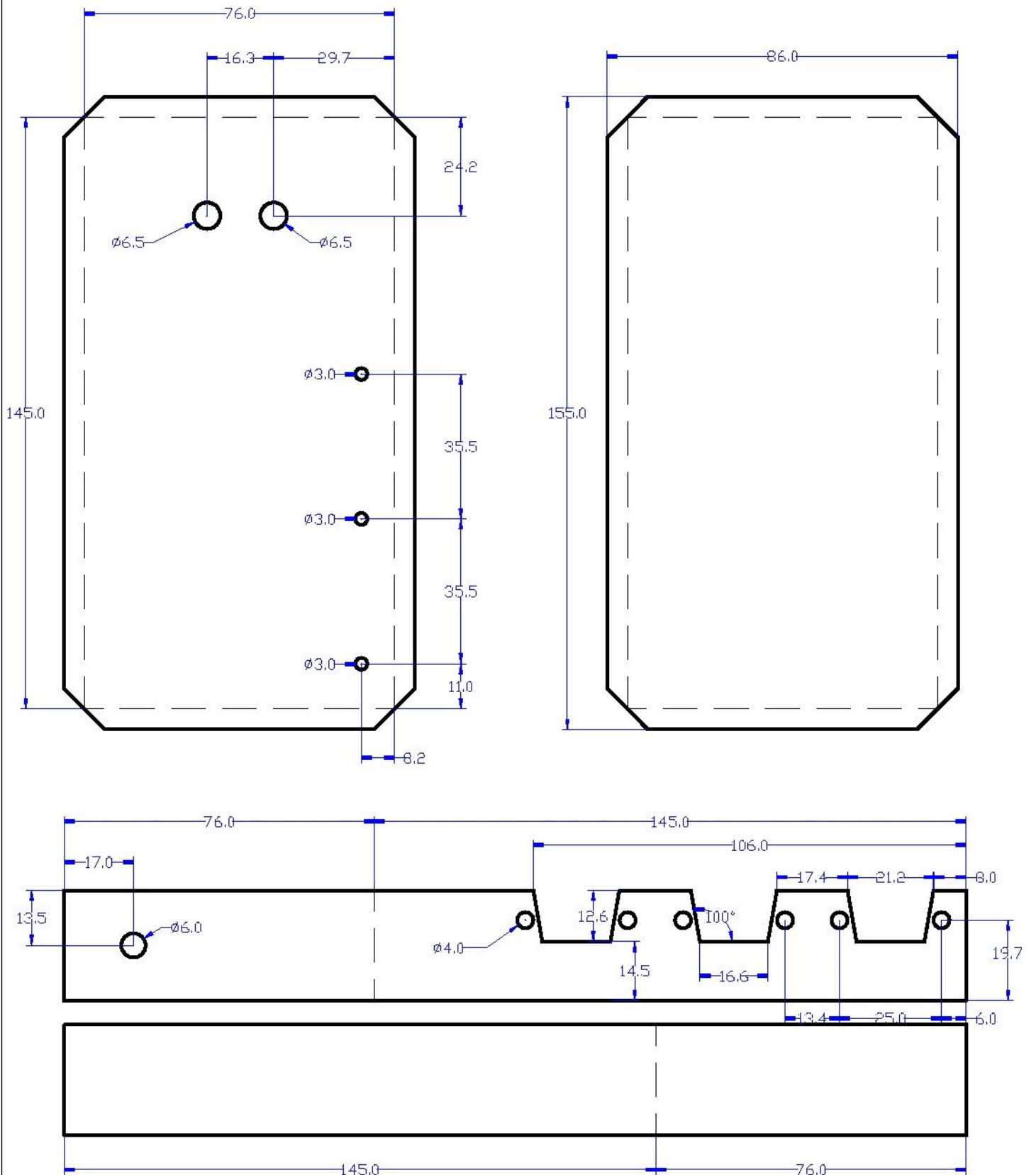


Kompletní modul RX

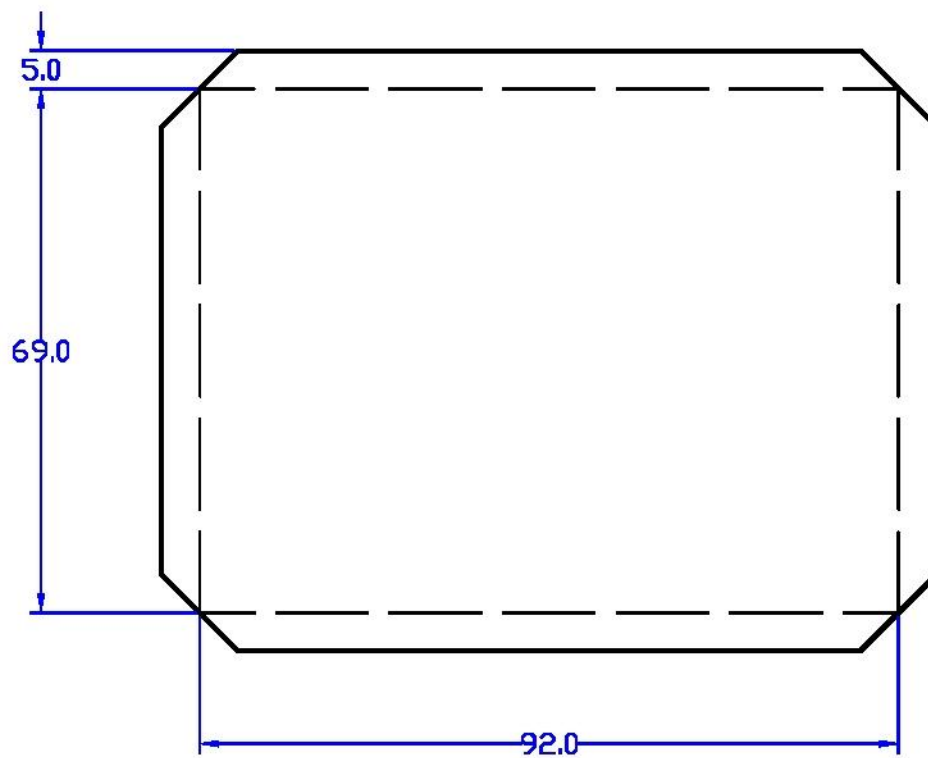
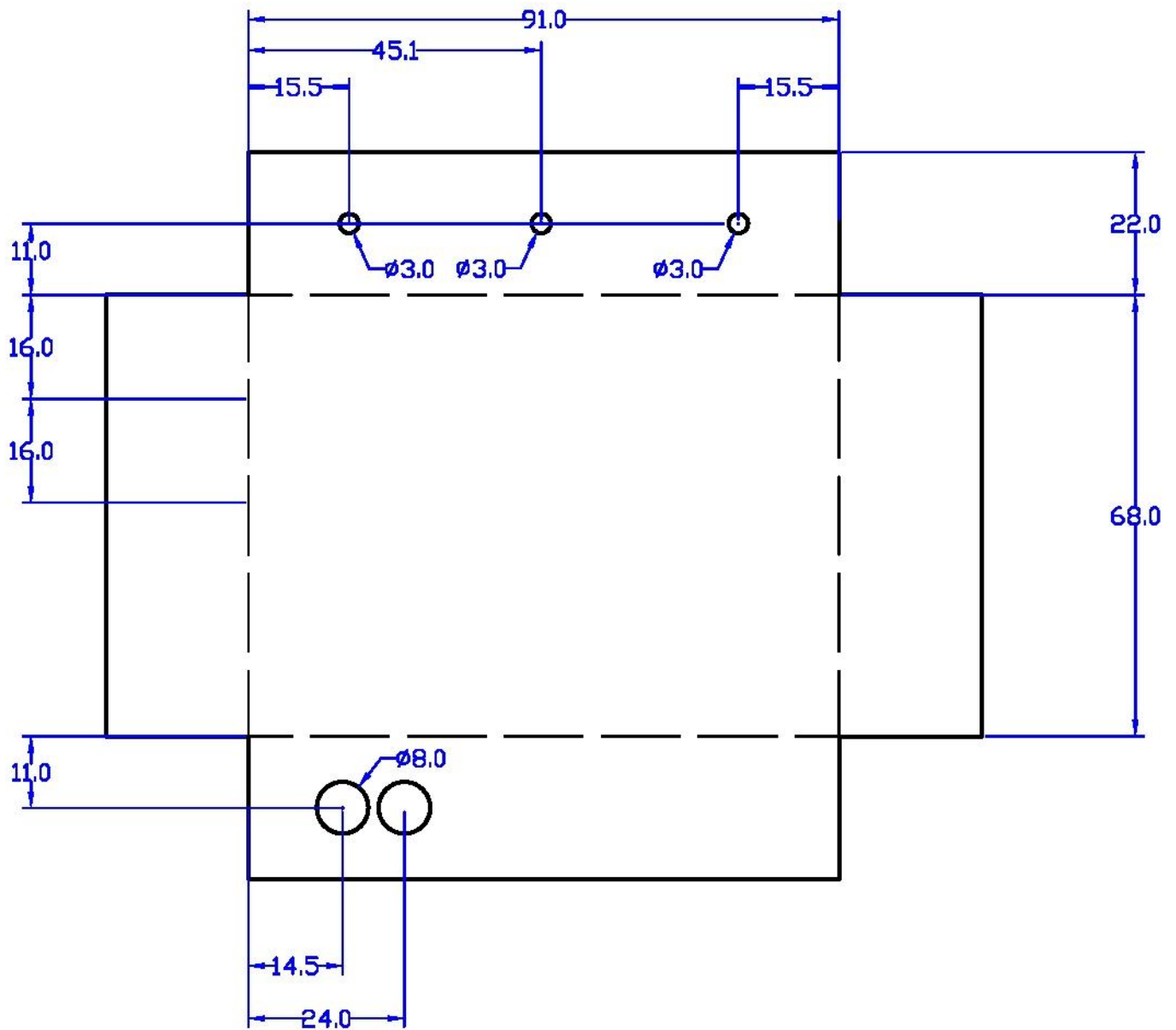


Zapojení modulů

Krabička pro Twister2, pocínovaný plech 0,5mm



Krabička pro TX, pocínovaný plech 0,5mm



Krabička pro RX, pocínovaný plech 0,5mm

