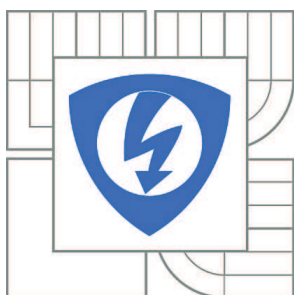


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VYSOKORYCHLOSTNÍ OPTICKÝ SPOJ PRO KRÁTKÉ VZDÁLENOSTI

LOW-RANGE HIGH-SPEED OPTICAL TRANSCEIVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

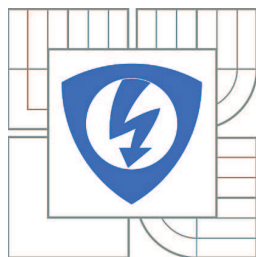
Bc. JAN PUČÁLKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL KUBÍČEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Jan Pučálka

ID: 119584

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Vysokorychlostní optický spoj pro krátké vzdálenosti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte koncepci malého vysokorychlostního optického spoje.

Navrhněte schéma a následně plošný spoj pro transceiver optického spoje. Minimalizujte počet potřebných součástek.

Realizujte optický spoj a ověřte jeho vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PROAKIS J. G. Digital Communications. 4th Edition, New York: McGraw-Hill, 2001, 1002 p. ISBN 0-07-232111-3

[2] SALEH, B. E. A. Základy fotoniky. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-00-6

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá popisem, návrhem a realizací vysokorychlostního optického spoje pro krátké vzdálenosti. V úvodu práce je rozebrána problematika optických bezkabelových spojů, jejich vlastnosti, parametry a topologie. Dále je pojednáno o světelných zdrojích a detektorech optického záření. V závěrečné části je zvolena varianta řešení, návrh, realizace a oživení vysokorychlostního optického spoje. Navržený spoj je plně duplexní a skládá se ze dvojice identických komunikačních hlavic (modulů). Jako světelný zdroj byla zvolena LED dioda, maximální přenosová rychlost je 100 Mb/s, síťové rozhraní je realizováno ve standardu 100Base-TX.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optický bezkabelový spoj, vysílač, přijímač, fotodioda, LED, atmosférické přenosové prostředí, turbulence

ABSTRACT

The diploma thesis deals with description and design of a low-cost free-space optical (FSO) link. First, general FSO theory is discussed including their common parameters, properties and topologies. Further, optical signal sources and detectors are proposed. Finally, the selected implementation is described including its design and realization. The proposed FSO consists of two identical segments (modules) to form a full-duplex link. The FSO utilizes LED as a light source, maximum speed data rate is 100 Mb/s with 100Base-TX interface.

KEYWORDS

Free-space optics link, transmitter, receiver, photodiode, LED, atmospheric transmission media, turbulence

PUČÁLKA, J. *Vysokorychlostní optický spoj pro krátké vzdálenosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 82 s., 15 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Kubíček, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vysokorychlostní spoj pro krátké vzdálenosti jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalovi Kubíčkoví, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	vii
SEZNAM TABULEK	x
ÚVOD.....	1
1 OPTICKÉ BEZKABELOVÉ SPOJE	2
1.1 Výhody optických bezkabelových spojů.....	2
1.2 Nevýhody optických bezkabelových spojů.....	3
1.3 Využití.....	3
1.4 Technologie.....	3
1.5 Spolehlivost a dostupnost.....	4
1.6 Bezpečnost	4
2 SLOŽENÍ A VLASTNOSTI FSO.....	5
2.1 Složení optického bezkabelového spoje.....	6
2.1.1 Vysílací systém.....	7
2.1.2 Přijímací systém	7
2.2 Horizontální a vertikální FSO	8
2.3 Optické svazky	9
2.3.1 Teorie světla	9
2.3.2 Rozdělení optického záření do pásem	9
2.3.3 Gaussův svazek	10
3 PARAMETRY A TOPOLOGIE FSO.....	14
3.1 Vnitřní parametry	14
3.2 Vnější parametry	14
3.3 Topologie optických bezkabelových spojů	15
3.3.1 Mesh topologie	15
3.3.2 Point to point topologie	15
3.3.3 Point-to-Multipoint.....	16
3.3.4 Ring with Spurs.....	16
4 ATMOSFÉRICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ A JEHO VLASTNOSTI	18
4.1 Složení atmosféry	19
4.1.1 Atmosférické turbulence	20
4.2 Stacionární a statistický model.....	24
4.2.1 Energetická bilance FSO spoje.....	24
4.2.2 Výkonový úroňový diagram a bilanční rovnice	26
4.2.3 Výkonová rezerva spoje	27

4.2.4	Přenosová rychlost	27
4.2.5	Dosah spoje	28
4.2.6	Chybovost spoje BER.....	28
5	ZDROJE SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ.....	30
5.1	Luminiscenční dioda LED	30
5.1.1	Aplikace	30
5.1.2	Vlastnosti LED.....	31
5.1.3	Typy LED.....	31
5.2	Laserové diody	32
5.2.1	Funkce laserových diod.....	32
5.3	LED vs laser v optických bezkabelových spojích.....	32
5.3.1	Laserové diody používané optických bezkabelových spojích.....	32
5.3.2	LED diody používané v optických bezkabelových spojích.....	33
5.3.3	Porovnání účinnosti světelných zdrojů.....	34
6	DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ.....	35
6.1	Fotodiody	35
6.1.1	Zapojení fotodiody a předzesilovače.....	37
6.1.2	Fotodiody typu PIN.....	37
6.1.3	Fotodiody typu APD.....	39
6.1.4	Použití fotodiod.....	39
7	NÁVRH A POPIS OPTICKÉHO BEZKABELOVÉHO SPOJE.....	40
7.1	RJ45.....	40
7.1.1	Napájení zařízení.....	41
7.1.2	Měnič DC/DC.....	42
7.2	Fyzická vrstva a transceiver	43
7.2.1	Základní technické parametry transceiveru	43
7.2.2	Rozhraní MII	45
7.2.3	MII vs RMII	45
7.2.4	Způsoby kódování	45
7.3	FPGA.....	47
7.3.1	FLASH paměť	48
7.3.2	USB UART	49
7.3.3	Oscilátor EG2102CA.....	50
7.4	LED Driver.....	51
7.4.1	LED dioda OP245PS.....	51
7.4.2	PECL	52
7.5	Přijímač	53
7.5.1	Transimpedanční zesilovač.....	53

7.5.2	Limitující zesilovač	54
7.5.3	Fotodioda.....	55
8	REALIZACE FSO	56
8.1	Návrh a výroba desek plošných spojů.....	56
8.2	Způsob osazení a pájení SMD součástek na PCB.....	56
8.3	Konfigurace FPGA.....	57
8.4	Oživení a ověření zařízení.....	60
	ZÁVĚR.....	61
	LITERATURA	62
	SEZNAM SYMBOLŮ.....	64
	SEZNAM ZKRATEK.....	67
	SEZNAM PŘÍLOH.....	70

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Základní blokové schéma optického komunikačního systému	5
Obr. 2.2:	Ukázka kódování binárního signálu pomocí RZ.....	5
Obr. 2.3:	Hlavice FSO pracující duplexním způsobem.....	6
Obr. 2.4:	Optická hlavice spoje a její složení (převzato z [23])	7
Obr. 2.5:	Model horizontálního optického bezkabelového spoje	8
Obr. 2.6:	Model vertikálního optického bezkabelového spoje	8
Obr. 2.7:	Spektrum viditelného světla	9
Obr. 2.8:	Závislost normované pološířky svazku na bezrozměrné souřadnici (převzato z [6])	11
Obr. 2.9:	Závislost normovaného poloměru křivosti Gaussova svazku na bezrozměrné souřadnici z/z_0 (převzato z [6]).....	12
Obr. 2.10:	Charakteristiky a parametry kruhově symetrického Gaussova svazku (převzato [6])	13
Obr. 3.1:	Zjednodušené schéma optického přenosu informace	14
Obr. 3.2:	Topologie Mesh (převzato z [25]).....	15
Obr. 3.3:	Topologie Point to point (převzato z [25]).....	16
Obr. 3.4:	Topologie Point to Multipoint (převzato z [25]).....	16
Obr. 3.5:	Topologie kruhová (převzato z [25]).....	17
Obr. 4.1:	Propustnost „čisté“ atmosféry na úrovni mořské hladiny při délce trasy 1 km a šířce spektrální čáry 1,5 nm (převzato z [10]).....	18
Obr. 4.2:	Atmosférické vrstvy se znázorněním zemského povrchu a umístěním horizontálního FSO s HAP	19
Obr. 4.3:	Turbulentní cely v jednom úseku optického svazku	21
Obr. 4.4:	Parametry úniků (převzato z [9]).....	21
Obr. 4.5:	Profil Gaussova svazku, eliptická stopa optického svazku a její intenzitní profil pro $I_0(x)=I_0(y)$ (převzato z [20])	22
Obr. 4.6:	Ideální kruhově symetrický Gaussov svazek (převzato z [20])	23
Obr. 4.7:	Rozložení optické intenzity svazku v případě turbulentní atmosféry (převzato z [20]).....	23
Obr. 4.8:	Plocha dostupného výkonu u svazku, který není ovlivněn atmosférickými turbulencemi (převzato z [20]).....	23
Obr. 4.9:	Model přenosu informace FSO (převzato z [20])	25
Obr. 4.10:	Znázornění významu veličiny $L0$ (pomocné délky) (převzato z [5]).....	25
Obr. 4.11:	Výkonový úroňový diagram (převzato z [10]).....	26
Obr. 4.12:	Charakteristika rezervy spoje M na vzdálenosti L_{12} (převzato z [10]).....	27

Obr. 4.13:	Graf znázorňující vztah mezi přenosovou rychlostí a dosahem spoje pro optické bezkabelové a optické vláknové spoje (převzato [20])	27
Obr. 4.14:	Závislosti BER na SNR (převzato z [20])	29
Obr. 5.1:	Porovnání šířky spektra emitovaného záření pro LED a LD (převzato z [15])	33
Obr. 5.2:	Účinnost světelných zdrojů	34
Obr. 6.1:	Pracovní režim fotodiody: a) hradlový b) odporový (převzato z [12])	36
Obr. 6.2:	VA-charakteristika fotodiody (převzato z [6])	37
Obr. 6.3:	Blokové schéma přijímače ukazující jeho systémovou funkci (převzato z [6])....	37
Obr. 6.4	Struktura fotodiody PIN	37
Obr. 7.1:	Koncepce optického spoje	40
Obr. 7.2:	Zásuvka konektoru RJ-45, konektor DJJ202	40
Obr. 7.3:	Způsob napájení POE -varianta A (převzato z [8]).....	41
Obr. 7.4:	Způsob napájení POE - varianta B (převzato z [8])	42
Obr. 7.5:	Univerzální pasivní POE injektor.....	42
Obr. 7.6 :	DC/DC měnič	43
Obr. 7.7:	Funkční diagram transceiveru (převzato z [18])	44
Obr. 7.8:	Zapojení transceiveru	44
Obr. 7.9:	KSZ8051MLL MII rozhraní (převzato z [18]).....	45
Obr. 7.10:	Představa kódování u jednotlivých verzí Ethernetu [22]	46
Obr. 7.11:	Kódování MLT – 3 (multi level transition).....	46
Obr. 7.12:	Princip převodu obvodových logik	47
Obr. 7.13:	Napěťové regulátory.....	48
Obr. 7.14:	Schéma zapojení JTAG konektor (převzato z [33]).....	48
Obr. 7.15:	Paměť FLASH.....	49
Obr. 7.16:	Schéma zapojení USB UART s převodníkem FT232R	50
Obr. 7.17:	Konektor USB typu B	50
Obr. 7.18:	Oscilátor EG2102CA	51
Obr. 7.19:	LED Driver	52
Obr. 7.20:	a) Schéma zapojení terminálu PECL.....	52
Obr. 7.21:	b) Schéma zapojení terminálu PECL	52
Obr. 7.22:	Vnitřní zapojení TIA AD8015	53
Obr. 7.23:	Zapojení transimpedančního zesilovače s fotodiódou.....	54
Obr. 7.24:	Limitující zesilovač	55
Obr. 8.1:	Princip paměti FIFO	59
Obr. 8.2:	Vnitřní struktura přenosu dat v obvodu FPGA na vysílací stranu	59

Obr. 8.3:	Vnitřní struktura přenosu dat v obvodu FPGA na přijímací stranu	59
Obr. 8.4:	Ověření funkčnosti obvodu FPGA	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1:	Dělení FSO podle dosahu.....	6
Tab. 2.2:	Dělení FSO podle přenosové rychlosti.....	6
Tab. 2.3:	Přehled jednotlivých barevných oblastí optických vlnových délek	9
Tab. 4.1:	Tabulka stavů atmosféry pro hodnoty V_M a α (převzato z[10]).....	20
Tab. 4.2:	Hodnoty SNR a BER a vzájemný vztah mezi nimi.....	29
Tab. 5.1:	Vlastnosti optických zdrojů záření	34
Tab. 7.1:	Vlastnosti oscilátoru EG2102CA	50
Tab. 7.2:	Parametry LED diody.....	51

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá optickými bezkabelovými spoji. Tyto spoje se využívají hlavně tam, kde je obtížné pokládat optické či metalické kabely. Technologie sahá do 60 let minulého století, ale mnohem většího uplatnění se jí dostává až dnes. Tyto spoje nabízí vysoké rychlosti na krátké vzdálenosti (< 5 km), rychlou instalaci a relativně nízké náklady.

Cílem mé diplomové práce je navrhnout koncepci vysokorychlostního optického spoje, desky plošného spoje a realizovat zařízení, které umožňuje obousměrnou komunikaci. Spoj by měl bezkabelově komunikovat na vzdálenost cca 100 m s přenosovou rychlostí 100 Mb/s, a se standardní variantou síťového rozhraní 100Base-TX. Za zdroj světelného paprsku může být použita laserová nebo luminiscenční dioda LED. Zařízení by mělo umožňovat možnost napájení přes 5 V adaptér, i přes síťový kabel (POE).

Zařízení, které bezkabelově propojuje dva počítače, pomocí světelného paprsku se nazývá optické pojítko. V některých českých publikacích se používá pojem atmosférický optický spoj, bezkabelová optika, v anglických literaturách bývá časté označení Free Space Optics (FSO) nebo optical wireless communication aj. K bezkabelovému přenosu je nezbytné vysílací a přijímací zařízení. Přenosovým médiem je vakuum nebo vzduch (atmosféra), kterým se šíří světelný paprsek ve viditelné části spektra nebo jeho blízkosti a ten je modulován. Ve většině případů FSO používá modulaci intenzivní s přímou detekcí a dvoustavovým klíčováním, stejně jako je tomu u vláknových optických spojů. Nejčastěji se jako zdroj světelného paprsku ve vysílači využívá laserová dioda, infračervená nebo vysoce svítivá luminiscenční dioda LED. Rozdíly u těchto světelných zdrojů jsou např. v šířce pásma, vysílacího výkonu, životnosti, ceně apod. Na delší vzdálenosti se využívají lasery, které mají vysoký světelný výkon a úzký světelný paprsek. LED diody se využívají pro krátké vzdálenosti, a tam, kde není zapotřebí vysoká přenosová rychlost.

Zdroje světelného záření se využívají k přenosu informací jak optickým vláknem, tak volným prostorem. V této práci je pojednáno o přenosu informace volným prostorem. Optické bezkabelové spoje dále jen FSO, mají vysoké přenosové rychlosti, jsou bezpečné a spolehlivé. Nicméně jsou náchylné na atmosférické vlivy a mezi vysílací a přijímací soustavou musí být přímá viditelnost. Jako zdroj světelného paprsku je zde použita vysoce svítivá luminiscenční dioda pracující v IR pásmu. Hlavním důvodem výběru je snadnější návrh, spolehlivost a cena zařízení. Optický spoj je realizován pro krátkou vzdálenost, kde se využívají ve většině případů diody LED, u kterých není zapotřebí vysokého vysílacího výkonu.

V porovnání s ostatními bezkabelovými přenosovými technologiemi např. rádiové či mikrovlnné spoje, je FSO mnohem bezpečnější, jelikož jeho laserový paprsek je velice úzký a těžko odposlouchávatelný. Vzhledem ke krátké vlnové délce paprsku je divergence mnohem menší, než v případě rádiového nebo mikrovlnného spoje.

1 OPTICKÉ BEZKABELOVÉ SPOJE

Optické bezkabelové spoje jsou spoje, které bývají složeny ze dvou totožných zařízení a umožňují simplexní i duplexní provoz volným prostorem pomocí digitálního signálu mezi vysílací a přijímací částí. Vysílače a přijímače bývají umístěny většinou na střechy budov (rovné i skosené), na stožáry u oken apod. Pro zvýšení spolehlivosti komunikace se v dnešní době využívají až čtyři laserové paprsky. Tyto spoje jsou provozované jak v uzavřené místnosti, tak ve volném ovzduší (přesněji v troposféře) nebo v kosmickém prostoru.

Tyto spoje jsou v dnešní době velmi populární, nicméně mají jisté nevýhody jako každé zařízení. První nevýhoda co člověka napadá, je možnost odposlechu, dále přenosová kapacita ve srovnání s pevnými sítěmi a nakonec nespolehlivost komunikace v závislosti na prostředí (atmosférické vlivy – mlha, hustý déšť). FSO jsou maximálně bezpečné a mají širokopásmový symetrický přenos k uživateli, proto první dvě nevýhody se těchto spojů netýká.

FSO nabízí přenosovou rychlost srovnatelnou s optickým kabelem na vzdálenost v řádu kilometrů (v dnešní době typicky od 155 Mbit/s, 622 Mbit/s až po 1 Gbit/s, experimentálně až 100 Gbit/s), vysokou bezpečnost a také jednoduchou a rychlou instalaci. Pro instalaci (zaměření optických hlavic) jsou zapotřebí alespoň dva lidé. Montáž nezabere více než tři hodiny a kromě obvyklých montážních nástrojů potřebují jen běžný voltmetr. Vzhledem k nutnosti velmi přesného zaměření optického paprsku je nutné dbát na zajištění co nejpevnějšího uchycení optických hlav, jinak hrozí snížení (zhoršení) přenosových parametrů spojení. [1]

Dosah FSO bývá omezen pouze na několik kilometrů (cca do 5 km), jelikož mezi vysílací a přijímací soustavou je zapotřebí přímá viditelnost (bez trvalé překážky).

1.1 Výhody optických bezkabelových spojů

- Přenosová rychlost: 1,5 Mb/s - 10 Gb/s (100 Gb/s)
- Chybovost BER: až 10^{-9}
- Vzdálenost: do 5 km (s použitím nejvýkonnějších zařízení)
- Flexibilita: instalace či reinstalace celého řešení je flexibilní jako bezkabelový přenos
- Bezpečnost: úzký vyzařovací paprsek, vysílače a přijímače bývají umístěny na bezpečném místě
- Nelicencované pásmo: FSO pracuje v pásmu, které je imunní proti jakýmkoliv interferencím
- Instalace: jednoduchá
- Umístění: střecha domu či budovy, za okno apod.
- Vývoj: vyzkoušená technologie, vyvíjena více jak 35 let
- Cena/výkon - tato pojítka jsou u vysokých přenosových kapacit cenově přístupnější nebo srovnatelná v porovnání s radiovými pojítky, které pracují v licencovaném pásmu

- Transparentnost - pro jakýkoliv datový provoz, tzn. lze přenášet jak data různých specifikací, tak hlasové kanály

1.2 Nevýhody optických bezkabelových spojů

- Mezi vysílačem a přijímačem musí být přímá viditelnost, nicméně krátké přerušení paprsku některým typům služeb nevadí a některé optické spoje mají implementovány algoritmy pro obnovu či opravu ztracených rámců (ARQ, FEC).
- Atmosférické jevy – pokud nastane hustá mlha (dlouhodobě), řeší se instalací záložního radiového spoje, kterému mlha nevadí, ale déšť podstatně ano.
- Dosah FSO je obvykle do cca 1 km. Čím kratší je vzdálenost, tím vyšší spolehlivosti se dosáhne.

1.3 Využití

Optické bezkabelové spoje se využívá hlavně tam, kde se nevyskytuje optická pevná síť nebo kde se nepříliš snadno pokládají kabely. Ve městech obvykle bývá obtížné pokládat kabely do nově zkonstruovaných silnic, a proto se využívá bezkabelové optiky, která je časově i ekonomicky výhodná. FSO dále pomáhá překonat řeky i jiné vodní plochy, které pro pevné sítě znamenají opravdu problém. FSO se využívá pro datové, hlasové nebo video služby. S touto technologií se setkáváme jak na zemi, tak i ve vesmíru.

FSO se neomezuje pouze na komerční zákazníky, ale mohou ji využít také domácí uživatelé nebo domácí kanceláře, kterým umožní řešit problematickou a různě omezenou komunikaci v přístupové síti při požadované vysoké propustnosti a vysoké bezpečnosti. Vyžaduje to ovšem ochotu si za FSO příslušně připlatit, protože cenově se jedná o řešení konkurující jen pevné optické přípojce. Jediným problémem pak zůstává spolehlivost komunikace v závislosti na počasí, ale to závisí na místě instalace bezkabelového optického spoje, a problém lze řešit využitím záložního radiového spoje. [1]

1.4 Technologie

Pro bezkabelový přenos FSO využívá optické pulsně modulované signály. V dnešní době přenosová rychlost FSO systémů se pohybuje od 1,5 Mbit/s až po řádově GBit/s (10 GBits/s). Dle použitých optických prvků se používají pro přenos vzduchem tyto vlnové délky:

- dlouhé vlny okolo 1550 nm
- krátké vlny okolo 850 nm.

Signály na těchto vlnových délkách patří do infračerveného spektra a jsou okem neviditelné.

Mezi základní požadavek FSO systémů je nutná přímá viditelnost mezi transceivery, ať už s LED či laserovou diodou na straně vysílače, které komunikují na fyzické vrstvě v režimu full duplexu. Lasery se v optických spojích používají výrazně častěji, i když v poslední době se přichází na trh s LED, které dosahují s ohledem na vlivy počasí spolehlivost (99,995 %). U FSO se občas vyskytují nevelké problémy s přenosem informací mezi transceivery, což způsobuje náhodná překážka.

Pokud se nějaký předmět vyskytne v dráze světelného paprsku (např. pták, hejno ptáků či hmyz), komunikace je přerušena. V počítačových sítích se řeší krátkodobý výpadek v komunikaci opětovným vysláním ztracených či poškozených paketů. [3]

1.5 Spolehlivost a dostupnost

Každá technologie má své výhody i nevýhody. Hlavní nevýhoda FSO je počasí a zejména mlha, která má na úroveň (kvalitu) signálu značný dopad. Tato nevýhoda má ovšem jisté řešení. Nepřízeň počasí lze do jisté míry eliminovat vhodnou instalací a dodržením několika technologických zásad, mezi které např. patří:

- vícesvazkové šíření signálu, které zajistí odolnost proti atmosférickým vlivům, a také proti zaclonění paprsku přelétajícím ptákem (hejnem ptáků)
- použití výkonných vysílacích soustav na kratší vzdálenosti
- zajištění směrové stability spoje systémem "autotracking", který zajistí aktivní zaměrování a úpravu paprsku dle potřeby

U bezkabelové optiky platí, čím kratší je vzdálenost, tím vyšší spolehlivosti se dosáhne. Jak už bylo zmíněno výše, jediný velký problém při přenosu dat způsobují opravdu husté mlhy, které lze správným naddimenzováním spoje nebo instalací záložního spoje efektivně odstranit. Déšť nebo sníh optickým přenosům ve volném prostoru zásadně nevadí. Pokud optický bezkabelový spoj v daný moment nedosahuje vysokou dostupnost, bývá často nahrazen rádiovým spojením, kterému mlha problémy nedělá a pracuje bez komplikací. Lze podotknout, že rádiovému spoji vadí hustý déšť, kdežto optickému bezkabelovému spoji nevadí, a to je jeho velkou výhodou.

Spolehlivost optických bezkabelových spojů je možné zajistit např. vhodnou konfigurací síťové topologie (kruhové, které umožňují automatické přesměrování) nebo prostorovou diverzitou (zvýšená divergence paprsku nebo více paralelních paprsků). [3]

1.6 Bezpečnost

Bezpečnost FSO systémů je na velice dobré úrovni, pokud dojde na srovnání např. s bezkabelovou lokální sítí WLAN (Wireless Local Area Network). U FSO systémů je optický paprsek, který se přenáší volnou atmosférou obtížně zachytitelný a „nelze“ jej odposlouchávat, jak je tomu např. u mikrovlnných nebo rádiových spojů. Pokud by se případný narušitel pokoušel informace odposlouchávat, musel by mít přístup přímo k laserovému paprsku, což je velice náročné. Optický paprsek je totiž velice úzký, nachází se vysoko nad zemí a často neviditelný. Tyto systémy jsou velice bezpečné, a proto jsou využívány např. u tajných služeb či armádě.

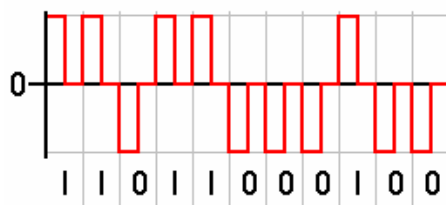
2 SLOŽENÍ A VLASTNOSTI FSO

Optický bezkabelový spoj je komunikační systém, který slouží k přenosu informace volným prostorem (atmosférou). FSO zpracovává informace prostřednictvím optické nosné vlny, která se může energeticky nebo vlnovými délkami dělit do více optických kanálů. To znamená, že se může svítit na několika barvách. FSO se zpravidla skládá ze tří základních bloků: optický vysílač, optický přijímač a přenosové prostředí. Na obr. 2.1 je uvedeno základní blokové schéma optického komunikačního systému.



Obr. 2.1: Základní blokové schéma optického komunikačního systému

Do optického vysílače přichází vstupní elektrický signál, který je modulován a zakódován. Upravený elektrický signál se převede pomocí převodníku na signál optický a pomocí LED nebo laserových diod (LD) dochází k emisi světla do přenosového prostředí. Jakmile přijímač přijme optický paprsek, dojde k inverzní přeměně signálu optického na elektrický. Nejprve je nutné přenesený signál zesílit. Poté se tento signál demoduluje, případně dekóduje a demultiplexuje. Základní používaná kódování jsou linkové viz obr. 2.2 (NRZ, RZ, CMI), a transportní (5b6b, Manchester, NRZ).



Obr. 2.2: Ukázka kódování binárního signálu pomocí RZ

FSO se rozděluje podle:

- Zpracování signálu: analogové a digitální
- Požadované náročnosti zajišťované služby: úzkopásmové, širokopásmové
- Způsobu modulace: s intenzitní modulací, s modulací pole (koherentní)
- Systémů s modulací pole: s amplitudovou, kmitočtovou a fázovou modulací.

Vlnové délky optických zdrojů světla se ve vysílačích často pohybují v okolí 850 nm a 1550 nm. Tyto vlnové délky jsou nejideálnější pro přenos skrz atmosféru (propustnost téměř 100 %) a jsou také bezpečné pro lidský zrak. U FSO se přenáší signál většinou s digitální modulací. Systémy, které nepřenášejí informace vysokými přenosovými rychlostmi, používají jiný druh modulace, např. AM nebo FM.

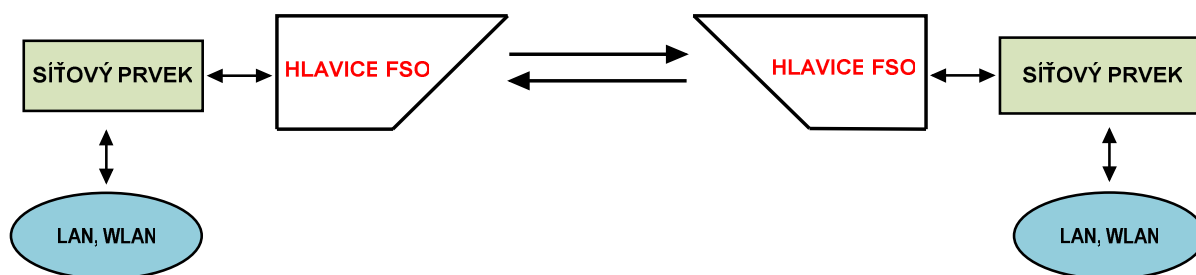
FSO pracují jako:

- Analogové nebo **digitální**
- Všesměrové nebo **směrové**
- V kosmickém prostoru nebo v **atmosféře**
- **Ve volném prostoru** nebo v uzavřené místnosti.

Vyznačená slova jsou z důvodu častého použití. FSO systémy se dále rozlišují na 2 směry komunikace, které se nazývají horizontální a vertikální.

2.1 Složení optického bezkabelového spoje

Systém FSO je obvykle složen ze dvou hlavic, které jsou zobrazeny na obr. 2.3. Tyto hlavice pracují simplexním nebo duplexním způsobem. Většinou ale pracují mezi sebou plně duplexním způsobem a jsou připojeny k osobnímu počítači, serveru, síťovému přepínači, směrovači nebo ústředně. Hlavice jsou vybaveny vysílacím a přijímacím systémem (VS a PS). Tyto systémy komunikují s PC pomocí optického vlákna nebo metalického kabelu. FSO je protokolově transparentní a nahrazuje optické vedení.



Obr. 2.3: Hlavice FSO pracující duplexním způsobem

Dalším způsob, jak lze optické bezkabelové spoje rozdělit je podle dosahu a přenosové rychlosti, které jsou uvedeno v Tab. 2.1 a

Tab. 2.2.

Tab. 2.1: Dělení FSO podle dosahu

charakter dosahu	vzdálenost hlavic od sebe
velmi krátký	(0 - 10) m
krátký	(10 - 100) m
střední	(500 - 2000) m
dlouhý	více než 2 km

Tab. 2.2: Dělení FSO podle přenosové rychlosti

charakter rychlosti	přenosová rychlost spoje
nízká	nížší než 1 Mbit/s
střední	(1 - 10) Mbit/s
vysoká	vyšší než 10 Mbit/s

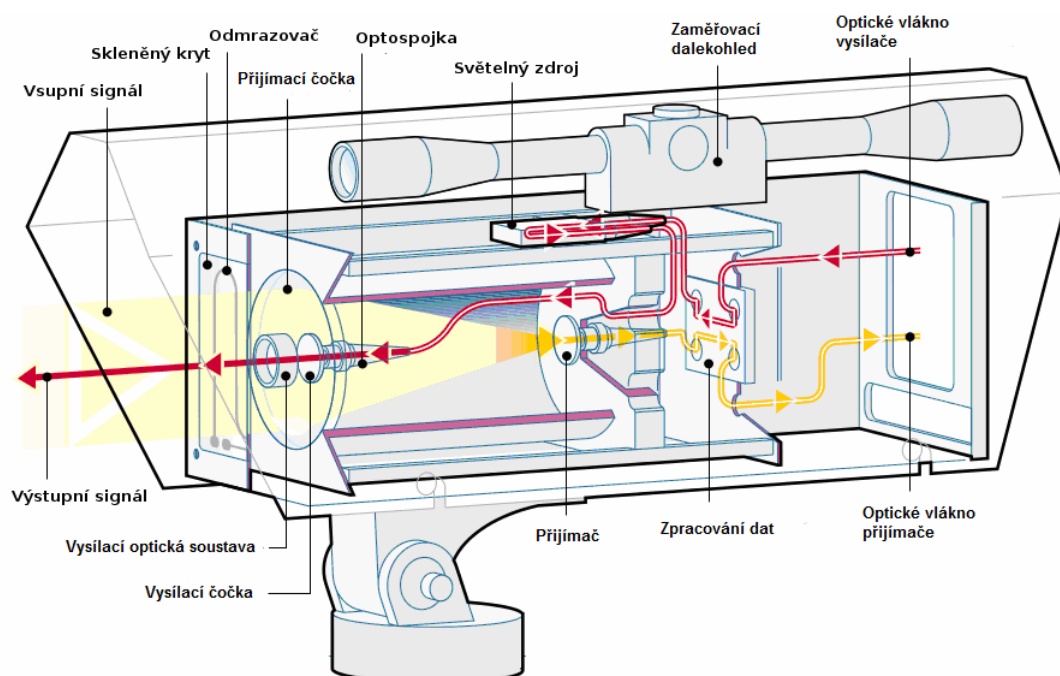
2.1.1 Vysílací systém

Vysílací systém je část hlavice, která přenáší vstupní data a převádí je na vyzařovaný optický svazek a zabezpečuje jeho modulaci. Příklad typické skladby hlavice optického spoje je uveden na obr. 2.4. Mezi hlavními bloky vysílacího systému patří: budič optického zdroje, laserová dioda nebo LED, zaměřovací systém, elektronický blok zaměřovacího systému a vysílací optická soustava (VOS).

Pomocí vysílací optické soustavy se provádí tvarování optického svazku, které je nezbytné pro kvalitní příjem. Důvodem je, aby všechna energie nebyla soustředěna do jednoho bodu optického svazku. Dalším blokem, který svazek prochází je optický průzor, sloužící jako ochrana proti nečistotám vyskytujících se v atmosféře. Pro správné nasměrování optického paprsku slouží zaměřovací systém, který může být ovládán mechanicky nebo elektronicky. Součástí hlavice je i pevně spojený dalekohled, který se používá pro hrubé nastavení. [26]

2.1.2 Přijímací systém

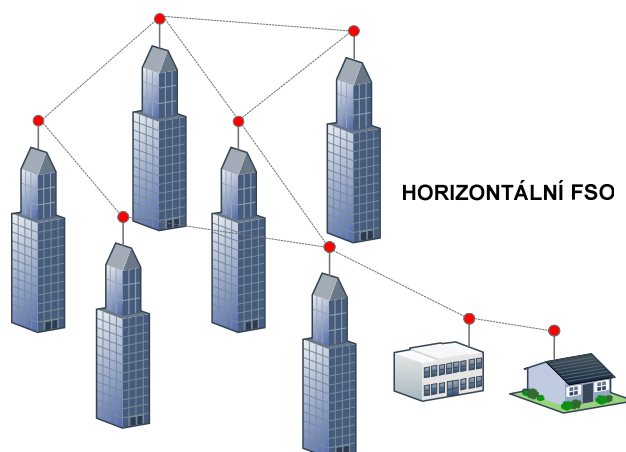
Přijímací systém bývá umístěn na přijímací straně vzdálené od vysílače cca do 1 km, záleží na typu spoje. V přijímacím systému je hlavice, která pomocí přijímací optické soustavy (POS), ve které se nachází přijímací čočka, soustřeďuje přijatý optický svazek na aktivní plochu fotodiody (FD). Nejpoužívanější čočkou je Fresnelova, jelikož její hmotnost je nižší, než je u běžných čoček a jsou z ní odstraněny části, které se nepodílejí přímo na lomu paprsků. Hlavními bloky přijímacího systému jsou: přijímací optická soustava, fotodioda, předzesilovač (PZ) a demodulátor. Nejčastější měniče optického signálu na elektrický, které se dávají do přijímacího systému, jsou fotodiody PIN.



Obr. 2.4: Optická hlavice spoje a její složení (převzato z [23])

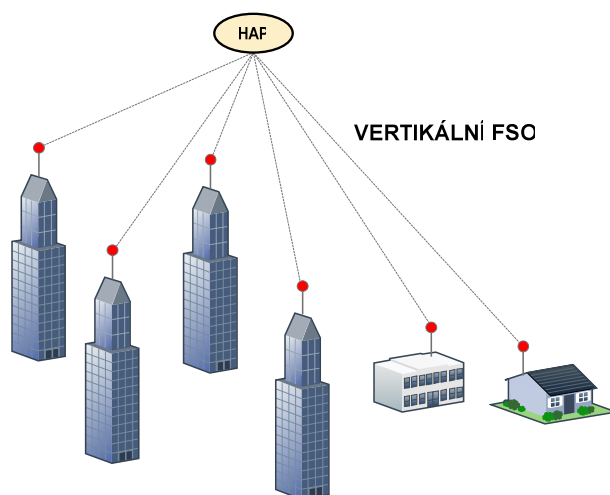
2.2 Horizontální a vertikální FSO

V dnešní době se vyskytují FSO, které se dělí na dva způsoby komunikace, a to buď horizontální, nebo vertikální. Vertikální spoje jsou zatím používané jen velmi zřídka, naopak horizontální se rozšiřují čím dál více. Na obr. 2.5 je ukázáno FSO v horizontálním směru, kde optické hlavice na střechách budov jsou od sebe vzdáleny stovky metrů. Standardní vzdálenost je od 300 do 500 metrů. Tyto spoje se vyskytují ve větších městech, nicméně dochází k určitým jevům, které tyto spoje ruší.



Obr. 2.5: Model horizontálního optického bezkabelového spoje

Vertikální FSO (viz obr. 2.6) ještě nejsou v takovém vývoji, jak je tomu u horizontálních. Komunikace těchto spojů probíhá mezi pozemní stanicí a stanicí HAP (High Altitude Platform), která se nachází obvykle ve výšce desítek kilometrů nad zemským povrchem (troposféře). [20]



Obr. 2.6: Model vertikálního optického bezkabelového spoje

2.3 Optické svazky

2.3.1 Teorie světla

Světlo je elektromagnetické záření (vlnění), jehož spektrum leží mezi infračerveným a ultrafialovým zářením. Světlo lze popsat třemi základními parametry, a jsou to vlnová délka, svítivost (amplituda záření) a polarizace (úhel vlnění). Rychlost světla ve vakuu je přibližně $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Rychlost světla v jiném prostředí (voda, sklo) je jiná, a to vždy menší. Změnu rychlosti šíření záření názorně charakterizuje veličina index lomu prostředí n . Index lomu, je bezrozměrná veličina, která udává všeobecné vlastnosti elektromagnetického záření v látce a lze na ni pohlížet jako na konstantu nebo frekvenčně závislý parametr. Pokud index lomu považujeme za konstantu vztahující se k celému rozsahu viditelného světla, pak rychlost šíření v záření v daném prostředí je dáno vztahem

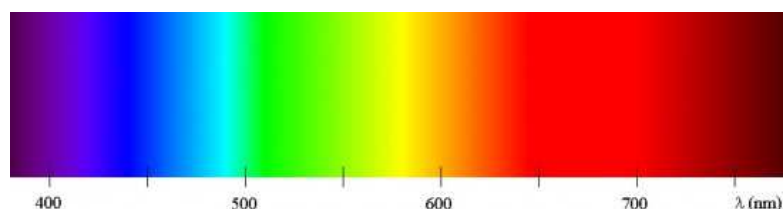
$$v = \frac{c}{n}. \quad (2.1)$$

2.3.2 Rozdělení optického záření do pásem

Optické záření lze rozdělit na viditelné záření (VIS – visible), infračervené záření (IR–infrared) a ultrafialové záření (UV – ultraviolet). Pro člověka viditelné elektromagnetické záření je v rozmezí okolo 380 – 760 μm . V následující tabulce je ukázán přehled barevných oblastí optických vlnových délek. [20]

Tab. 2.3: Přehled jednotlivých barevných oblastí optických vlnových délek

Záření	Rozsah vlnových délek [nm]
Ultrafialové	Pod 400
Fialové	400-430
Modré	430-490
Zelené	490-570
Žluté	570-590
Oranžové	590-650
Červené	650-750
Infračervené	Nad 750



Obr. 2.7: Spektrum viditelného světla

V optických bezkabelových komunikacích se využívají nejčastěji vlnové délky z infračervené oblasti z důvodu nejlepší propustnosti v atmosféře. Systémy využívající zdroje záření ve viditelné oblasti spektra pak nacházejí své uplatnění spíše v zobrazovacích technologiích, např. LED nebo OLED displeje, anebo při osvětlování, např. světlometry automobilů, ale i energeticky nenáročné svítivny. [20]

2.3.3 Gaussův svazek

Optické vlny se šíří v úzkém svazku (řádově jednotky miliradiánů) podél osy z v souřadnicové soustavě xyz . Zde se objevují paraxiální vlny, což jsou vlny, jejichž normály vlnoploch svírají s touto osou malý úhel. Touto vlnou je i vlna nazývána Gaussův svazek. Následující vztahy v této kapitole jsou převzaty z literatury [6]. Tyto vlny vyhovují Helmholtzově vlnové rovnici

$$\nabla^2 \dot{E}(x, y, z) + k^2 \dot{E}(x, y, z) = 0, \quad (2.2)$$

kde $\dot{E}(x, y, z)$ je komplexní amplituda a k vlnové číslo. Vlnové číslo se vypočítá podle známého vztahu

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}. \quad (2.3)$$

Východiskem vlnové rovnice je vlna, která se nazývá laserový svazek. Často se v odborných literaturách užívá pojem Gaussovský svazek.

U Gaussovského svazku je optický výkon soustředěn do úzkého kužele a optická intenzita v rovině kolmé na směr šíření vlny je určena kruhově symetrickou gaussovskou funkcí s maximem I_0 na ose šíření svazku. Místo, kde optická intenzita poklesne na hodnotu I_0/e^2 je kraj svazku. Vzdálenost kraje svazku od jeho osy se nazývá pološířka svazku, která se značí w . Nejužšímu místu Gaussova svazku se říká krček svazku, kde se pološířka svazku označuje w_0 . Počátek souřadnicové soustavy je $0xyz$. V počátku této soustavy je průsečík osy šíření, (osa z), s rovinou krčku. Krček svazku leží v rovině $x0y$. Pološířka svazku ve směru osy $0z$ se pomalu zvětšuje. Závislost pološířky svazku lze vyjádřit vztahem [6]

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.4)$$

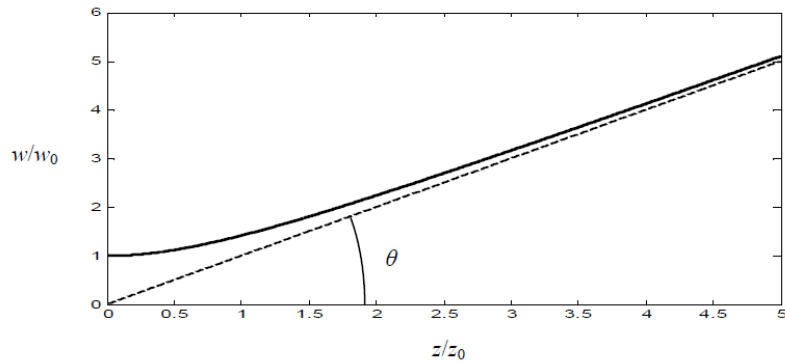
kde z_0 je Rayleighova vzdálenost, které odpovídá vztahu

$$z_0 = \frac{k \cdot w_0^2}{2}. \quad (2.5)$$

Rayleighova vzdálenost je taková vzdálenost, od které se vlna nešíří ve směrech odpovídajících rovnoběžným paprskům, ale ve směrech, které odpovídají paprskům rozbíhavým. [24]. Pološířka svazku je zde označena písmenem w_0^2 . Ve vzdálenosti z_0 od počátku platí

$$w(z_0) = w_0 \cdot \sqrt{2} \quad (2.6)$$

Na obr. 2.8 je znázorněna závislost normované pološířky svazku w/w_0 na bezrozměrné souřadnici z/z_0 . Tento graf vytváří hyperbolu.



Obr. 2.8: Závislost normované pološířky svazku na bezrozměrné souřadnici (převzato z [6])

Úhel θ , který je vidět na obr. 2.8 se nazývá úhel divergence a platí pro něj vztah

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z_0} = \frac{2}{k \cdot w_0} . \quad (2.7)$$

V závislosti na souřadnici z , dochází k jistému fázovému posunu vlny, neboli Guoyůvemu efektu. Pro fázový posuv vlny $\varphi(z)$ platí

$$\varphi(z) = \operatorname{arctg} \frac{z}{z_0} . \quad (2.8)$$

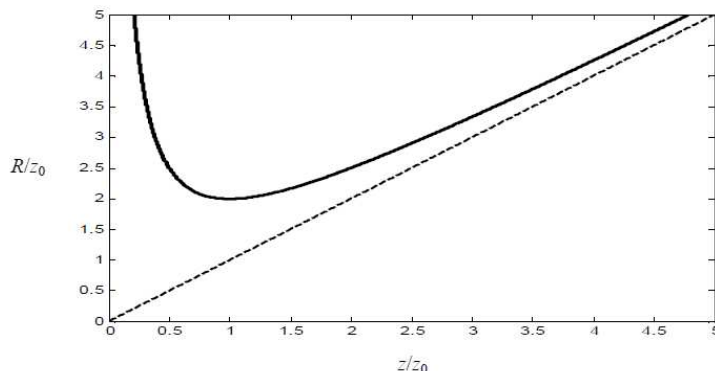
Pro fázi Gaussova svazku je dán vztah

$$\Phi(x, y, z) = kz - z(\varphi) - k \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} . \quad (2.9)$$

V rovnici první člen kz představuje fázi rovinné vlny. Fázový posuv svazku je označen symbolem $\varphi(z)$ a poslední člen vyjadřuje zakřivení vlnoplochy. Matematickými úpravami lze psát poloměr křivosti vlnoplochy zápisem

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right] . \quad (2.10)$$

Na obr. 2.9 je zobrazena grafická závislost poloměru křivosti Gaussova svazku na bezrozměrné souřadnici z/z_0 .



Obr. 2.9: Závislost normovaného poloměru křivosti Gaussova svazku na bezrozměrné souřadnici z/z_0 (převzato z [6])

Z řešení vlnové rovnice Gaussova svazku lze odvodit vztah optické intenzity

$$I(x, y, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \cdot e^{-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}}, \quad (2.11)$$

kde I_0 je optická intenzita na ose šíření v počátku. Celkový optický výkon přenášený optickou vlnou s Gaussovým rozložením lze po integraci psát

$$P = \frac{1}{2} \cdot I_0 \cdot \pi \cdot w_0^2. \quad (2.12)$$

Výkon svazku P_w , přenášený vnitřkem kružnice lze určit vztahem

$$P_w = \int_0^{p=w} I(\rho, z) \cdot 2\pi\rho \, d\rho \approx 0,86P, \quad (2.13)$$

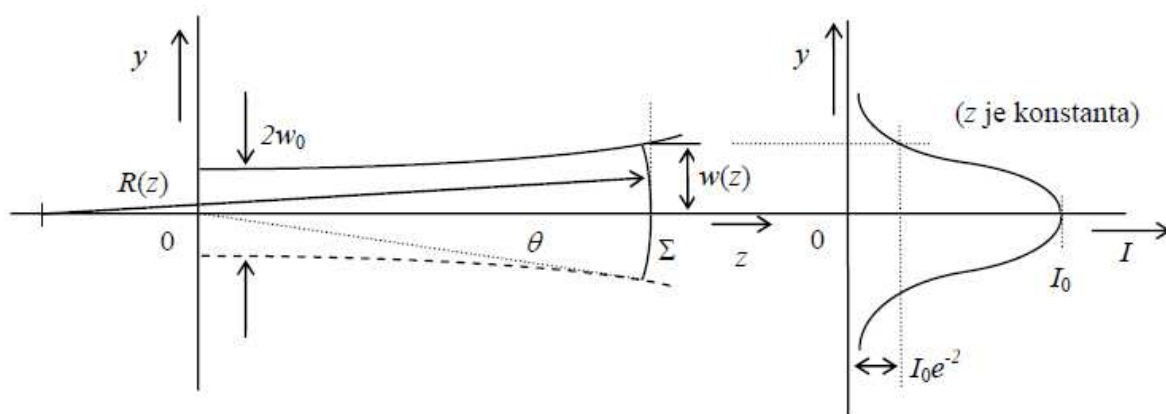
kde w je poloměr kružnice a ρ je radiální vzdálenost, která se vypočítá vztahem

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (2.14)$$

Ze vztahu (2.7) lze říci, že svazkem omezeným svým krajem se přenáší přibližně 86 % celkového optického výkonu. Způsob, jak efektivně popsat transformaci Gaussův svazek optickými soustavami je použití maticové optiky (zákon $ABCD$) takto

$$\dot{q}(z_2) = \frac{A\dot{q}_1(z_1) + B}{C\dot{q}_1(z_1) + D}, \quad (2.15)$$

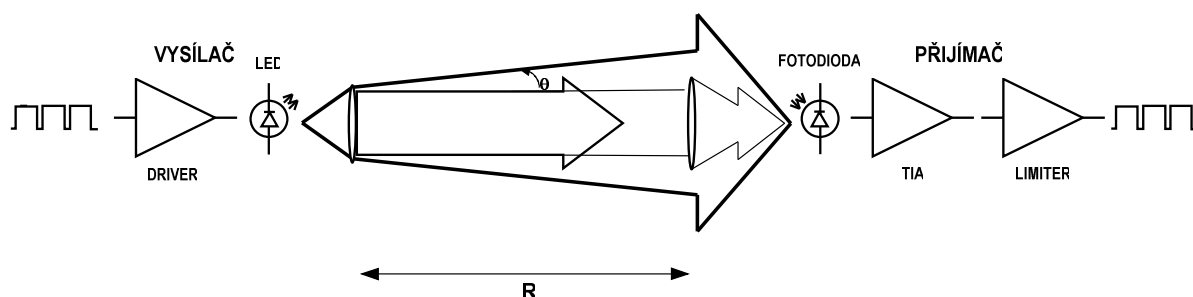
kde $\dot{q}(z_1)$ je komplexní parametr svazku, který dopadá se optickou soustavu a $\dot{q}(z_2)$ je komplexní parametr svazku vystupujícího z optické soustavy. Prvky A, B, C, D jsou prvky matice typu 2×2 . Na obr. 2.10 je zobrazen Gaussův svazek s profilem svazku a rozložením optické intenzity včetně základních charakteristik parametrů. [6]



Obr. 2.10: Charakteristiky a parametry kruhově symetrického Gausova svazku (převzato [6])

3 PARAMETRY A TOPOLOGIE FSO

Parametry FSO se rozlišují na vnitřní a vnější. Na obr. 3.1 je znázorněno zjednodušené schéma optického přenosu informace. Uvedené schéma je tvořeno dvěma bloky. První blokem je vysílač (Transmitter), který se skládá z Driveru a LED diody, která emituje světelný paprsek v podobě 1 na 0 na přijímač (Receiver). Ten může být složen z fotodiody, transimpedanční zesilovače (TIA) a limitující zesilovače (Limiter). Fotodioda přijímaný optický signál detekuje a přemění na elektrický, který dále postupuje do dalších zmíněných obvodů. Vzdálenost mezi vysílací a přijímací stranou je obr. 3.1 označena písmenem R.



Obr. 3.1: Zjednodušené schéma optického přenosu informace

3.1 Vnitřní parametry

Za vnitřní parametry se považují:

a) Na straně vysílače:

- Vyzařovaný optický výkon
- Přenosová rychlost
- Záření: koherentní, nekoherentní
- Vlnová délka
- Divergence paprsku: úhel kužele paprsku emitovaného z vysílače. Úhel přímo ovlivňuje, jak rychle se bude svazek světla rozšiřovat s rostoucí vzdáleností.

b) Na straně přijímače:

- Citlivost – minimální optický výkon, který je přijímač schopen přijmout
- Chybovost (bit error rate; BER)
- Průměr přijímací čočky

3.2 Vnější parametry

Za vnější parametry bezkabelového optického spoje se považují takové, které nelze kromě vzdálenosti systémů přímo ovlivnit. Je to přímá viditelnost, atmosférický útlum a ztráty.

3.3 Topologie optických bezkabelových spojů

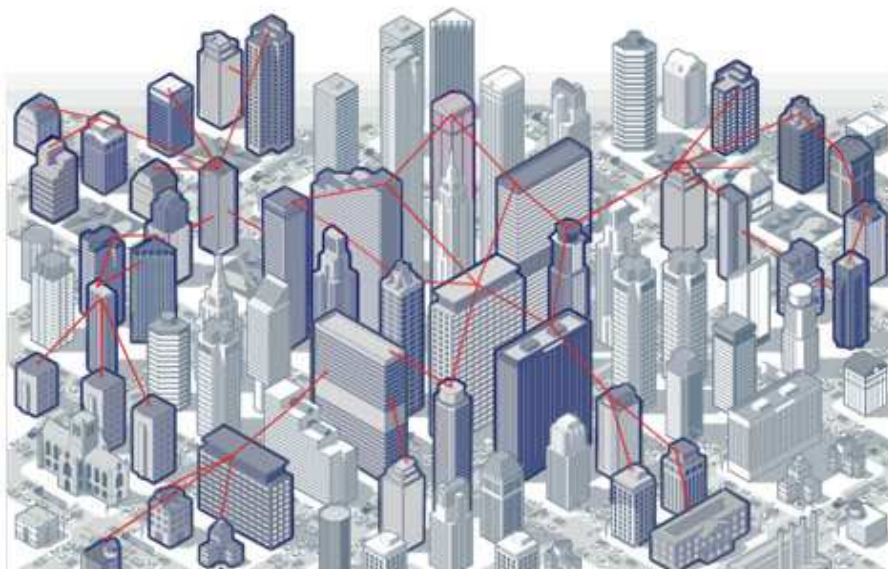
Optické bezkabelové spoje a jejich topologie se nejvíce využívají ve velkých městech, kde jsou vysoké stavby postaveny relativně blízko sebe a šíření optického signálu na tyto vzdálenosti je výhodné, oproti optickým či metalickým kabelům. V dnešní době se FSO systémy dělí do čtyř topologií, které jsou:

- Mesh (z různých bodů do různých bodů)
- Point to point (z jednoho bodu do jednoho bodu)
- Point-to-Multipoint (z jednoho bodu do mnoha bodů)
- Ring with Spurs (kruhová síť)

3.3.1 Mesh topologie

Není reálné, aby systémy komunikovaly na příliš velké vzdálenosti (jednotky km). Ideální stav nastane při komunikaci FSO, když se hlavice neumístují příliš daleko. Optimálně 300-500 m. Když se hlavice umístí do speciální struktury, která se nazývá polygonální nebo-li. Mesh topologie, tak jsou svou konstrukcí cenově dostupné, jelikož se neřeší problém velkého dosahu. Tato topologie je naznačena na obr. 3.2, která se skládá z více propojených uzlů s určitou redundancí.

Míru redundance určuje počet nadbytečných spojů k dalšímu uzlu. Čím větší redundance se v síti vyskytuje, tím je systém robustnější / kvalitnější. Výhodou Mesh sítě je vysoká spolehlivost a připojení dalších uzlů. Mezi nevýhody patří např. omezenost jednotlivých uzlů jen na určitou vzdálenost. [7]



Obr. 3.2: Topologie Mesh (převzato z [25])

3.3.2 Point to point topologie

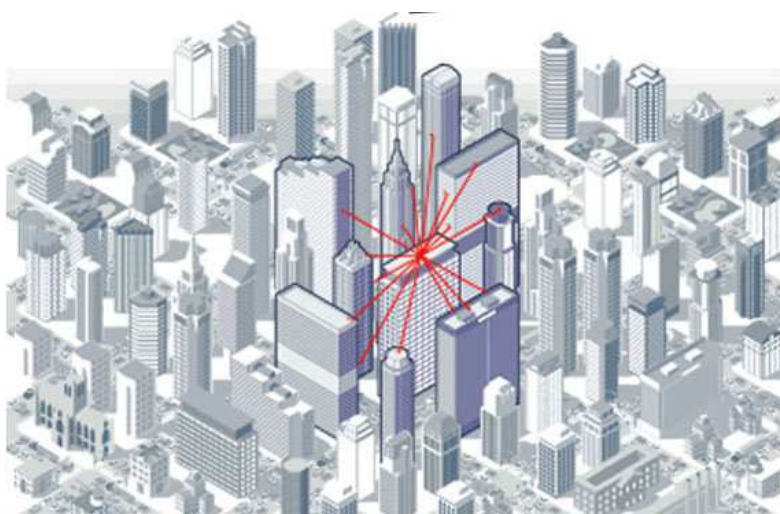
Topologie Point to point (PTP, obr. 3.3) je jednoduché spojení dvou bodů. Pokud je třeba rozšířit spojení na vzdálenější bod, který nelze zajistit PTP spojem, využívá se spojení do multi Point to point.



Obr. 3.3: Topologie Point to point (převzato z [25])

3.3.3 Point to Multipoint

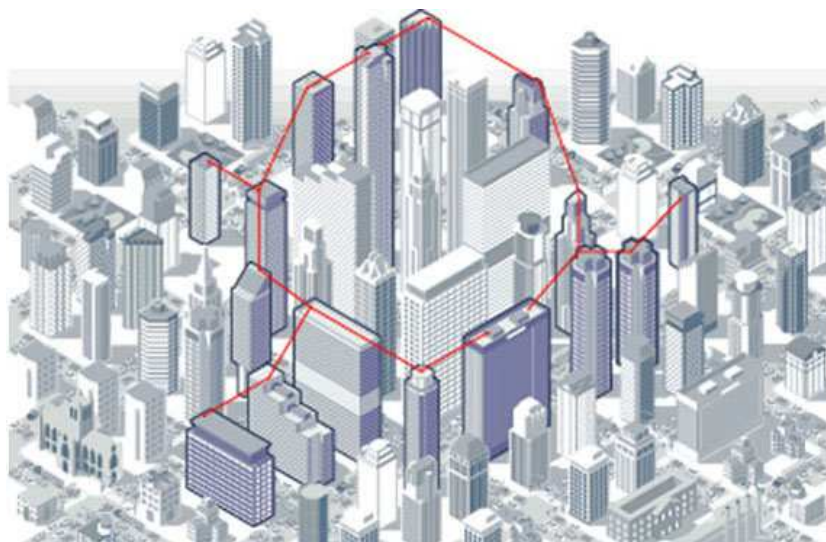
Tyto sítě jsou založeny na struktuře, ve které je jeden centrální bod, ke kterému jsou jednotlivé uživatelské stanice připojeny. V centrálním bodě musejí být nainstalovány jak vysílací, tak přijímací systémy. Mezi nevýhody lze zmínit např. prostorová náročnost. V praxi se tento typ topologie vyskytuje jen zřídka a je naznačen na obr. 3.4



Obr. 3.4: Topologie Point to Multipoint (převzato z [25])

3.3.4 Ring with Spurs

V této topologii, která se v překladu nazývá kruhová, je každý uzel připojen ke dvěma sousedním a dohromady tvoří kruh. Standardně existuje pouze jedna cesta mezi dvěma uzly. Rozšířením je, že komunikace probíhá ve směru i proti směru hodinových ručiček. Tato topologie je naznačena na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Topologie kruhová (převzato z [25])

4 ATMOSFÉRICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ A JEHO VLASTNOSTI

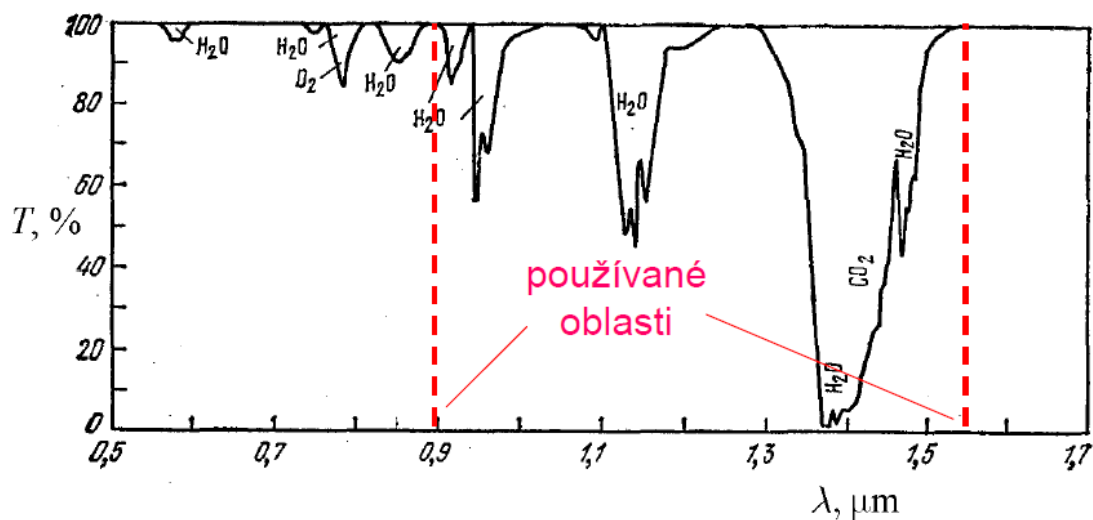
Atmosférické přenosové prostředí dále jen APP je médium, ve kterém se šíří světelné paprsky z různých zdrojů světelných záření. Prostředí výrazně ovlivňuje kvalitu přenosu. APP prostředí je obecně nestacionární a nehomogenní. Index lomu atmosféry se mění s polohou a časem.

V tomto prostředí se vyskytují mlhy, tvoří se mračka, z kterých vzniká déšť, sníh, bouřky, větry a turbulence. Teplota a tlak ovzduší se různě mění v prostoru i čase díky výškovému teplotnímu gradientu, který je charakterizován změnou (poklesem) teploty vzduchu (se vzrůstající nadmořskou výškou, klesá teplota o 0,5 °C na 100 m). V APP optické svazky podléhají energetickým i tvarovým změnám. Pokud nastanou změny, ať už rozšíření nebo odklon svazku, může dojít ke změně úrovně přijímaného výkonu o frekvenci řádově stovky Hz. [26]

Základní veličiny pro modelování vlivu APP na kvalitu přenosu FSO jsou:

- Koeficient útlumu $\alpha_{1,atm}$, resp. koeficient extinkce α_e
- Index lomu prostředí n
- Strukturální parametr indexu lomu C_n^2 .

Na obr. 4.1 je uvedena spektrální závislost propustnosti „čisté“ a „klidné“ atmosféry, z které je patrné, že na některých vlnových délkách a to zejména na 850 nm a 1550 nm se propustnost blíží 100 %. Tato dvě spektrální okna, jak už je z předchozích kapitol známo, se používají pro komunikaci v optických bezkabelových spojích. V ostatních oblastech jsou elektromagnetická vlnění nepropustná, až na některé výjimky (625nm).

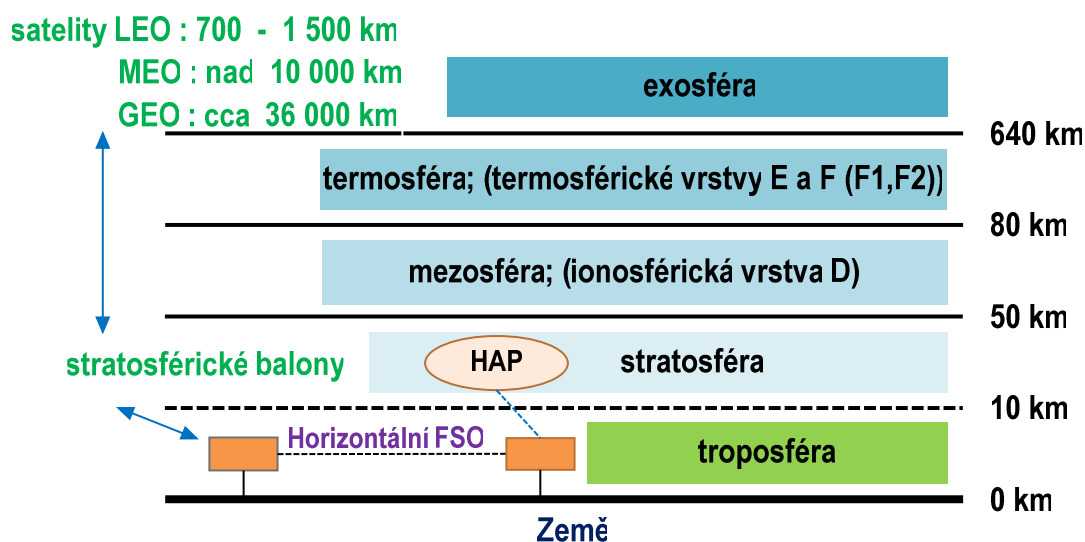


Obr. 4.1: Propustnost „čisté“ atmosféry na úrovni mořské hladiny při délce trasy 1 km a šířce spektrální čáry 1,5 nm (převzato z [10])

4.1 Složení atmosféry

Zemská atmosféra se skládá z několika charakteristických vrstev. Na obr. 4.2 je přehledně znázorněno složení zemské atmosféry. Vzdálenosti jednotlivých vrstev od Země jsou pouze přibližné. Například v polárních oblastech troposféra sahá až do vzdálenosti 17 km.

Jelikož se FSO vyskytuje ve vrstvě troposféry, není chybou, když se tomuto spoji nazývá troposférický optický spoj.



Obr. 4.2: Atmosférické vrstvy se znázorněním zemského povrchu a umístěním horizontálního FSO s HAP

Hlavními jevy, které ovlivňují šíření svazku, jsou:

- Extinkce optické intenzity vlivem absorpce, rozptylu na molekulách nebo aerosolech
- Extinkce optické intenzity vlivem turbulence troposféry
- Fluktuace optické intenzity vlivem turbulence troposféry, deště nebo sněhu
- Fluktuace optické intenzity vlivem deformace tvaru optického svazku
- Krátkodobé přerušování svazku (výskyt ptáků nebo hmyzu v ovzduší)

Extinkce je vymizení nebo podstatné zeslabení záření (například elektromagnetického) absorpcí při průchodu prostředím. [27]

Fluktuace je nepravidelné kolísání hodnoty nějaké veličiny kolem rovnovážné polohy. Oba jevy působí společně a vzájemně se ovlivňují. [27] Fluktuace optické intenzity vyvolávají současně extinkci intenzity. Střední koeficient extinkce lze vyjádřit jako součet

$$\alpha = \alpha_{abs} + \alpha_{r,m} + \alpha_{r,\check{c}} + \alpha_{fluk}, \quad (4.1)$$

kde α_{abs} je člen vyjadřující absorpci na molekulách, $\alpha_{r,m}$ je člen vyjadřující rozptyl na molekulách (Rayleighův rozptyl), $\alpha_{r,\check{c}}$ odpovídá rozptylu na částicích (Mieův rozptyl) a α_{fluk} střednímu zeslabení intenzity vlivem fluktuací.

Kromě Rayleighova a Mieova rozptylu se ještě vyskytuje neselektivní (geometrický) rozptyl. Typ rozptylu lze určit díky znalosti velikosti jednotlivých částic v atmosféře. Pokud je zapotřebí určit o jaký druh rozptylu se jedná, slouží k tomu parametr dimenze α_r , který je dán vztahem

$$\alpha_r = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (4.2)$$

kde r je poloměr částice a λ je vlnové délka optického záření.

Základními složkami zemské atmosféry jsou molekuly H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 a O_3 . Právě na těchto molekulách dochází k výrazné absorpci. Existují však atmosférická okna, ve kterých je absorpce α_{abs} na zmíněných molekulách zanedbatelná. Jedná se například o atmosférická okna v okolí vlnových délek 850 nm a 1550 nm. [20]

V Tab. 4.1 je uveden přehled hodnocení stavu APP podle hodnot koeficientu extinkce α a meteorologické viditelnosti V_M . Meteorologická viditelnost je definovaná jako vzdálenost, při níž propustnost nabývá hodnoty $T = 2\%$ (při $\lambda = 555$ nm). Parametr, který popisuje útlum optické intenzity v APP, se nazývá koeficient útlumu a platí pro něj vztah

$$\alpha_{1,APP} = \frac{-1}{L_{APP}} 10 \log \frac{I_2}{I_1}, \quad (4.3)$$

kde L_{APP} je délka trasy svazku a I_1 a I_2 jsou optické intenzity na začátku a konci vrstvy. Mezi koeficienty extinkce a útlumu existuje následující vztah

$$\alpha_e = 0,23 \cdot \alpha_{1,APP}. \quad (4.4)$$

Tab. 4.1: Tabulka stavů atmosféry pro hodnoty V_M a α (převzato z[10])

Stav atmosféry	V_M [km]	$\alpha_{1,APP}$ [dB.km ⁻¹]
Čistá	10 – 23	1,0 – 0,5
Opar	2,0 – 4,0	7,0 – 3,0
Slabá mlha nebo silný déšť	1,0 – 2,0	14,0 – 7,0
Střední mlha	0,2 – 0,5	85 – 34
Silná mlha	<0,5	>340

4.1.1 Atmosférické turbulence

Turbulence je častý jev, který vzniká v atmosféře díky neuspořádanému proudění vzduchu, což bývá způsobeno především teplotními vlivy. Kromě teplotních rozdílů se na vznik atmosférických turbulencí podílí také sluneční záření, které vyvolává náhodné změny indexu lomu prostředí.

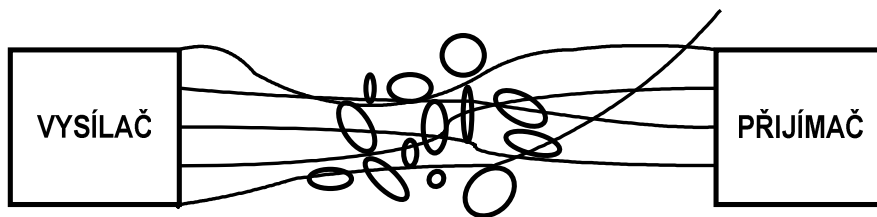
Proudění vzduchu se rozděluje na dva druhy:

- Proudění je laminární
- Proudění turbulentní

U laminárního proudění jsou dráhy jednotlivých částic navzájem rovnoběžné a částice nepřechází mezi jednotlivými vrstvami, vzájemně se nepromíchávají.[20] U turbulentního proudění se trajektorie jednotlivých částic navzájem promíchávají a částice přecházejí mezi jednotlivými vrstvami. Rychlosti jednotlivých částic se nepravidelně mění, tzn. částice již nemají ve všech místech neměnnou rychlost, proudění je nestacionární.

Atmosférické turbulence lze rozdělit na tři druhy (dynamická, termická a mechanická), které se liší podle příčin vzniku. Detailně se zde popisovat nebudou.

Na optický svazek mohou působit turbulentní cely, a to buď v jedné části optické trasy, v celé délce optické trasy anebo v několika úsecích optické trasy. Na obr. 4.3 je ukázka turbulentní cely v jednom úseku optické trasy.

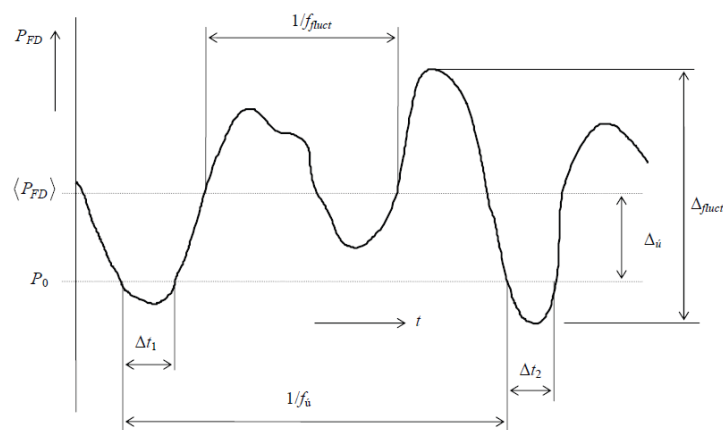


Obr. 4.3: Turbulentní cely v jednom úseku optického svazku

Turbulence mohou způsobit tyto jevy:

- Rozšiřování a potulování svazku
- Fluktuaci úhlu dopadu
- Zhoršení odstupů signál šum. V souvislosti s tímto problémem se zavádí scintilační index.

Tyto změny způsobují pokles přijímaného výkonu až pod stanovenou úroveň citlivosti přijímače, a dochází k úniku tzn. kolísání úrovně signálu. Parametry úniku jsou uvedeny na obr. 4.4 [9].



Obr. 4.4: Parametry úniků (převzato z [9])

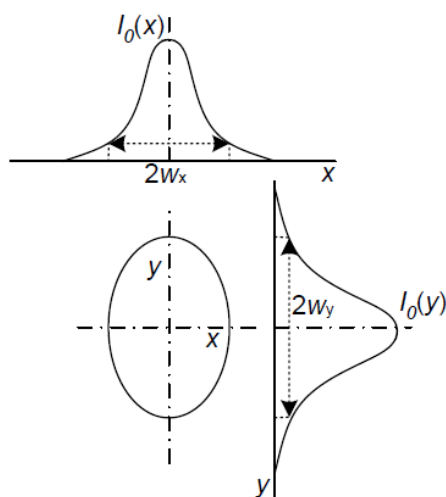
P_{FD} – optický výkon na fotodiodě přijímače, P_0 – citlivost přijímače, f_{fluct} – frekvence fluktuací, f_0 – frekvence úniků, Δ_{fluct} – dynamika fluktuací, Δ_i hloubka úniků, t – čas, Δt_i – časové intervaly, kdy úroveň optického výkonu na fotodiodě byla menší než požadovaná.

Parametr, který určuje úroveň atmosférických turbulencí, se obvykle označuje C_n^2 . Je to strukturní parametr indexu lomu, který se používá k měření síly vlnění a určuje se pomocí relativní variace optické intenzity.

FSO systémy (s LED nebo LD), co vyzařují optický svazek s Gaussovským rozložením, platí pro ně obecně následující vztah: (vztah mezi optickým výkonem P a intenzitou $I(x, y)$ [20])

$$P = \int_S I(x, y) dS = \int_S I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w_x}\right)^2} e^{-2\left(\frac{y}{w_y}\right)^2} dS, \quad (4.5)$$

kde x, y jsou souřadnice na příslušných osách, pološířky svazku se označují w_x a w_y . dS je element plochy a I_0 je hustota optické intenzity v počátku souřadnicových os. Eliptický Gaussův svazek s jeho profily je uveden na obr. 4.5

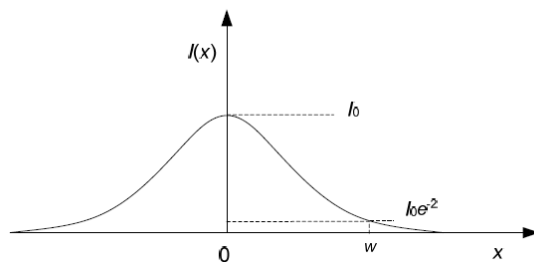


Obr. 4.5: Profil Gaussova svazku, eliptická stopa optického svazku a její intenzitní profil pro $I_0(x)=I_0(y)$ (převzato z [20])

Pokud je stopa Gaussovského svazku kruhová, lze zjednodušeně psát vztah mezi celkovým optickým výkonem P a maximální optickou intenzitou ve středu svazku I_0 [20]

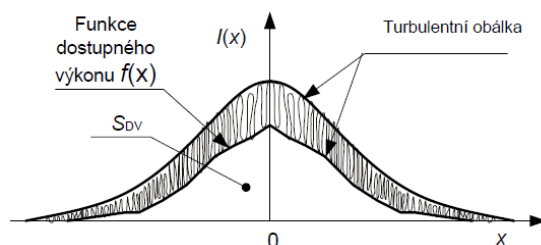
$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w}\right)^2} dS = 0,5 \cdot I_0 \pi \cdot w^2, \quad (4.6)$$

kde x je radiální vzdálenost od středu svazku a w je pološířka kruhového optického svazku. Na obr. 4.6 je zobrazen ideální Gaussův svazek (kruhově symetrický). Tento svazek odpovídá optickému svazku, který není ovlivněn atmosférickými turbulencemi.



Obr. 4.6: Ideální kruhově symetrický Gaussův svazek (převzato z [20])

V případě, že je optický svazek ovlivněn atmosférickými turbulencemi, dochází k fluktuaci úrovně optické intenzity. Fluktuace optické intenzity signálu způsobená atmosférickými turbulencemi vytváří určitou turbulentní obálku (viz Obr. 4.7), která je omezena turbulentními hraničními křivkami zespoda i shora. Spodní hranici turbulentní obálky (spodní turbulentní hraniční křivka) lze matematicky vyjádřit jako funkci dostupného výkonu $f(x)$.



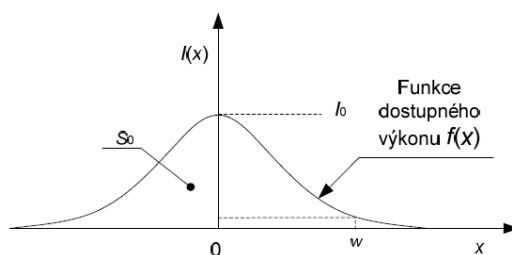
Obr. 4.7: Rozložení optické intenzity svazku v případě turbulentní atmosféry (převzato z [20])

Plocha dostupného výkonu je dána vztahem

$$S_{DV} = \int_x f(x) dx. \quad (4.7)$$

Pokud optický svazek není ovlivněn atmosférickými turbulencemi, plochu dostupného výkonu S_0 (obr. 4.8) lze vyjádřit jako

$$S_0 = \int_x I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w}\right)^2} dx. \quad (4.8)$$



Obr. 4.8: Plocha dostupného výkonu u svazku, který není ovlivněn atmosférickými turbulencemi (převzato z [20])

4.2 Stacionární a statistický model

Stacionární model optického bezkabelového spoje je modelem zabývající se energetickou bilancí, přenosovou rychlostí, chybovostí a dosahem spoje. Tyto parametry jsou jednotlivě popsány níže. Stacionární model je také tvořen výkonovou bilanční rovnicí, která model popisuje a výkonovým úrovnovým diagramem.

Statistický model optického bezkabelového spoje řeší problémy, které se týkají spolehlivosti spoje a pravděpodobnosti úplného přerušení svazku. Sleduje se jak krátkodobé, tak dlouhodobé přerušení. Krátkodobé přerušení bývá většinou způsobené např. průletem ptáka (ptáků) a dlouhodobé např. mlhou.

4.2.1 Energetická bilance FSO spoje

Pro každý optický bezkabelový spoj je důležitý výpočet energetické bilance. Energetická bilance FSO přenášející informace ve volném prostoru je ukázána na obr. 4.9 a skládá se z následujících prvků, které lze rozdělit do skupin např. takto:

VÝKONY:

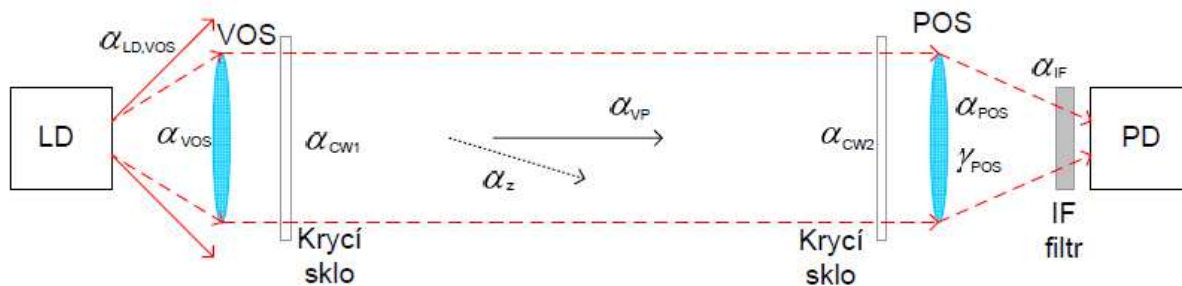
- Výkon laserové diody P_{LD}
- Citlivost přijímacího systému P_0
- Minimální detekovatelný výkon fotodiody P_{min}
- Úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{max}

ÚTLUMY:

- Útlum na krycím skle vysílače a přijímače α_{CW1} a α_{CW2}
- Útlum vysílací a přijímací optické soustavy α_{VOS} a α_{POS}
- Útlum způsobený nepřesným zaměřením vysílacího a přijímacího bloku na sebe α_Z
- Útlum na interferenčním filtru α_{IF}

Další parametry pro stanovení výkonového diagramu se musejí vypočítat, a jsou to:

- Zesílení přijímací optické soustavy γ_{POS}
- Útlum šířením α_{VP}
- Účinnost vazby „laserová dioda-vysílací optická soustava“ $\alpha_{LD, VOS}$
- Účinnost vazby „přijímací optická soustava-fotodiody“ $\alpha_{PD, VOS}$
- Rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí ρ_{atm}
- Minimální hodnotu poměru signálu k šumu SNR_0 ,



Obr. 4.9: Model přenosu informace FSO (převzato z [20])

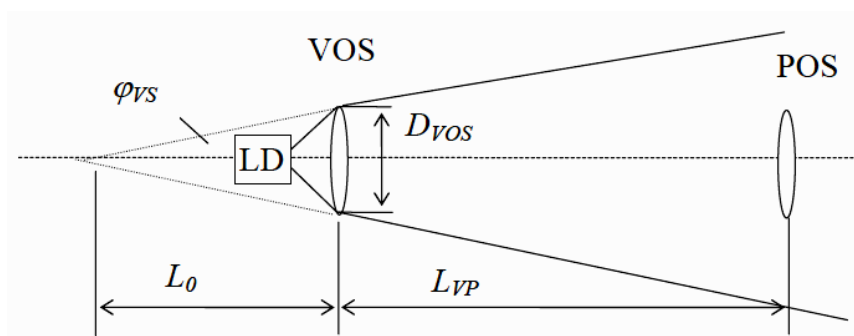
V praxi se předpokládá, že útlum vazby $\alpha_{LD,VOS}$ je přibližně 1,5 dB. Útlum šířením lze určit vztahem [10]

$$\alpha_{VP} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{VP}} \right|, \quad (4.9)$$

kde L_{VP} je vzdálenost optického spoje a L_0 je pomocná délka (viz obr. 4.10), která se vypočítá pomocí vztahu

$$L_0 = \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}}, \quad (4.10)$$

kde D_{VOS} je průměr vysílací optické soustavy a φ_{VS} úhlová šířka vysílaného svazku.



Obr. 4.10: Znázornění významu veličiny L_0 (pomocné délky) (převzato z [5])

Zesílení přijímací optické soustavy se určí poměrem vysílací a přijímací apertury, rozložením intenzity v Gaussovu svazku a umístěním středu přijímací apertury v ose Gaussova svazku. Pro toto tvrzení lze psát vztah [10]

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3dB, \quad (4.11)$$

kde D_{POS} je průměr přijímací optické soustavy.

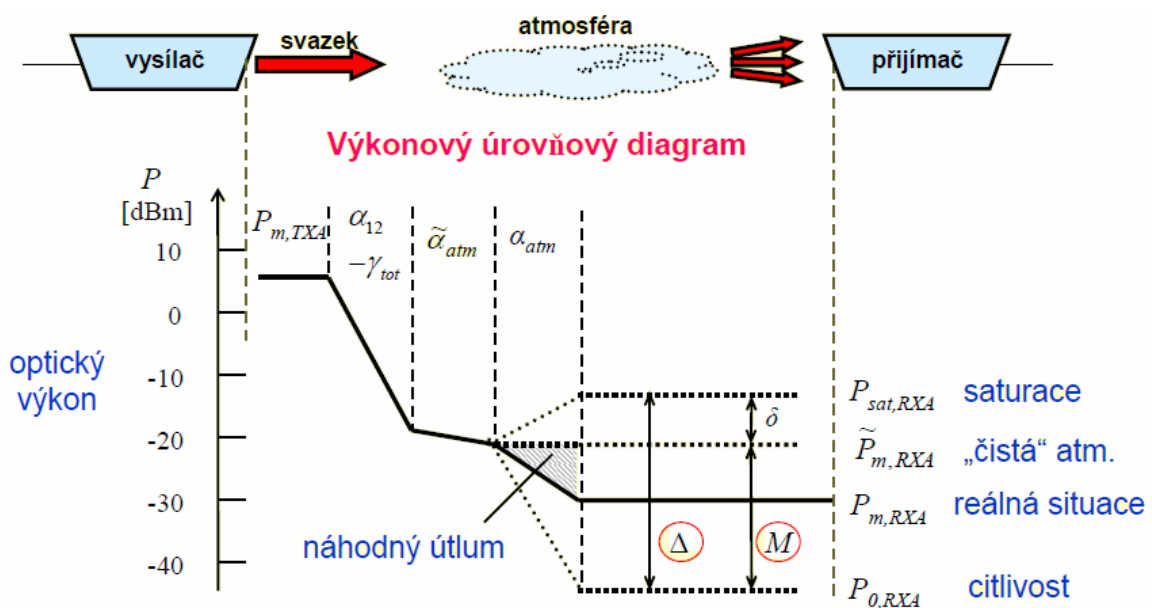
Z dlouhodobého měření útlumu APP lze stanovit rezervu spoje ρ_{atm} . Intenzitní modulace typu OOK, která je využívána v optických bezkabelových spojích má při chybovosti BER = 10^{-6} hodnotu $SNR_0 = 13,5$ dB. Podle typu modulace a požadované chybovosti BER, se stanovuje minimální hodnota SNR_0 . Minimální detekovatelný výkon přijímače P_{min} závisí na typu použité fotodiody, šumových parametrech předzesilovače a také na přenosové rychlosti. Citlivost přijímače je minimální úroveň přijatého optického výkonu P_0 , která je nutná k dosažení stanovené hodnoty SNR_0 a vyjádří se vztahem $P_0 = P_{min} + SNR_0$ [5]

Dalším parametrem přijímače je úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{max} . Oblast dynamiky přijímacího systému Δ_P je pak definovaná výrazem [5]

$$\Delta_P = P_{max} - P_0. \quad (4.12)$$

4.2.2 Výkonový úrovněový diagram a bilanční rovnice

Důležitým modelem FSO bez atmosféry je výkonový úrovněový diagram a výkonová bilanční rovnice. Rovnice vychází právě z výkonového úrovněového diagramu, který je zobrazen na Obr. 4.11 V diagramu jsou vyznačeny ty nejdůležitější body (výkony, útlupy a zisky) optické trasy.



Obr. 4.11: Výkonový úrovněový diagram (převzato z [10])

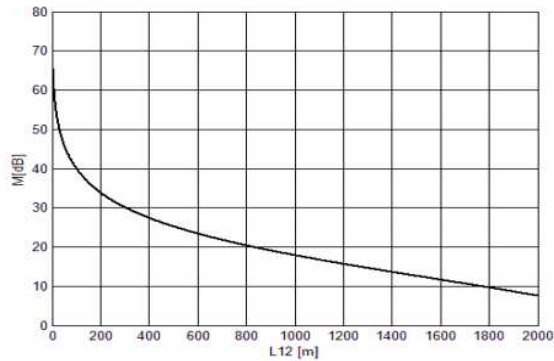
Rovnici lze matematickým způsobem podle Obr. 4.11 zapsat [10]

$$P_{m,RXA} = P_{m,TXA} - \alpha_{12} + \gamma_{tot} - \tilde{\alpha}_{atm} - \alpha_{atm}, \quad (4.13)$$

kde $P_{m,RXA}$ je střední výkon přijatý vstupní aperturou přijímače, $P_{m,TXA}$ je střední výkon vyzářený výstupní aperturou vysílače, α_{atm} je útlum náhodnými atmosférickými jevy, α_{12} je útlum šíření volným prostorem a γ_{tot} je celkový zisk. Útlum α_{atm} se ještě dělí na útlum atmosférickými částicemi α_{part} a na útlum způsobený větrnou turbulencí α_{turb} . Vlnovka nad písmenem α naznačuje, že atmosféra zde není uvažována. Přesněji říká, že se jedná o co nejmenší útlum té nejideálnější atmosféry, která existuje. Není to útlum, co vyvolá mlha, déšť, sníh apod.

4.2.3 Výkonová rezerva spoje

Nejdůležitější veličinou při modelování FSO s vyloučením vlivu atmosféry je rezerva spoje. Čím je vzdálenost hlavic menší, tím je rezerva spoje větší a může se počítat i s větší mlhou a spoj bude nadále fungovat. Jedná se o stacionární model samotného spoje a jeho rezerva v závislosti na vzdálenosti je zobrazena na obr. 4.12.



Obr. 4.12: Charakteristika rezervy spoje M na vzdálenosti L_{12} (převzato z [10])

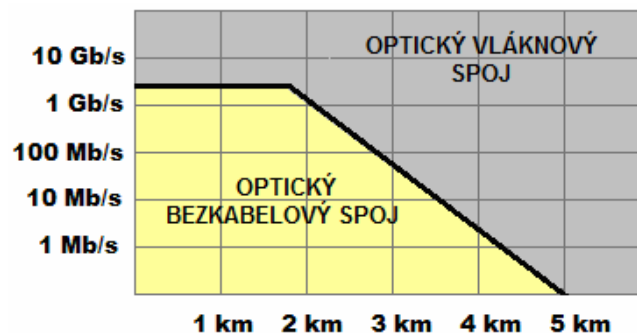
Využití rezervy [10]:

- Zvýšení dosahu
- Zvýšení odolnosti vůči rozmarům počasí

4.2.4 Přenosová rychlost

Mezi základní a důležité parametry každého komunikačního systému patří přenosová rychlost. U vysílačů, které používají laserové diody, bývá přenosová rychlost větší než je to u LED, a proto se využívají na delší vzdálenosti.

U optických vláknových spojů není přenosová rychlost na velké vzdálenosti problém. Pro ukázkou je na obr. 4.13 znázorněno porovnání optického vláknového a bezkabelového spoje a jejich vztah mezi přenosovou rychlostí a dosahem. Z obrázku je patrné, že se zvyšující vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem klesá maximální přenosová rychlost.



Obr. 4.13: Graf znázorňující vztah mezi přenosovou rychlostí a dosahem spoje pro optické bezkabelové a optické vláknové spoje (převzato [20])

4.2.5 Dosah spoje

Optické bezkabelové spoje mají odlišné vlastnosti, jelikož pracují jak v horizontálním a vertikálním směru, o kterých už bylo pojednáno. Maximální dosah je u obou směrů různý. FSO pracující v horizontálním směru mají maximální dosah mezi VS a PS do jednotek km, pro delší vzdálenosti nejsou zatím využívány. Naopak spoje vertikální jsou využívány hlavně pro velké vzdálenosti a to nad 10 km.

4.2.6 Chybovost spoje BER

Chybovost spoje BER je poměrem chybně přenesených bitů ku celkovému počtu přenesených bitů za určitý časový interval. 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.

$$BER = \frac{b_{ch}}{b_c \cdot t}, \quad (4.14)$$

kde:

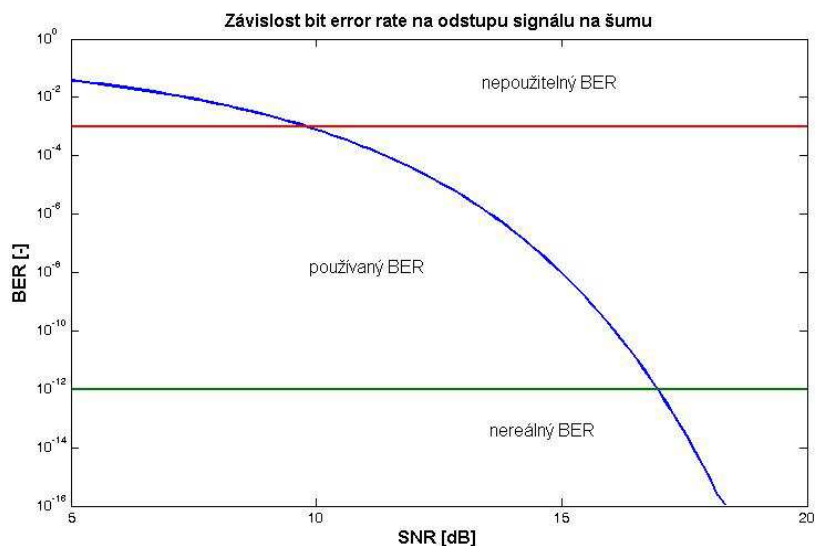
b_c	Celkový počet přenesených bitů
b_{ch}	Celkový počet chybně přenesených bitů
t	Určitý časový interval

Pro výpočty energetické bilance optického bezkabelového spoje se používají hodnoty BER 10^{-6} a 10^{-9} , u kterých odpovídá odstup signálu od šumu 13,5 dB, resp. 15,6 dB. V ideálním případě je BER 10^{-12} , ale tato hodnota je prakticky nedosažitelná. S rostoucí chybovostí spolehlivost FSO systémů klesá. Na obr. 4.14 je uveden graf závislosti chybovosti (BER) na odstupu signálu od šumu (SNR). Tuto závislost získáme pomocí chybové funkce *erf* (error fiction). [20]

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{SNR}}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (4.15)$$

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx. \quad (4.16)$$

SNR je obvykle vyjádřena logaritmičticky v dB.



Obr. 4.14: Závislosti BER na SNR (převzato z [20])

Tab. 4.2: Hodnoty SNR a BER a vzájemný vztah mezi nimi

SNR [dB]	10,0	13,5	15,6	16,9
BER [-]	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

Pokud hodnota BER narůstá, dochází k větší chybovosti (šum, rušení na straně přijímače, rozptyl apod). Pro zaručení dostatečné hodnoty BER, se využívá některé z metod, a to např. snížit délku spoje, snížit přenosovou rychlost, zvýšit vysílací výkon aj.

5 ZDROJE SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ

Za zdroje světelného záření se v bezkabelových optických komunikacích považují lasery (laserové diody) a diody luminiscenční (LED). Tyto světelné zdroje jsou zabudovány do vysílacích systémů a převádějí elektrický signál na signál optický. Jelikož FSO pracují většinou v duplexním režimu, světelný zdroj musí být umístěn jak na vysílací, tak i na přijímací straně. Podle přenosové rychlosti a vzdálenosti optického bezkabelového spoje by měl být zvolen světelný zdroj, který musí mít takový výkon, aby dosvítil na potřebnou vzdálenost. Také by měl být dobře modulovatelný, aby byla dosažena požadovaná přenosová rychlost. V dnešní době se používá i několik vysílačů současně, aby se dosáhlo zvýšení světelného výkonu.

U zdrojů světelného záření se rozlišují dva režimy (kontinuální a impulsní), ve kterých mohou pracovat. U kontinuálního (spojitého) laser vyzařuje nepřetržitě po dobu delší než 0,25 s. U impulsního režimu je energie je vyzařována ve formě impulsů ne delších 0,25 s a dochází k rychlému zapínání a vypínání zdroje a tím se dosáhne vyšších optických výkonů.

5.1 Luminiscenční dioda LED

LED (light emitting diode) je polovodičová dioda, která je zdrojem nekoherentního záření. Luminiscenční diody jsou založeny na principu rekombinace, tzn. rekombinuje-li elektron s dírou, odevzdává energii zhruba rovnou šířce zakázaného pásu. Injekcí majoritních nosičů do polovodiče opačné vodivosti, při přiložení napětí na PN přechod v propustném směru, se zvýší pravděpodobnost rekombinace a často k ní také dochází. Při rekombinaci každého páru elektron-díra se uvolní určité kvantum energie, které se může vyzářit mimo krystal nebo je absorbováno v mřížci. To se projeví zvýšenou teplotou krystalu. Záření se uvolňuje vlivem spontánní emise. Vhodnými materiály jsou polovodiče s tzv. přímým přechodem (nevzniká fonon) a větší šířkou zakázaného pásu. Používané kombinace materiálů jsou GaAsP GaP, GaAlAs (červená), InGaP, SiC (zelená a modrá). [15]

Diody LED se zapojují v propustném směru a to přes vhodný rezistor ke zdroji napětí. Musjí být zapojené správným způsobem, jinak nepropouští proud. Velikost proudu procházejícího diodou je zapotřebí k dosažení vhodné intenzity světla vyčíst z katalogu. Většinou se jedná o proudy desítek miliampérů. Využije-li se LED k indikaci střídavého napětí, je nutné dbát na to, že maximální povolené závěrné napětí těchto diod bývá malé (3 až 5 V), proto se doporučuje do série s LED zapojit usměrňovací diodu.

5.1.1 Aplikace

Diody LED se nejčastěji používají k indikaci (nahrazení nespolehlivých žárovek), v zobrazovacích informacích (sedmissegmentový či maticový zobrazovač), v optických vysílačích, ve směrových světlech automobilů aj. Perspektivní aplikací LED se světlem vhodných barev (model RGB; R – red, G – green, B – blue) mohou být ploché obrazovky. Dále se využívají hlavně tam, kde dochází k častému vypínání a zapínání zařízení, na rozdíl od žárovek, které tímto způsobem snadno shoří.

5.1.2 Vlastnosti LED

Světelné záření emitující LED je nekoherentní. Záření vystupující z diody má velkou divergenci. Na LED se proto umísťují čočky z epoxidové pryskyřice, které ji snižují a chrání diodu před mechanickým poškozením. Dále se vyznačují menší účinností přeměny elektrické energie na optickou z důvodů resorpce záření v součástce a vnitřních odrazech na rozhraních. Mezi základní vlastnosti diody patří:

- Vlnová délka vyzářeného světla
- Kapacita přechodu
- Svítivost
- Úhel vyzařování
- Maximální stejnosměrný proud a druh materiálu.

Výhody:

- vysoká účinnost (svítivost/výkon)
- Životnost
- Snadná manipulace (malé, snadné osazení do PCB)
- Malá doba odezvy (ms – ns)

Nevýhody:

- Správný napájecí proud
- Úzký vyzařovací paprsek ve srovnání s žárovkami, zářivkami aj.
- Supersvítivé LED (bílé, modré) mohou poškodit zrak

5.1.3 Typy LED

Diody LED se liší svým tvarem, světelnou intenzitou, vyzařovaným spektrem, aj. V optických bezkabelových spojích se používají zejména infračervené diody, z materiálu GaAs nebo GaAlAs, které jsou obecně vybírány pro jejich vyšší efektivitu a vhodnější vlnové délky záření, obzvláště pokud je na přijímací straně použita křemíková PIN dioda.

Mezi základní druhy LED patří:

- IR
- UV
- MONOCHROMATICKÉ
- RGB

5.2 Laserové diody

Laserové diody jsou zdroje koherentního optického záření, které mají velmi úzký vyzařovací svazek. Vycházející svazek ze zdroje se vyznačuje vysokou zářivostí a malou rozbíhavostí. Tyto polovodičové součástky jsou často užívané v optických komunikacích a jejich spektra jsou nejčastěji viditelné, ultrafialové a infračervené.

5.2.1 Funkce laserových diod

U všech typů laserů je základní funkcí proces stimulované emise. Stimulovaná emise u laseru slouží k zesilování světla. Na rozdíl od spontánní emise, je vypouštění fotonů ze základní hladiny uspořádané. U polovodičových laserů je tento proces specifický v tom, že v polovodičových krystalech jsou aktivní atomy hustě vedle sebe a zářivé přechody se neuskutečňují mezi diskrétními energetickými hladinami, ale mezi energetickými pásy. [15]

Elektrony obsazují nejnižší energetické hladiny ve vodivostním pásu až po Fermiho kvazihladinu pro elektrony E_{fn} . Stavů ve valenčním pásu jsou bez elektronů až po Fermiho kvazihladinu pro díry E_{fp} (plyne z principu zachování neutrality náboje). Při dopadu fotonů na polovodič s energií větší než E_g (šířka zakázaného pásu (eV)), ale menší než $E_{fn} - E_{fp}$ nemůže dojít k jejich absorpci, protože hladiny, na něž by se mohl uskutečnit přechod spojený s pohlcením fotonu, jsou již obsazeny. Dopadající fotony tedy mohou stimulovat přechody elektronů z vodivostního do valenčního pásu s následnou emisí fotonů nerozlišitelných od budících. Podmínka pro jejich stimulaci je [15]

$$E_g < h \cdot n_z < E_{fn} - E_{fp}, \quad (5.1)$$

kde h je Planckova konstanta a n_z frekvence optického záření.

5.3 LED vs laser v optických bezkabelových spojích

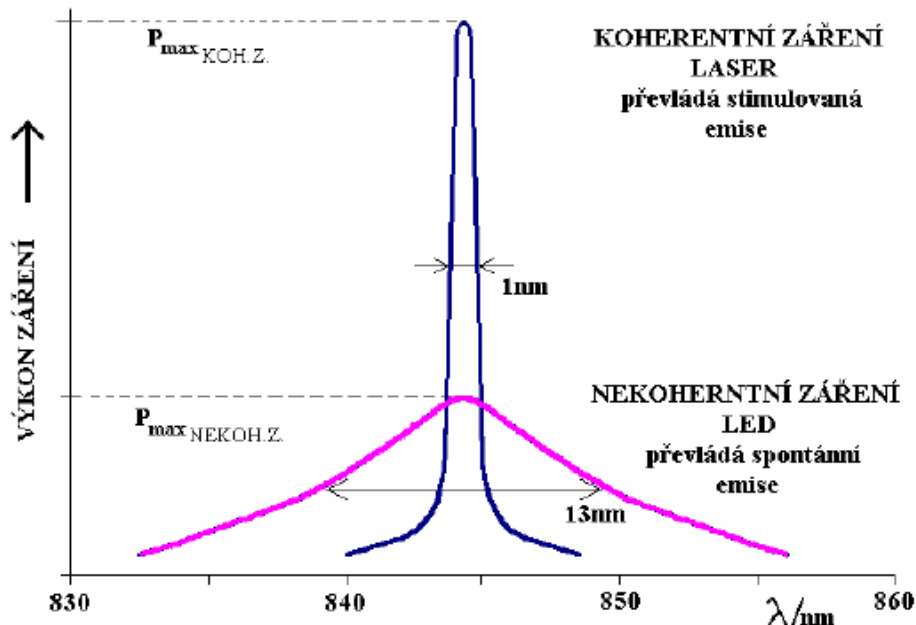
Optický bezkabelový spoj je navrhnout s laserovou nebo LED diodou. Na základě přenosové rychlosti, vzdálenosti optických hlavic a ceně se volí jedna z variant. Obě varianty mají své výhody i nevýhody, podle kterých se také rozhoduje, který zdroj použít. Dnes řada dostupných systémů využívá laserové diody, které vyzařují vysoký výkon koherentního světla z malé oblasti.

5.3.1 Laserové diody používané optických bezkabelových spojích

LD dokážou zpracovávat vyšší kmitočty modulačního signálu, díky kterému umožňují vysílat s větší přenosovou rychlostí. Jejich nejvýznamnějšími vlastnostmi jsou ty, že energii a výkon přenáší v úzkém vyzařovaném svazku, monochromaticnost, koherence a kolimovanost. S LD je možné kolimovat více energie do úzkého paprsku a následně ho lépe soustředit na přijímající fotodetektor, což výrazně zvyšuje použitelnost spoje na větší vzdálenost. Záření vystupující z laserové diody má malou divergenci (vysokou směrovost), zato z LED má světelný tok divergenci velkou. Diody LED vyzařují oproti laseru nekoherentní světlo a vyzářený svazek není ostře směrový jako u LD, což způsobuje kratší dosah spoje. Na druhou stranu je tímto systém stabilnější oproti rušivým vlivům v atmosféře nebo např. při chvění či posunu vysílací hlavičky z optimální polohy. Tento nedostatek se u laserů řeší použitím kolimační čočky, která slouží rozptýlený svazek na souvislý. [4]

Vyzařované spektrální šířky (viz obr. 5.1) jsou u:

- LD desetiny až jednotky nm
- LED 10÷100 nm



Obr. 5.1: Porovnání šířky spektra emitovaného záření pro LED a LD (převzato z [15])

5.3.2 LED diody požíváné v optických bezkabelových spojích

Diody LED oproti LD se vyznačují zejména v nižší pořizovací ceně, nenáchylnosti na teplo, snadná modulovatelnost a také zejména řídicí elektronice, která je podstatně jednodušší. LED jsou obecně daleko více stabilní, a proto jejich životnost je delší. LD emitují vysoký výkon a díky tomu, jsou náchylné na teplo, (musí se neustále chladit, jinak dochází ke zničení) proto jejich životnost je nižší. U jednoduššího řídicího modulačního obvodu u LED není zapotřebí používat teplotní stabilizaci nebo zpětnou vazbu z výstupu pro ovládnání jejího výkonu, jak je tomu potřebné u LD. Infračervené LED se vybírají z důvodu vyšší efektivity a vhodnější vlnové délky záření, a také pokud je na přijímací straně použita křemíková PIN dioda. Pro tyto účely se využívají diody IR z důvodu většího dosahu spoje. [4]

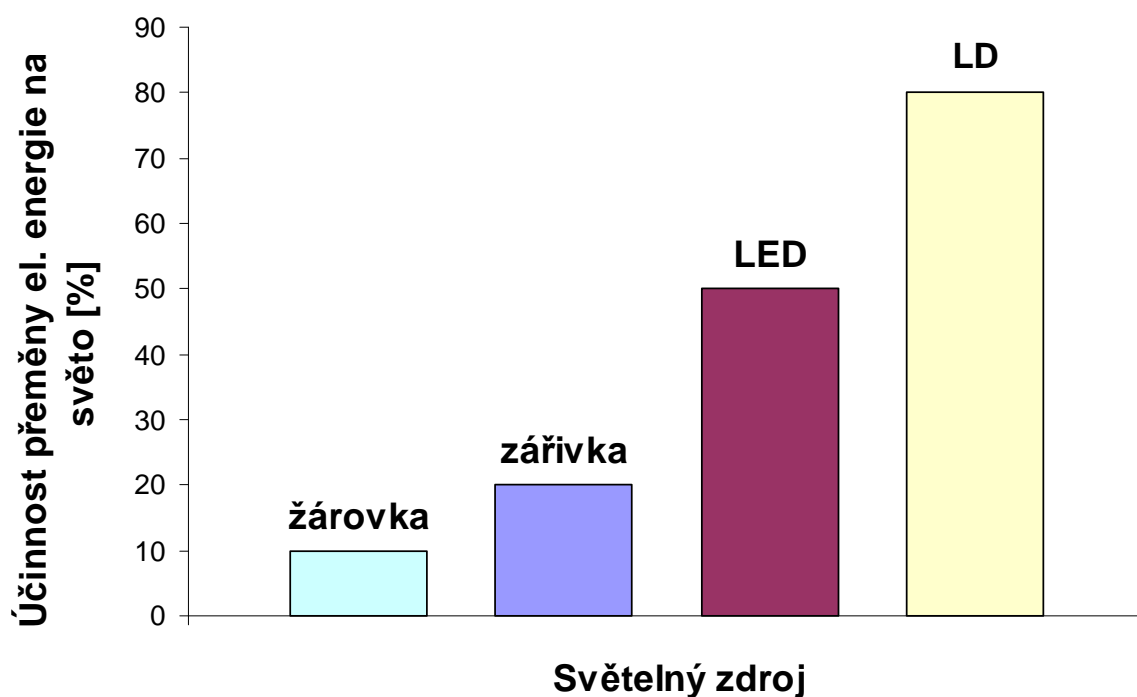
Systémy, které nevyžadují velký dosah (do 1 km) a nepotřebují přenášet informace vysokou rychlostí, jsou určeny pro variantu s LED. Pro vzdálenější spoje jsou určeny LD, které mají mnohem lepší divergenci, vysoký optický výkon a musejí mít kvalitní optiku z důvodu stability paprsku. V Tab. 5.1 jsou porovnány oba optické zdroje z hlediska vlastností.

Tab. 5.1: Vlastnosti optických zdrojů záření

Vlastnosti	LED	Laserová dioda
Modulační rychlost	<300 MHz	>1 GHz
Výkon	10 mW, záleží na typu	100 mW, záleží na typu
Spektrální šířka	10÷100 nm	< 1 nm
Záření	Nekoherentní	Koherentní
Min. výstupní divergence	Široký; 0,5° (podle rozměrů)	úzký; 0,01°
Životnost	Dlouhá s malým úbytkem výkonu	Střední, výkon časem klesá
Teplotní závislost	Minimální závislost na teplotě	Vysoká závislost na teplotě
Řídící elektronika	Jednoduchý modulovatelný proudový zdroj	Kompensace teploty a výstupního výkonu
Cena	Nízká, běžná optika a elektronika	Vysoká, kvalitní optika a elektronika

5.3.3 Porovnání účinnosti světelných zdrojů

Na obr. 5.2 je znázorněna závislost účinnosti přeměny elektrické energie na světlo na světelném zdroji. Z obrázku je patrné, že LD vykazují vysokou účinnost 80 %, (některé LD 75 %, záleží na daném typu), LED okolo 50 %, zářivky 15÷30 % a žárovky 1÷8 %.



Obr. 5.2: Účinnost světelných zdrojů

6 DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

V bezkabelových optických komunikacích jsou detektory optického záření umístěny na přijímací straně, kde dochází k přeměně optického signálu na elektrický. Detektory využívají vlastnosti PN přechodu. Závěrná vrstva mezi polovodiči P a N je značně citlivá na světlo, kdy při jejím osvětlení vzrostl závěrný proud. Z tohoto důvodu jsou diody uzavřené před světlem. Ovšem je-li PN přechod upraven tak, aby na něj mohlo dopadat optické záření, můžeme diodu využít jako fotocitlivou součástku. Dopadá-li pak záření do oblasti přechodu, generují se páry elektron-díra, přičemž se elektrony přesouvají do oblasti N a díry do oblasti P. [11] V praxi se u FSO používají dva druhy fotodiód využívající přechod PN. Jsou to fotodiody PIN a APD (Avalanche Photo Diode).

Signál procházející atmosférou je značně zeslaben. Fotony, které dopadají na fotodiodu, jsou nepřímo úměrné druhé mocnině vzdálenosti. Vstupní část předzesilovače by měla mít dobré širokopásmové i nížkošumové vlastnosti. Zapojení musí umožňovat fotodetektoru inkasovat silné okolní osvětlení, aniž by na něm kleslo napětí. Nekvalitní optikou se nesoustřeďuje světlo v optickém přijímači z vysílače do plošky velikosti vlnové délky. Pokud na zařízení při přenosu zasvítí Slunce a není použit spektrální filtr, uplatňuje se výstřelový šum (kvantová optika) vznikající náhodným rozložením dopadajících fotonů silného slunečního osvětlení a nelze jej snížit [16]

Mezi základní parametry optických fotodetektorů patří [29]:

- **Kvantová účinnost** - tento parametr užívají detektory založené na fotoelektrickém jevu a určuje pravděpodobnost uvolnění elektronu k počtu fotonů dopadajících na fotokatodu
- **Spektrální citlivost** - je závislost výstupní veličiny detektoru optického záření na frekvenci dopadajícího optického záření
- **Detektivka** - určuje citlivost detektoru. Čím je hodnota vyšší, tím je citlivější detektor
- **Šum** - k určení šumových vlastností fotodiody se používá parametr výkon ekvivalentní šumu (NEP)
- **Časová odezva** - je časový interval, za který se podstatně změní výstupní signál detektoru, jestliže se na počátku změnila skokem intenzita signálu dopadajícího na detektor

6.1 Fotodiody

Fotodioda je polovodičová dioda, která je založena na vnitřním fotoelektrickém jevu a je citlivá na osvětlení PN přechodu světlem určité vlnové délky. FD mohou pracovat ve dvou režimech, a to:

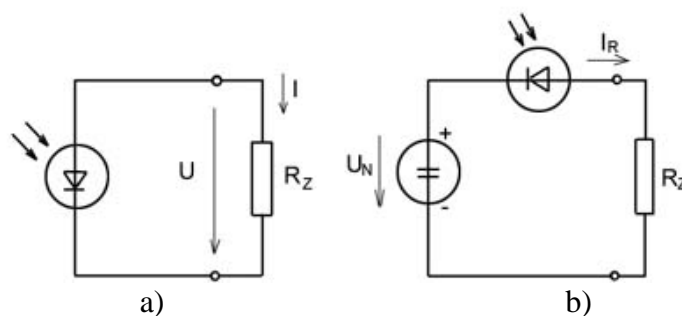
a) Odporovém, kdy se chová jako spotřebič v obvodu napájeném vnějším zdrojem napětí (obr. 6.1b).

b) Hradlovém, kdy dodává proud do připojené zátěže (obr. 6.1a).

V prvním odporovém (fotovodivostním) režimu pracuje jako pasivní součástka (spotřebič) a její odpor je závislý na osvětlení. Z tohoto důvodu bývá označována také jako odporová dioda. Na PN přechodu je z důvodu závěrné polarizace větší intenzita elektrického pole, která rozšiřuje ochuzenou oblast a elektrony i díry tak získávají vyšší rychlost. Z toho plyne i odezva fotodiody, která je závislá na rychlosti nosičů a tím pádem i tloušťce ochuzené oblasti. V tomto režimu, kdy je dioda připojena na zdroj napětí v závěrném směru, lze pomocí rezistoru měřit protékající proud. [11]

V hradlovém režimu někdy také formulováno fotovoltaickém, pracuje fotodioda jako aktivní součástka, ve které může dodávat elektrickou energii.

Fotodiody jsou polarizovány v závěrném směru a pro detekci mají pracovní bod ve třetím kvadrantu V-A charakteristiky (viz obr. 6.2). U FD je výhodou velmi krátká doba odezvy, řádově 10^{-6} až 10^{-9} s.

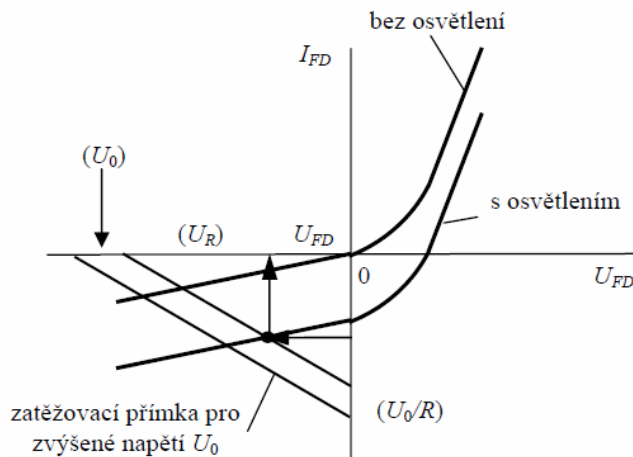


Obr. 6.1: Pracovní režim fotodiody: a) hradlový b) odporový (převzato z [12])

Mezi nejčastěji používané materiály při výrobě fotodiod patří:

- Si (křemík)
- GaAs (galium arsenid)
- InSb (antimonid india)
- InAs (arsenid india)

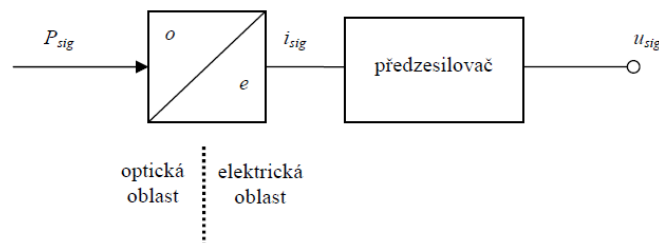
Každý z těchto materiálů je vhodný k absorpci světelného záření různých vlnových délek. Například křemík lze využít pro vlnové délky od 250 nm do 1100 nm. Fotodiody zhotovené z GaAs jsou využívány pro pásma vlnových délek v blízké infračervené oblasti, tedy 800 nm až 2000 nm a z InGaAs pro 1000 nm až 2500 nm. Diody vyrobené z těchto materiálů mají dostatečnou citlivost, ale nejsou vhodné pro nízkou intenzitu osvětlení ani vysoké kmitočty. U FSO systémů se nejvíce využívají fotodiody, které mají největší citlivost v červené nebo infračervené oblasti. [11]



Obr. 6.2: VA-charakteristika fotodiody (převzato z [6])

6.1.1 Zapojení fotodiody a předzesilovače

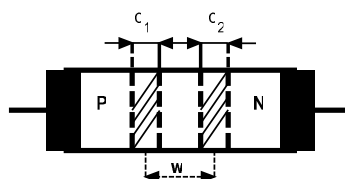
Na obr. 6.3 je uvedeno blokové schéma přijímače, jehož základní funkcí je konverze optického signálu na elektrický. Schéma je složeno z fotodiody (optická a elektrická oblast) a předzesilovače. Díky vlastnostem fotodiody, dochází k přeměně optického signálu na elektrický. Elektronická oblast vytváří pro funkci fotodiody dobré podmínky (teplotní a napěťovou stabilitu) a musí vyloučit zničení fotodiody napěťovým nebo výkonovým přetížením. K elektronické oblasti přijímače bývá umístěn předzesilovač, u kterého na výstupu je napěťový signál. Předzesilovač musí splňovat požadavek na šířku pásma přenosu. [6]



Obr. 6.3: Blokové schéma přijímače ukazující jeho systémovou funkci (převzato z [6])

6.1.2 Fotodiody typu PIN

Fotodiody PIN mají mezi vrstvami P a N umístěnou oblast rozšířené ochuzené vrstvy I (intrinsická vrstva - slabě dotovaná oblast), kterou se dosahuje zvětšení aktivní oblasti pro příjem fotonů (citlivosti) a účinnosti. Základní struktura fotodiody PIN je naznačena na obr. 6.4.



Obr. 6.4 Struktura fotodiody PIN

Doba náběhu u fotodiody PIN se pohybují okolo desítek ps. Časová konstanta τ fotodiody PIN je vyjádřena vztahem

$$\tau = \frac{w}{v_T} \approx 10^{-10} \text{ s}, \quad (6.1)$$

kde w je tloušťka vrstvy I a v_T je rychlost nositelů náboje. Kapacita fotodiody C je daná vztahem

$$C = \varepsilon \frac{S}{w}, \quad (6.2)$$

kde S je plocha PN přechodu a ε je permitivita prostředí. Typická hodnota kapacity fotodiody PIN je 10 pF.

Tvar aktivní plochy fotodiody bývá tvaru kruhu (nebo obdélníku) s průměrem od 0,1 mm do 3 mm (i více). Čím větší je aktivní plocha fotodiody A_{FD} , tím větší výkon přijímá, ale zvyšuje se časová konstanta τ a dosahuje se relativně nižších přenosových rychlostí. Proudová citlivost fotodiody se definuje jako proud, který fotodiódou protéká vztažený k jednotce optického výkonu, který na fotodiodu dopadá

$$S_I = \frac{dI_{FD}}{dP_{FD}}. \quad (6.3)$$

Napětíová citlivost optického přijímače se definuje jako napětí U_{PZ} na výstupu přijímače vztažené k jednotce optického výkonu, který dopadá na fotodiodu

$$S_U = \frac{dU_{PZ}}{dP_{FD}}. \quad (6.4)$$

Citlivost fotodiody je spektrálně závislá. U křemíkových PIN fotodiód se dosahuje maximální citlivosti (asi $0,6 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$) pro délku vlny 900 nm.

Šumové vlastnosti optického přijímače jsou definovány veličinou výkon ekvivalentní šumu (noise equivalent power; NEP). Hodnota NEP vyjadřuje takový střední optický výkon (harmonicky modulovaného signálu) na vstupu optického přijímače, který odpovídá standardní odchylce šumového elektrického napětí na výstupu předzesilovače $\sqrt{\langle \Delta u_3^2 \rangle}$. Uvedenou definici lze vyjádřit vztahem [5]

$$NEP = \frac{\sqrt{\langle \Delta u_3^2 \rangle}}{S_U}. \quad (6.5)$$

Veličina NEP se často vztahuje na jednotku šířky pásma přenosu B_m optického přijímače a značí se NEP_1 . Protože výkon šumu je úměrný $\sqrt{B_m}$, lze psát [5]

$$NEP = \frac{\sqrt{\langle \Delta u_3^2 \rangle}}{S_U \sqrt{B_m}} \text{ [W.Hz]}. \quad (6.6)$$

6.1.3 Fotodiody typu APD

Fotodiody APD neboli lavinové fotodiody využívají vnitřního zesílení, které je vyvoláno lavinovým jevem. Vnitřní zesílení G_{FD} se pohybuje okolo 100, avšak současně vzrůstá díky náhodnému charakteru zesílení celkový šum fotodiody. [6] Fotony dopadající na aktivní oblast fotodiody vlivem silného elektrického pole uvolní jeden pár elektron-díra a zahájí lavinovou reakci. Lavinová ionizace způsobí, že citlivost fotodiody APD je vyšší než u ostatních fotodiody. Vyšší je však také šum, způsobený lavinovým efektem. Kromě toho situaci komplikuje nutnost vyššího napájecího napětí, často přesahujícího 100 V. Vyšší výrobní náklady se pak odrážejí ve vyšší ceně této fotodiody APD. [30]

Mezi hlavní výhody APD fotodiody patří vysoká citlivost. Nevýhodou je, že musíme obstarat dostatečně vysoké napětí na tuto diodu. Ze svého principu (velké citlivosti) vytváří více šumu a je díky lavinovému efektu nelineární.

Pro napájení APD je vyžadován zdroj s relativně velkými a stabilními hodnotami napětí (řádově stovky voltů). Vnitřní zesílení APD je relativně velmi citlivé na změny teploty a napětí. Doba náběhu APD je srovnatelná s dobou náběhu fotodiody PIN (méně než 1 ns). APD vyžadují komplikovanější elektronické obvody než fotodiody typu PIN.

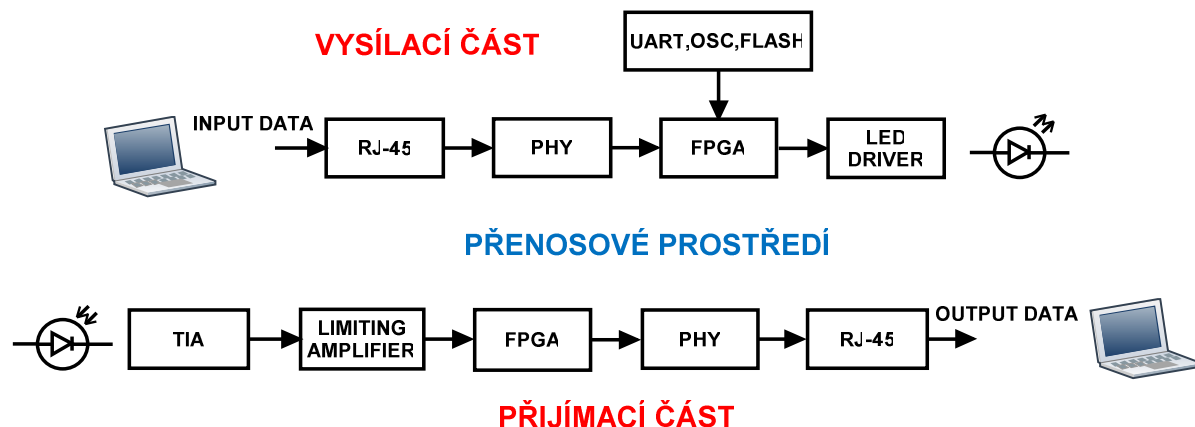
6.1.4 Použití fotodiody

Rychlé fotodiody PIN se nejčastěji používají v optických komunikačních systémech nebo v senzorech (např. v optických dálkoměrech) pro detekci optického záření.

Použití fotodiody APD je vhodné tam, kdy se předpokládá relativně velmi nízká úroveň přijímaného optického výkonu, např. při optické komunikaci mezi satelity. Pro satelitní komunikaci jsou perspektivní vysoce citlivé APD fotodiody pracující ve funkci čítače fotonů (Geiger-mode APD). V praktických aplikacích se vyskytují například jako rychlé čtečky čárových kódů, laserové radary nebo biomedicínské přístroje.

7 NÁVRH A POPIS OPTICKÉHO BEZKABELOVÉHO SPOJE

V úvodních kapitolách je teoreticky popsána skladba FSO, z čehož je doporučené vycházet pro samotný návrh. Navržený vysokorychlostní optický bezkabelový spoj se skládá z jednotlivých bloků, které jsou podrobně popsány, a na obr. 7.1 je zaznačena jeho bloková struktura. Spoj podle požadavků zadání by měl komunikovat rychlostí 100 Mb/s s obousměrnou komunikací (full duplex) a maximálním dosahem kolem 100 m.



Obr. 7.1: Koncepce optického spoje

7.1 RJ45

Přes konektor RJ-45 (obr. 7.2), který je umístěn na PCB, prochází datový signál. Tento typ konektoru obsahuje možnost i napájení pomocí POE (Power Over Ethernet). Externí napájení 5 V je pomocí konektoru power jack typu DCJ0202 ponecháno (obr. 7.2). Pomocí propojovacích jumperů, které jsou vidět na PCB (viz. příloha E) je možnost zvolit výběr napájení (vlevo standardně 5 V, vpravo přes POE).



Obr. 7.2: Zásuvka konektoru RJ-45, konektor DJJ202

7.1.1 Napájení zařízení

Celé zařízení může být napájeno přes standardní Ethernetový kabel. Takový způsob napájení se označuje zkratkou POE, který je schváleným standardem (IEEE 802.3af). Tohoto způsobu se využívá z hlediska praktičnosti (např. ušetří náklady). Výhoda spočívá v tom, že do zařízení putují data i napájení po jednom samostatném kabelu. Jelikož u často používaných standardů Ethernetu 10Base-T a 100Base-TX jsou využívány jen čtyři vodiče z celkových osmi, zbývající čtyři vodiče se dají použít pro napájení. Zařízení POE se dělí na aktivní a pasivní. Rozdíl je takový, že aktivní POE obsahuje regulátor výstupního napětí, pomocí kterého lze výstupní napětí regulovat, a spíše jsou už tyto hodnoty předdefinované (např. 5 V, 9 V, 12 V). V této práci je navrženo POE tak, aby jeho výstupní napětí bylo 48 V. Vstupní napětí je ~230 V. Pro snížení napětí z 48 V (při použití POE) na 5 V, kterými jsou napájeny některé bloky zařízení (LED Driver aj.), je použit DC/DC měnič, který je znázorněn na obr. 7.6.

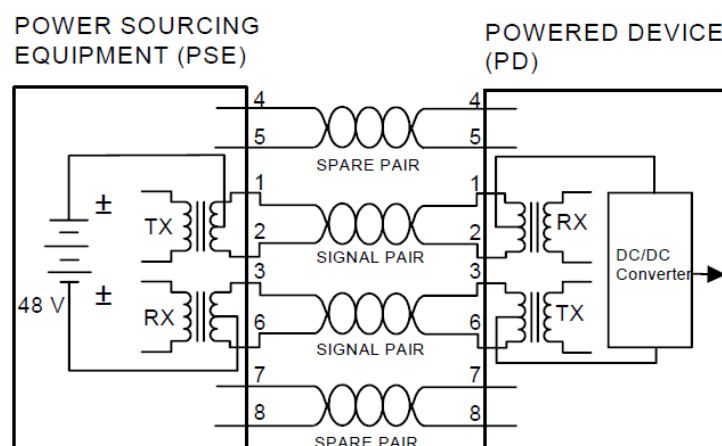
Síťový kabel je rozdělen do 4 párů, které jsou samostatně krouceny. Jednotlivým vodičům jsou dle normy přiřazena čísla 1 až 8 a do párů jsou rozděleny následovně:

- 1,2
- 3,6
- 4,5
- 7,8

Tato čísla udávají pořadí kontaktů na konektoru RJ 45. POE využívá v zásadě dvě možné varianty zapojení:

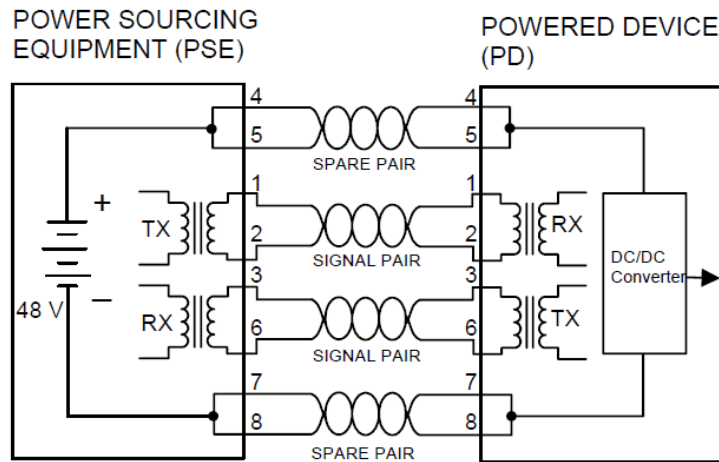
- varianta A
- varianta B

Varianta A (viz obr. 7.3) využívá napájecí a datové páry 1,2 a 3,6 současně a jsou kříženy. V dnešní době již prakticky všechna síťová zařízení umožňují automatickou detekci a správné nastavení linky při zapojení kříženého i přímého kabelu.



Obr. 7.3: Způsob napájení POE -varianta A (převzato z [8])

Varianta B (viz obr. 7.4) využívá v datovém kabelu napájení na volných párech (4,5 a 7,8). Vodiče 4 a 5 vedou kladný pól a vodiče 7 a 8 záporný pól.



Obr. 7.4: Způsob napájení POE - varianta B (převzato z [8])

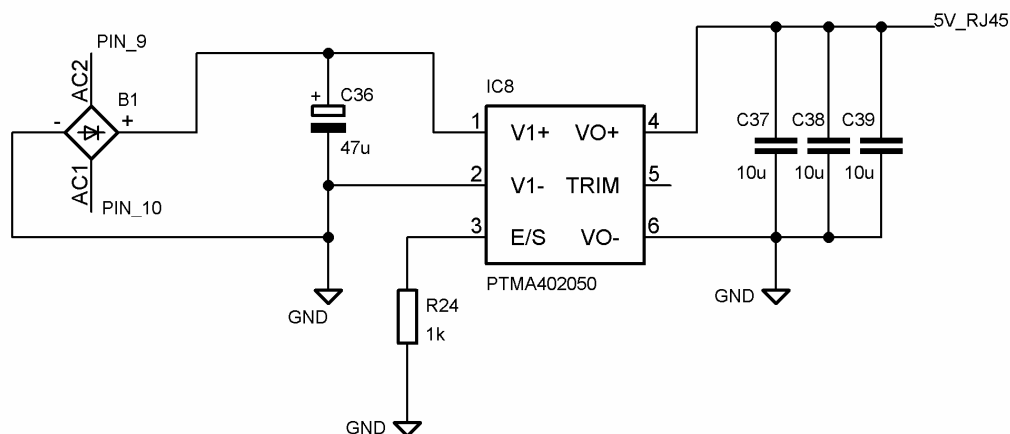
Zařízení je navrženo s variantou B, jelikož se tahle varianta užívá u Fast Ethernetu (100Base-TX) častěji. Jednoduchý adaptér, který umožňuje sloučit jak napájení, tak data je uveden na obr. 7.5. Do pasivního POE pomocí kulatého konektoru může být přivedeno napětí například 18 V DC, záleží na daném typu. Počítač je propojen s POE pomocí síťového kabelu do zdířky LAN. Ze zdířky POE pomocí síťového kabelu, ve kterém už jsou jak data, tak napájení, je spojeno navržené zařízení.



Obr. 7.5: Univerzální pasivní POE injektor

7.1.2 Měnič DC/DC

Měnič DC/DC je použit ke snížení napětí ze 48 V na 5 V. Vyskytnou-li se komplikace s takovou variantou řešení, externí napájení 5 V je ponecháno. Na vstupu měniče je zapojen greatzův můstek, který slouží jako ochrana proti přepólování. Tyto typy měničů s označením PTMA40XX se používají právě na aplikace POE nebo i jiné. Poslední písmena XX znamenají jejich výstupní napětí. Výstupní výkon měniče je 10 W, který je dostačující. Pin T_{RIM} zůstane nezapojen.



Obr. 7.6 : DC/DC měnič

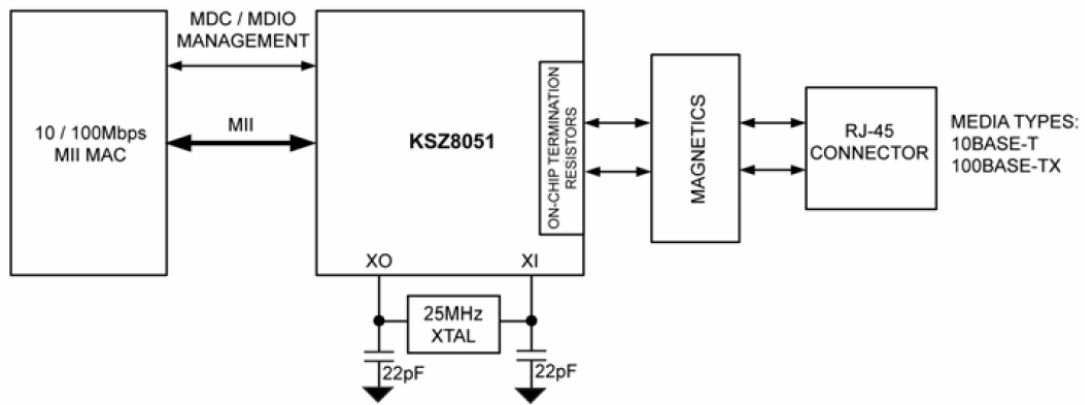
7.2 Fyzická vrstva a transceiver

Fyzická vrstva je nejnižší vrstva síťové architektury OSI. Definuje všechny elektrické a fyzikální vlastnosti zařízení. Tato vrstva specifikuje bitový přenos z jednoho zařízení na druhé prostřednictvím fyzického média. Protokoly fyzické vrstvy stanovují elektrické vlastnosti rozhraní (napěťové úrovně, průběhy, kmitočty, modulace, rychlosti, elektrické vlastnosti kabelů) a mechanické vlastnosti (tvary, velikosti a zapojení konektorů). Tato vrstva je dále rozdělena na podvrstvy PMD (Physical Medium Dependent Sublayer) a PHY (Physical Protocol Sublayer). V našem případě je použit standard 100 BaseTX, který obsahuje MLT-3 kódování.

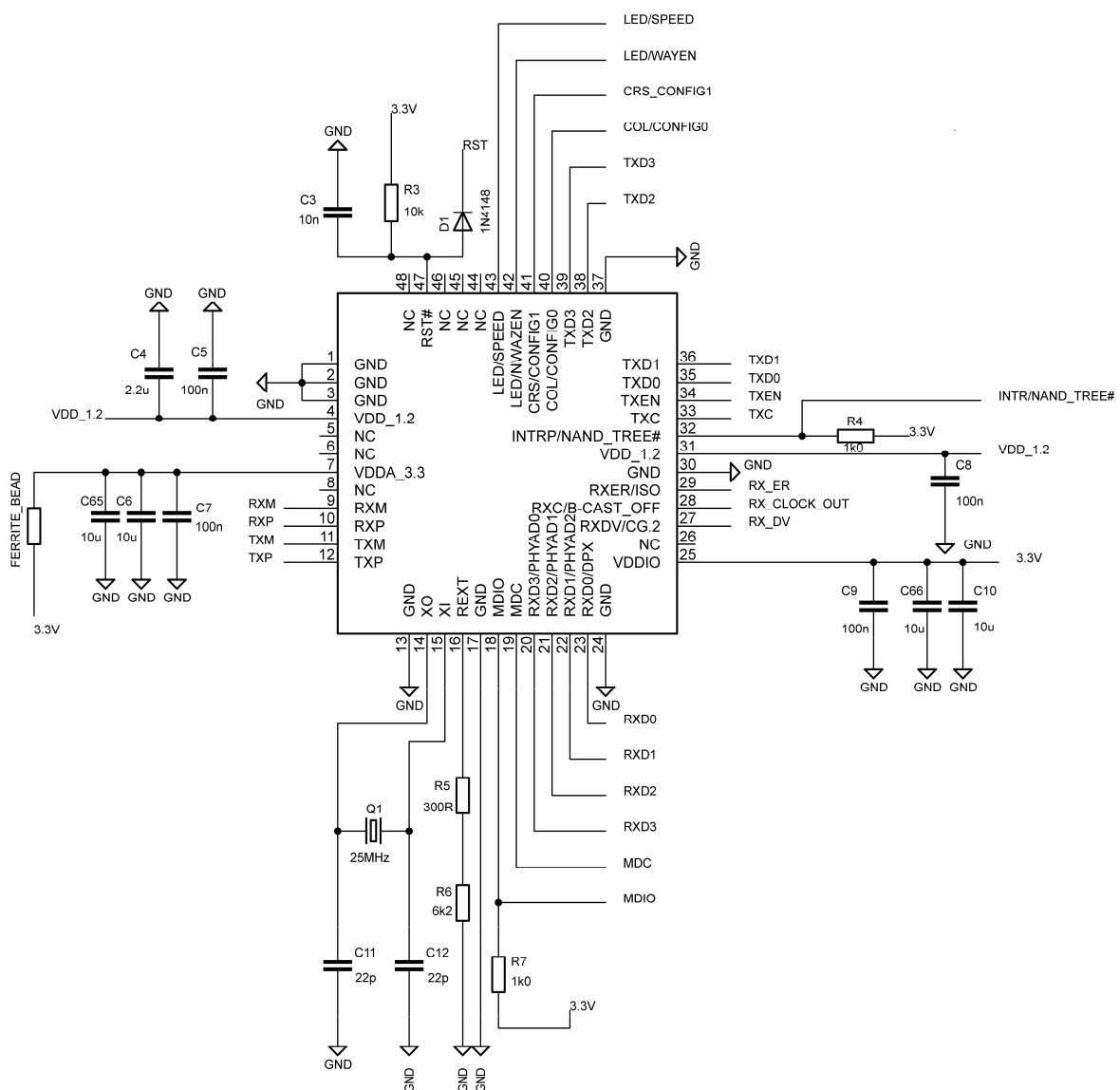
Transceiver slouží pro přenos a příjem dat (full-duplex) přes standardní CAT-5 nestíněné kroucené dvojlinky (UTP kabel). Kroucená dvojlinka patří dnes jako nejrozšířenější druh ethernetové kabeláže. V návrhu byl vybrán typ KSZ8051MLL, který je pro vysokorychlostní optický spoj plně vyhovující. KSZ8051MLL podporuje MII rozhraní. Blokové zapojení transceiveru a kompletní schéma je zobrazeno obr. 7.7 a obr. 7.8. Konektor RJ-45 a transceiver budou mezi sebou propojeny čtyřmi vodiči. Dva slouží pro příjem a dva pro odesílání dat.

7.2.1 Základní technické parametry transceiveru

- Datová rychlost: 100 Mb/s
- Typ ethernetu: IEEE 802.3
- Rozhraní typu: MII
- Napájecí napětí: 3,135 V až 3,465 V, standard 3,3 V
- Napájecí proud: 39.5 mA
- Počet pinů na pouzdru: 48 LQFP
- Teplotní rozsah: 0 °C až +70 °C



Obr. 7.7: Funkční diagram transceiveru (převzato z [18])



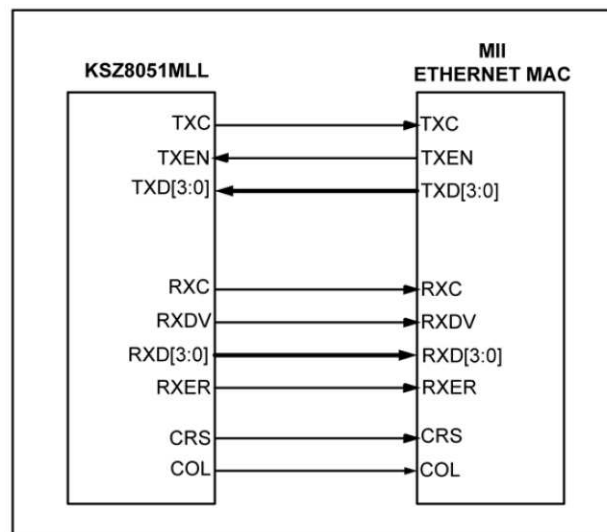
Obr. 7.8: Zapojení transceiveru

7.2.2 Rozhraní MII

Media Independent Interface (MII) je standardní rozhraní, které je kompatibilní se standardem IEEE 802.3 specifikace. Automaticky rozlišuje rychlost Ethernetu. Poskytuje běžné rozhraní mezi PHY a MAC (Media Access Control) a má tyto vlastnosti:

- Celkový počet pinů 15 (16) TXER (Transmit Error) zde není, používá se zřídka, 6 pinů slouží pro přenos dat, 7 pro příjem a poslední dva pro detekci nosné vlny a kolizi
- Rychlost přenosu dat 10 Mb/s a 100 Mb/s pro poloviční a plný duplex
- Ve výchozím nastavení je KSZ8051MLL nakonfigurován do režimu MII
- 25 MHz krystal je připojen k pinům XI, XO (piny 14, 15).

Propojený transceiver MII s MII Ethernet MAC v tomhle případě FPGA (Field Programmable Gate Array) je na obr. 7.9.



Obr. 7.9: KSZ8051MLL MII rozhraní (převzato z [18])

7.2.3 MII vs RMII

RMII (Reduced Media Independent Interface) byl vyvinut ke snížení potřebného počtu vodičů oproti MII rozhraní. Rozhraní používá polovinu počtu signálů, tzn. 8. Hodinová frekvence je ale dvojnásobná, čili 50 MHz. TXCLK a RXCLK jsou nahrazeny do jednoho hodinového vstupu. RXDV a CRS signály jsou multiplexovány na jeden a COL signál je odstraněn. Signály TXD a RXD jsou po dvou. Pro jednu Ethernet PHY / MAC se používá MII. MII je více populární a levnější.

Další typy rozhraní: GMII (Gigabit Media Independent Interface), RGMII (Reduced Gigabit Media Independent Interface), SGMII (Serial Gigabit Media Independent Interface)

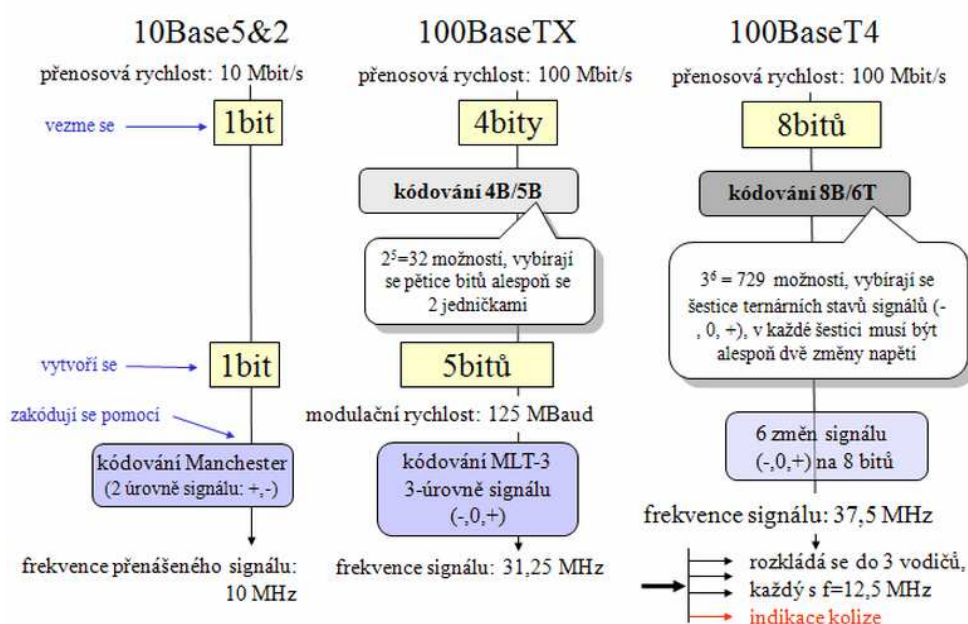
7.2.4 Způsoby kódování

Na rozdíl od Ethernetu 10BaseT už zde nejde o kódování Manchester, které pracuje jen se dvěma „polohami“ signálu (např. + a -), ale o kódování MLT-3 (viz obr. 7.11), které pracuje se signálem nabývajícími třemi možnými „polohami“ (+, 0 -). Jde tedy již o signál ternární,

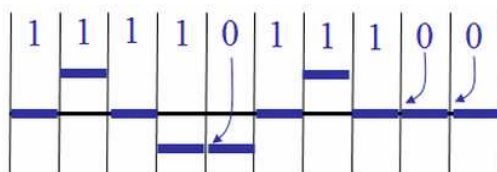
nikoli binární, který se sice hůře detekuje, ale na druhou stranu dokáže na sebe „naložit“ více bitů. Každá jednotlivá změna totiž může reprezentovat více než jeden bit, jako u původního Manchesteru. Na obr. 7.10 je znázorněno jednotlivé kódování sítí Ethernetu.

Během přenosu dat jednotlivými bloky celého zařízení, bude docházet k různému kódování. Než data doputují na vstup transceiveru z ethernetové sítě (100BaseTX), jsou zakódovány do kódu MLT – 3. V transceiveru se z kódu MLT–3 vytvoří kombinace 1 a 0 a ty se převedou na kódování 4B/5B. Jednotlivé čtveřice bitů se nahrazují vybranými pěticemi, a to tak, aby mezi pětici bitů bylo co možná nejvíce jedničkových bitů. Tyto bity se posílají do FPGA.

V FPGA dochází opět ke změně. Namísto původního kódování 4B/5B je pro optický spoj použito kódování 8B/10B. Signál z enkóderu 8B/10B je přiveden na serializer, který vytvoří z paralelních dat data sériová. Tyto sériová data, která se posílají bit po bitu, putují na vysílač.



Obr. 7.10: Představa kódování u jednotlivých verzí Ethernetu [22]



Obr. 7.11: Kódování MLT – 3 (multi level transition)

- 1 znamená změna signálu
- 0 znamená beze změny

7.3 FPGA

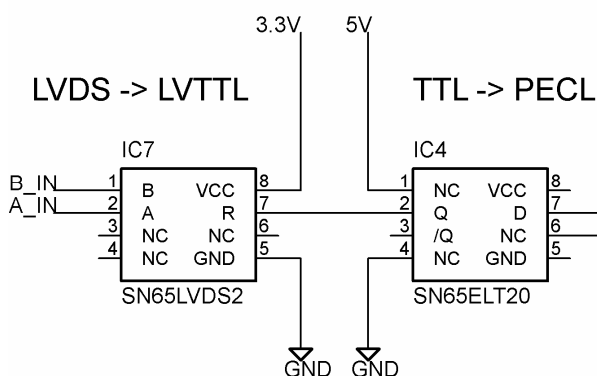
Výběr obvodu FPGA byl přidělen vedoucím práce, a to pod označením XC6SLX9-2TQG144C od výrobce XILINX. Z názvu je patrné, že se jedná o SPARTAN 6 s pouzdrém obsahujícím 144 piny. Schéma jednotlivých bank obvodu, jsou uvedeny v příloze A.

Ke své funkci FPGA využívá následující bloky: paměť FLASH, pomocnou paměť EEPROM, oscilátory (125 MHz a 100 MHz) a USB-UART.

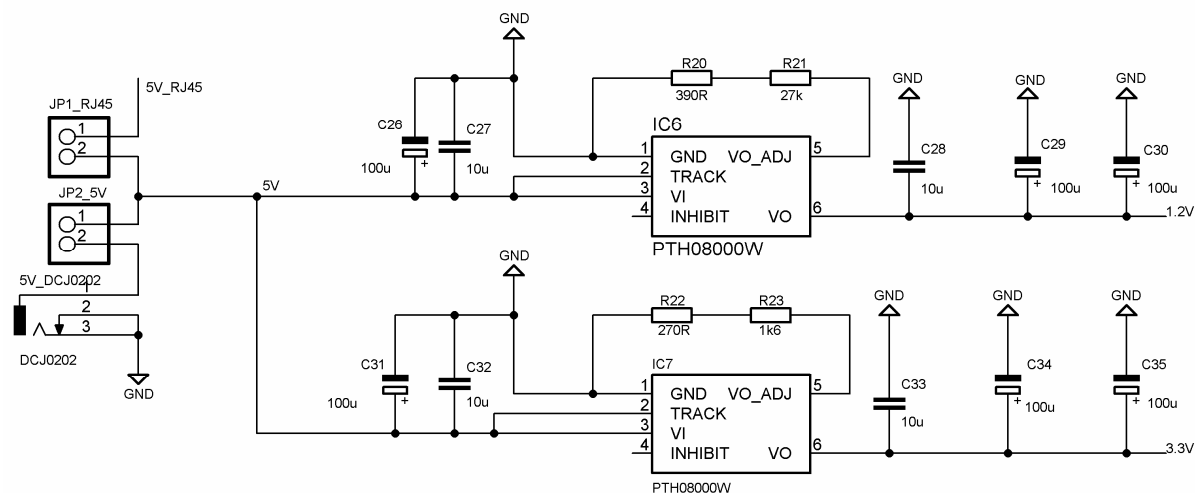
Spartan 6 používá pro rozhraní optického spoje standardní diferenciální logiku LVDS (Low - Voltage Differential Signaling) a logiku LVPECL. (Low - Voltage Positive Referenced Emitter - Coupled Logic). Jelikož vysílač (LED Driver) používá logiku PECL (Positive emitter - coupled logic), je nutné pomocí převodníku převést z úrovně LDVS na PECL. Jako převodník jsou použity dva integrované obvody, jelikož neexistuje převodník pro přímý převod signálu LVDS na PECL. Každý z převodníků plní jinou funkci převodu. První převodník s označením SN65LVDS2 převádí z logiky LVDS na LVTTL (Low - Voltage Transistor-Transistor Logic), druhý s označením SN65ELT20 z logiky TTL (Transistor Transistor Logic) na PECL. Schéma zapojení převodníku je znázorněno na obr. 7.12. Vstupy A a B obvodu SN65LVDS2 jsou propojeny s FPGA. Možnou variantou je ještě pomocí odporové sítě, nicméně tento způsob řešení je méně spolehlivý vzhledem ke garantovanému rozkmitu výstupního napětí budiče LVDS a požadovanému rozkmitu napětí vstupů PECL

Jednotlivé banky FPGA jsou napájeny 3.3 V, a ke každé bance musejí být zapojeny blokovací kondenzátory, které se umísťují co nejbližší k vývodům IO. Celkový počet blokových kondenzátorů je 24. Hodnoty těchto kondenzátorů stanovuje obvykle výrobce a jsou uvedeny v katalogovém listu.

Jelikož FPGA používá i dílčí napětí (1,2 V), které jsou zapojeny např. na piny VCCINT (vnitřní napájení jádra RAM, DSP bloky aj.) jsou do návrhu spoje přidány napěťové regulátory (viz obr. 7.13) od výrobce Texas Instruments, které z 5 V vytváří požadované napětí.



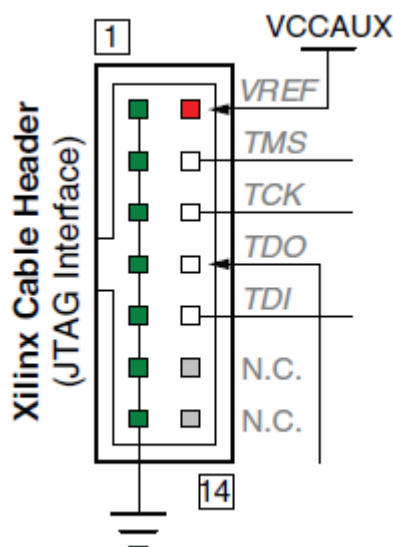
Obr. 7.12: Princip převodu obvodových logik



Obr. 7.13: Napěťové regulátory

7.3.1 FLASH paměť

Programovatelná paměť FLASH (výrobce ji označuje PROM) slouží k uchování konfigurace obvodu FPGA i po odpojení napájecího napětí. Je to nonevolatilní, elektricky programovatelná (zapisovatelná) paměť s libovolným přístupem. Paměť je propojená s obvodem FPGA a i se standardním 14 pinovým FPGA JTAG (Joint Test Actoin Group) konektorem, který slouží ke konfiguraci se zařízením. Přes tento konektor se do obvodu FPGA implementoval kompletní program. Na obr. 7.14 je znázorněno schéma zapojení JTAG konektoru.

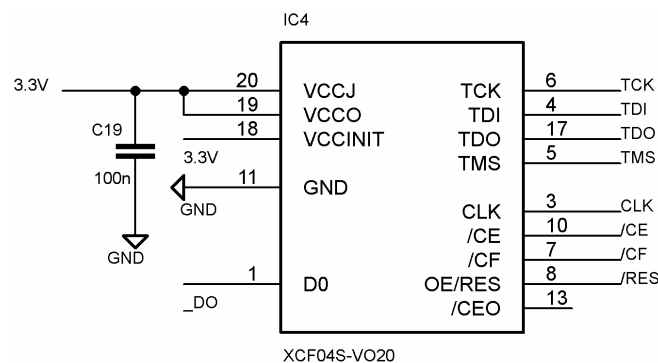


Obr. 7.14: Schéma zapojení JTAG konektor (převzato z [33])

Pro přístup k testovacím funkcím (JTAG) vestavěným do obvodu slouží tzv. TAP (Test Access Port), který je sestaven ze tří vstupních a jednoho výstupního signálu. Komunikační rozhraní JTAG využívá čtyři povinné signály: TMS, TCK, TDI a TDO a nepovinný resetovací signál TRST.

- TCK (Test Clock Input): hodiny pro testovací logiku, pomocí nichž se posouvají data a instrukce
- TMS (Test Mode Select Input): sériový vstup pro řídicí bity testovací logiky
- TDI (Test Data Input): sériový vstup pro přenos dat a instrukcí
- TDO (Test Data Output): sériový výstup pro přenos dat a instrukcí
- TRST (Test Asynchronous Reset Input): asynchronní reset aktivní v log. 0 (nepovinný)

Typ paměti byl vybrán XCF04S-VO20 (viz obr. 7.15). Piny na paměti jsou kompatibilní s napětíovou úrovní 1,8 – 3,3 V.

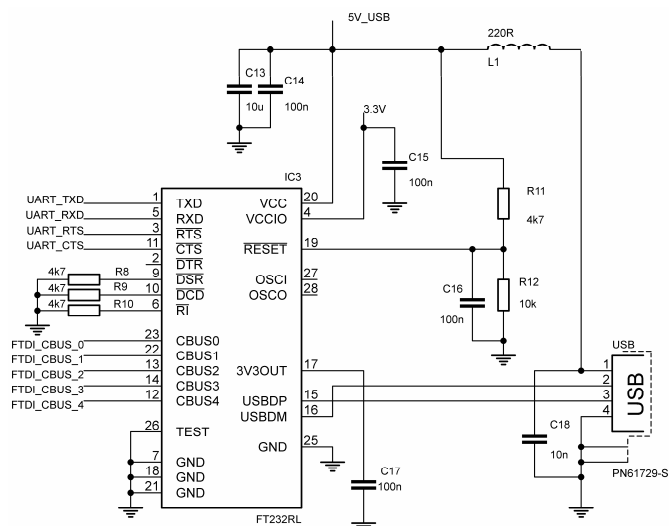


Obr. 7.15: Paměť FLASH

7.3.2 USB UART

Pro komunikaci mezi FPGA a počítačem je použito sériové UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) rozhraní. Jelikož FPGA není vybaveno rozhraním USB, je třeba využít integrovaných obvodů FTDI, které převádí data z UART na USB. Jako integrovaný obvod je použit FT232R. FT232R je převodník USB-UART, který disponuje přenosovou rychlostí 300 Bd – 3 MBd. USB UART je použito pouze pro odladění obvodu.

Dnes jsou dostupné od firmy FTDI varianty FT232BM, FT232BL a FT232BQ, které se liší j typem pouzdra. FT232R se dodává v QFN-32 pouzdra. Tento obvod je znázorněn na obr. 7.16. Obvod může pracovat jak s 5 V tak i 3,3 V logikou. Napájecí napětí je 5 V, a je možné ho napájet přímo z USB, jak je uvedeno zde. UART je propojeno s FPGA čtyřmi vodiči. Zbývajících pět vodičů (CBUS z obr. 7.16) jsou nepovinné. Ve verzi FT232R (oproti starším verzím) je integrována například paměť EEPROM, pro uložení identifikace USB zařízení v systému, integrované USB rezistory a další.



Obr. 7.16: Schéma zapojení USB UART s převodníkem FT232R

Konektor USB typu B, který slouží k propojení UART s PC je znázorněn na obr. 7.17



Obr. 7.17: Konektor USB typu B

7.3.3 Oscilátor EG2102CA

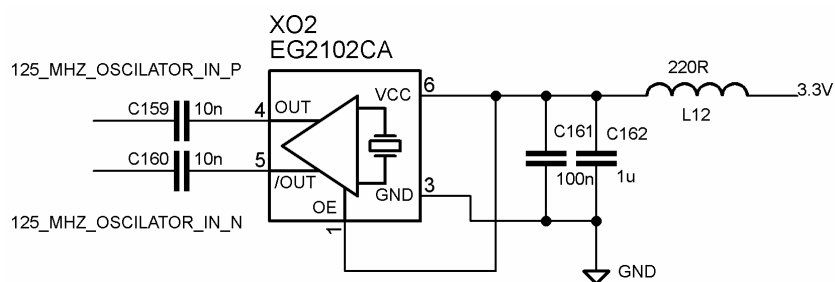
Oscilátor vytváří hodinový signál, který putuje do obvodu FPGA s frekvencí 125 MHz. Vlastnosti oscilátoru jsou v Tab. 7.1. Na vstupu jsou umístěny blokovací kondenzátory a k nim připojená feritová perla, která slouží jako odrušovací člen.

Tab. 7.1: Vlastnosti oscilátoru EG2102CA

Frekvenční rozsah typové řady	100 MHz až 700 MHz
Napájecí napětí	3,3 V \pm 0,3 V
Typ výstupního signálu	LV-PECL, LVDS
Fázový šum (jitter)	1 ps

Výstup LVDS je propojen s piny FPGA. LVDS je diferenciální linka tvořená párem vodičů (N a P), pracující s rozkmitem 350 mV a napěťovým offsetem 1,2 V. LVDS je určena pro vysokorychlostní aplikace s nízkou spotřebou. Charakteristická impedance vedení je 100 Ω . Schéma oscilátoru je na obr. 7.18.

Základní výhodou diferenciálních signálů je nezávislost na napájecím napětí zdroje (při použití kapacitní vazby), nízké vyzářování a vysoká odolnost proti vnějšímu rušení. Pojem diferenciální signál je ekvivalentní symetrickému signálu.



Obr. 7.18: Oscilátor EG2102CA

7.4 LED Driver

Jako vysílač optického spoje byl vybrán vysokorychlostní LED Driver MC10SX1130, který je zobrazen na obr. 7.19. Driver je určen do vysoce výkonných optických modulů. Funguje pro napájecí napětí +5 V pro aplikace PECL nebo -5,2 V pro ECL systémy, které se už dnes nepoužívají tak často. Vysílač převádí binární signál ve formě elektrického napětí na jinou formu energie (světlo) a posílá pomocí paprsku data v podobě 1 a 0 na optický přijímač. Diferenciální datové vstupy Din a /Din jsou propojeny s vývody FPGA. Výstupní proud na diodě se nastavuje na pinu R_{SET} rezistorem R32. Maximální výstupní proud 100 až 110 mA. Blokování napájecího napětí je pomocí kondenzátorů C70 a C71. Omezují vliv parazitních indukčností přívodních spojů vedoucích k součástkám.

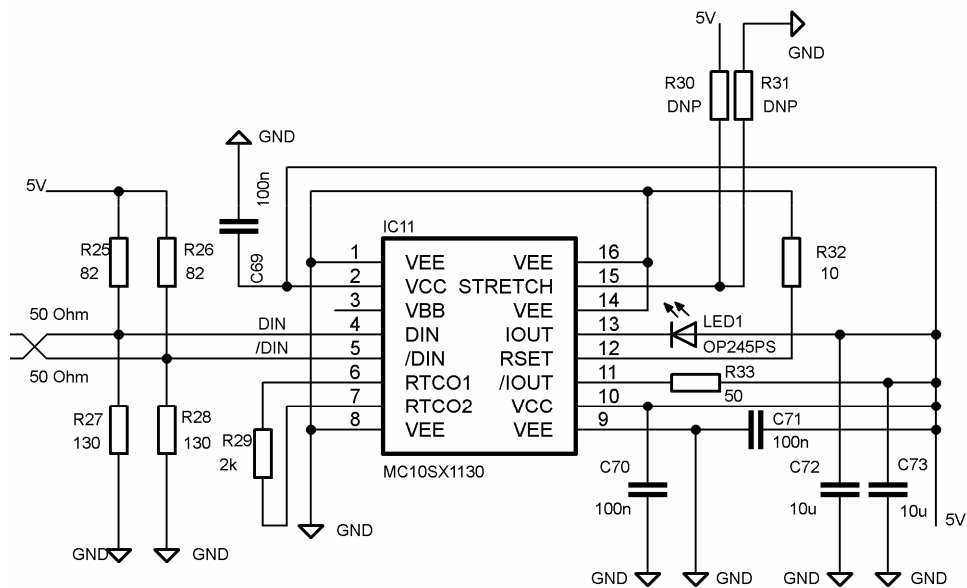
Při přenosu signálu prostorem se využívá digitální modulace OOK (ON-OFF klíčování), která je založena na principu vypnutí a zapnutí generovaného vysokofrekvenčního signálu. Digitální modulace OOK je principiálně shodná s analogovou amplitudovou modulací AM. U digitální modulace OOK je využito kódování typu NRZ (Non Return to Zero). Na výstupu vysílače je zapojena dioda LED s označením OP245PS.

7.4.1 LED dioda OP245PS

Tato dioda má velmi rychlou dobu spínání. Náběžná a sestupná hrana je 10 ns. Teoreticky dosažitelná přenosová rychlost dat diody je 100 Mb/s. Diody s rychlejší odezvou na trhu už bohužel nejsou nebo jsou těžko sehnatelné. Dioda pracuje v IR pásmu a její vlnová délka je rovna 850 nm. Nejnebezpečnější je vlnová délka 650 nm, proto se kladl důraz při výběru správně LED. Infra záření je lidským okem neviditelné a z hlediska bezpečnosti se používá tohoto pásma. Další vlastnosti diody jsou uvedeny v Tab. 7.2. Pokud by se vyskytly potíže s teplotní nestabilitou, může být dioda opatřena pasivním chladičem, ovšem u LED to bývá jen výjimečně.

Tab. 7.2: Parametry LED diody

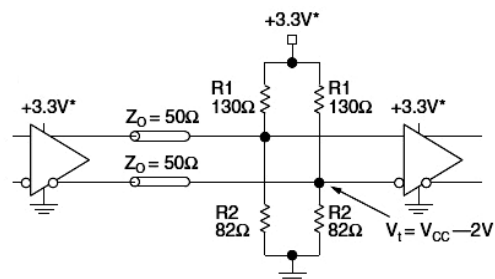
Propustný proud	50 mA
Vlnová délka	850 nm
Propustné napětí	1,2-1,7 V
Ztrátový výkon	100 mW
Teplotní rozsah	-40°C až +100°C



Obr. 7.19: LED Driver

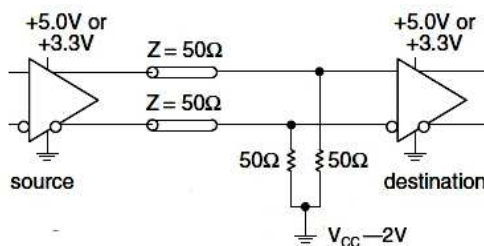
7.4.2 PECL

PECL je obvodová logika symetrické sběrnice s diferenciálním výstupem. Přenos informace po symetrické sběrnici se děje změnou polaroty napětí, která odpovídá logické hodnotě. PECL má stejnou koncepci jako LVPECL, ale nevyužívá napájecí napětí 3,3 V, ale většinou 5 V. Schémata zapojení terminálů jsou na obr. 7.20 a obr. 7.21. V návrhu zapojení je použita varianta a).

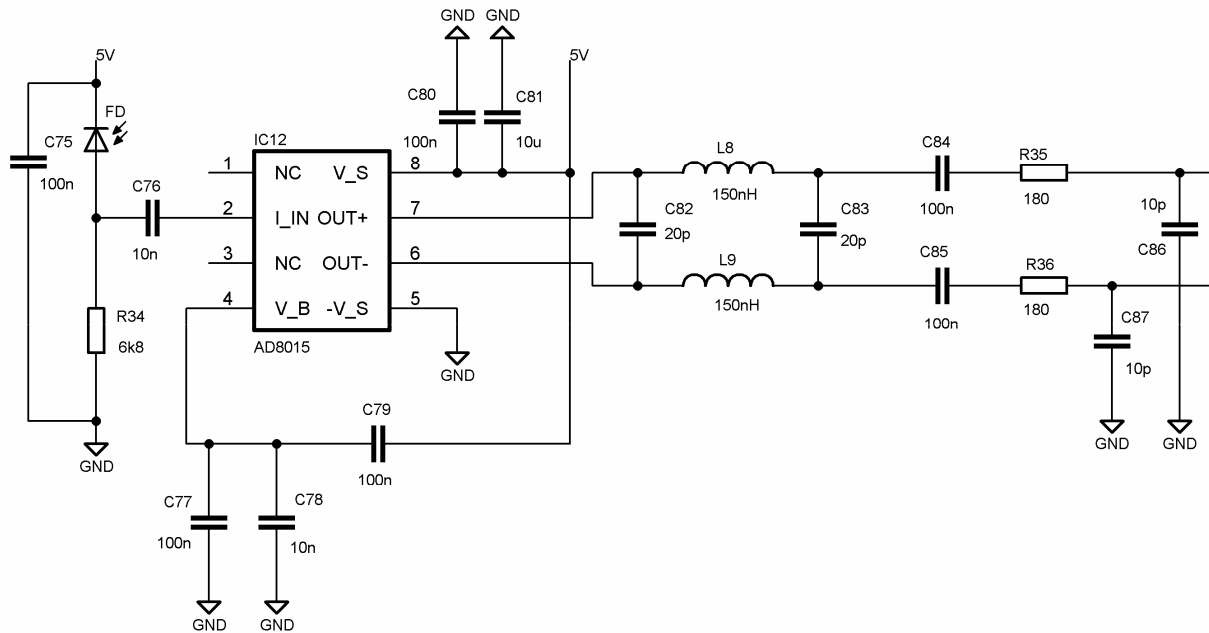


Obr. 7.20: a) Schéma zapojení terminálu PECL

Pro napájení 5 V se hodnoty rezistorů změňí ($R_1 = 82 \Omega$, $R_2 = 130 \Omega$).



Obr. 7.21: b) Schéma zapojení terminálu PECL



Obr. 7.23: Zapojení transimpedančního zesilovače s fotodiódou

7.5.2 Limitující zesilovač

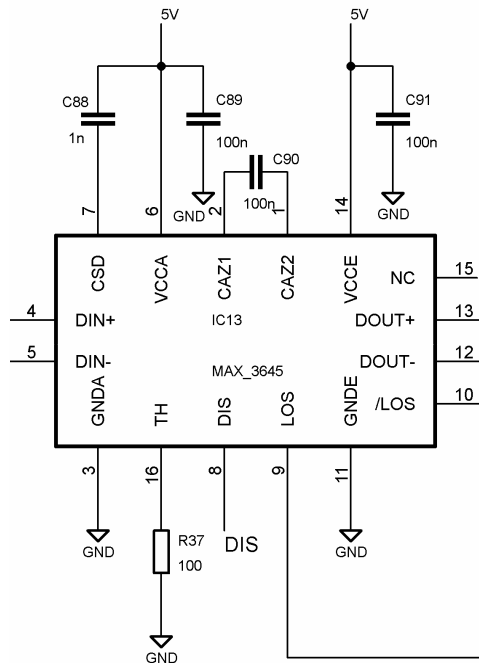
Aby nebyla na výstupu přijímače proměnlivá amplituda, musí se signál z transimpedančního zesilovače uvést do stabilní úrovně. Nesmí docházet ke kolísání amplitudy vzhledem k útlumu optické trasy, a proto se přidává do limiteru AGC (Automatic gain control) člen. Prakticky se jedná o operační zesilovač s proměnlivým ziskem, který je řízen vstupní nebo výstupní hladinou amplitudy zesilovaného napětí. Pro správný výběr limiteru se požadují tyto vlastnosti:

- Šířka přenosového pásma
- Zesílení a dynamika
- Vstupní napěťová citlivost

Pro optický spoj s datovou rychlostí 100 Mb/s mnoho limitujících zesilovačů dnes na trhu není. Pro tyto limity je tato datová rychlost v dnešní době minimem. Po srovnání všech dostupných zesilovačů, byl vybrán obvod MAX 3645, který je uveden na obr. 7.24.

Popis obvodu

Obvod je napájen typicky +5 V (3,3 V). Zesílení má až 74 dB při vstupním napětí na zem 0,1 mV, D_{IN+} a D_{IN-} při pinu TH = 100 Ω . Na pinu TH se nastavuje zesílení první úrovně, a tím také hladinu signálu, při které se indikuje tzv. LOS (Loss-of-Signal) ztráta vstupního signálu. Připojením kapacity mezi piny CAZ1 a CAZ2 se nastavuje frekvence horní propusti. Na výstupu je definované diferenciální napětí, které pomocí terminálu PECL (Theveninův ekvivalent) je propojeno na piny do FPGA obr. 7.20.



Obr. 7.24: Limitující zesilovač

7.5.3 Fotodioda

Při výběru fotodiody se kladl důraz zejména na rychlost odezvy, vlnovou délku a minimální výkon detekovaný fotodiódou. Pro tento návrh je vhodná fotodioda PIN s označením SFH 2030, která má tyto vlastnosti:

- vlnová délka: 850 nm
- doba odezvy: 5 ns
- závěrné napětí: $V_R = 50 \text{ V}$
- citlivost: $S_\lambda = 0,62 \text{ A/W}$ při 850 nm
- výkon ekvivalentní šumu: $NEP = 2,9 \cdot 10^{-14} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$
- kapacita při: $V_R = 0 \text{ V}$ 11 pF
- ztrátový výkon: 100 mW

Tyto fotodiody se zejména používají v optických přenosových systémech a průmyslové elektronice.

8 REALIZACE FSO

8.1 Návrh a výroba desek plošných spojů

Kompletní navržené schéma optického spoje, které se skládá ze tří modulů (interface, vysílač a přijímač), je uvedeno v příloze A. Interface je nejdůležitější blok, který je umístěn mezi PC a TX, RX. Po úspěšném a nelehkém návrhu optického spoje, se vytvořila v programu Eagle 5.6.0 předloha pro výrobu desek plošných spojů. Jelikož se jedná o duplexní spoj, muselo dojít k výrobě dvou totožných modulů. Hlavní deska (interface) je složena ze čtyř vrstev (TOP, GND, POWER a BOTTOM). PCB pro TX a RX se vyrobily jako dvouvrstvé. V příloze A jsou uvedeny ve správném pořadí všechny jednotlivé vrstvy. Rozměry interfacu jsou 96x83 mm. Pro TX a RX jsou 60x36 mm, které byly stanovené pro přesné uložení do optických hlavic. Kompletní seznam součástek pro jedno zařízení je uveden v příloze D. Interface s TX a RX jsou mezi sebou propojeny pomocí 6 a 10 vodičových plošných kabelů s konektory se zámkou. V příloze E jsou nafoceny různé pohledy na vyrobené PCB.

Značná pozornost se věnovala především návrhu desek plošných spojů. Uspořádání jednotlivých bloků, součástek a vodivých cest na PCB muselo být co nejefektivnější, aby plnilo správnou funkci, proto se kladl důraz na zásady správného návrhu. Například volit spoje co nejkratší, pokud možno vést diferenční signály po celou dobu spoje, dodržovat izolační mezery mezi spoji aj. Jelikož na PCB netečou velké proudy, je proto šířka signálových spojů volena 0,2 mm a izolační mezera také 0,2 mm. Pro spojení jednotlivých vrstev jsou použity prokvy s průměrem 0,3 mm. Napájecí cesty byly realizovány silnějšími spoji. Při nesprávném návrhu PCB nemusí zařízení splňovat očekávané parametry.

Výroba PCB se provedla u firmy Pragoboard s.r.o., která se specializuje na výrobu vícevrstevných plošných spojů.

Podle výrobců firmy Pragoboard je materiál PCB specifikován z:

- Materiálu FR4 1,5 mm o tloušťce mědi 18 μ m
- Fotocitlivé nepájivé masky
- Chemického zlacení
- Servisního potisku
- Elektrického testování

8.2 Způsob osazení a pájení SMD součástek na PCB

Při návrhu se kladl důraz, aby většina součástek byla navržena součástkovou řadou SMD. Je to profesionální způsob osazování, než je tomu u klasických, které zbytečně zabírají velké plochy. Převážná část pouzder byla navržena s velikostí 603. Součástky na PCB interface byly osazeny pomocí ručního manipulátoru z důvodu přesného a snadného umístění na pájecí plošky.

Jedna strana SMD součástek byla zapájena na profesionální stanici „hot plate“. Jelikož druhá strana stejným způsobem zapájet nešla, použil se způsob pomocí UV světla. Než došlo na osazování součástek na PCB, vytvořila se šablona na měděný plech o šířce 100 μm , pomocí které se mohla nanést olovnatá pájecí pasta na pájecí plošky. Šablona byla vyrobena pomocí speciálního zařízení (laseru).

Jelikož výroby PCB nebyly nikterak levné, bylo výhodné, aby SMD součástky (hlavně IO) byly zapájené profesionálním způsobem. Zprvu se tato varianta zdála docela snadná, ale nastaly i komplikace např. s obvodem FPGA, kde docházelo ke zkratům z důvodu relativně blízkých vývodů IO. Nakonec se vše podařilo. Veškeré konektory a zbytek diskretních součástek byly zapájené ručním způsobem. U PCB TX a RX se vše dělalo ručním způsobem z důvodu menšího počtu součástek.

8.3 Konfigurace FPGA

Obvod FPGA se konfiguroval pomocí vývojového programu XILINX ISE 14.4. Než došlo k samotné implementaci celého softwaru, bylo zapotřebí znát, jak celý způsob přenosu dat v bezkabelových komunikacích fungují. Na obr. 8.2 a obr. 8.3 je znázorněn přenos kódovaných dat v obvodu FPGA pro vysílač i přijímač. Obvod FPGA pro TX a RX je v tomto případě tvořen následujícími bloky:

TX:

- **Aligner + Framer** – detekuje rámec na rozhraní MII a provádí jeho uložení do paměti FIFO. Data jsou ukládána po osmi bitech (Bytech), začátek a konec rámce je v paměti FIFO označen, aby blok Streamer mohl číst data z paměti zcela nezávisle. Během příjmu rámce je z něj odstraněna preamble (neukládá se do FIFO).
- **FIFO paměť** – slouží primárně k přechodu mezi hodinovými doménami: MII_RXC (signál z čipu PHY, $f = 25 \text{ MHz}$) a hodinovým signálem pro vysílání dat na FSO (125 MHz, odvozen z hodinového signálu MII_RXC). Zároveň slouží jako malá vyrovnávací paměť.
- **Streamer** – zajišťuje čtení dat z paměti FIFO (vždy celý rámec najednou). Data jsou opatřena vlastní preambulí a speciálními symboly pro označení začátku a konce rámce na lince FSO. Pokud jsou v paměti data, jsou tato předávána kodéru 8b/10b, jinak je kodéru předáván speciální znak (K28.5), který slouží jako synchronizační mezirámcová výplň.
- **Kodér 8b/10b** – jde o standardní kodér, který provádí kódování signálu zajišťující dostatečnou hustotu hran, nulovou stejnosměrnou složku a přenos řídicích symbolů (preamble, začátek a konec rámce a mezirámcová výplň).
- **Serializer** – provádí konverzi paralelního datového toku (platných 10 bitů každých 80 ns) na sériový (platný 1 bit každých 8 ns).

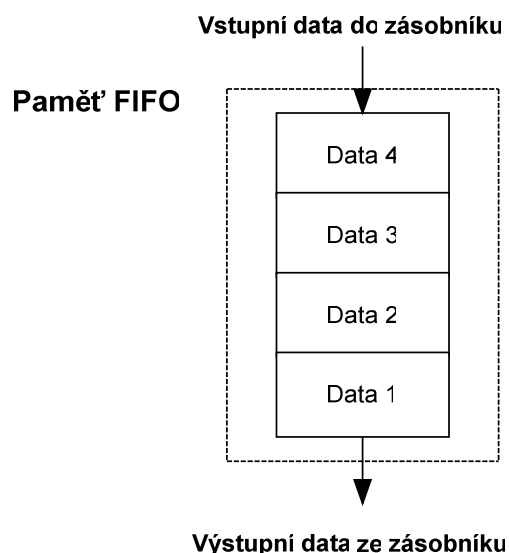
RX:

- **CDR** – Clock and Data Recovery – provádí obnovu symbolové synchronizace, v tomto případě bez obnovy hodinového signálu (algoritmus uvedený v [32]). Zároveň blok provádí deserializaci přijímaného datového signálu a předává následujícímu bloku data jako vektor 10 bitů.
-

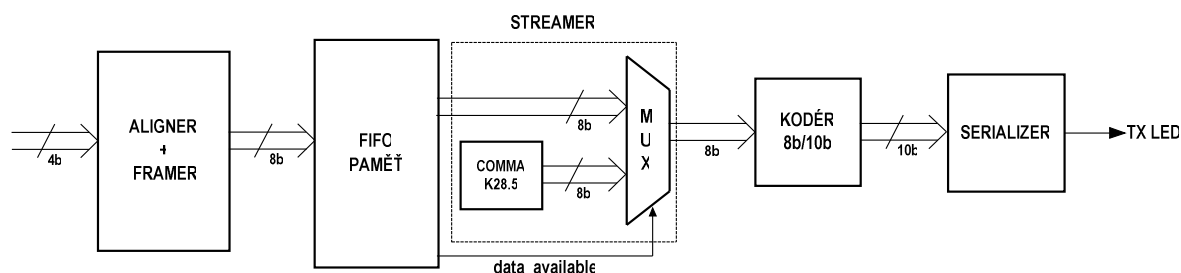
- **Dekodér 10b/8b** – provádí dekódování přijímaného datového toku. Před vlastním dekódováním je nutné nalézt v přijímaném datovém toku rozhraní datových slov, k čemuž se používá mezirámcová výplň složená z k tomu určených znaků K28.5. Po nalezení rozhraní symbolů je kontinuálně prováděno dekódování symbolů algoritmem 8B/10B.
- **Framer + Checker** – přijímá data z dekodéru 8b/10b. Pokud je detekována preambule a následně znak začátku rámce, uloží celý rámec do paměti FIFO. Pokud je rámec v pořádku, označí jej posledním zapsaným symbolem jako korektní, jinak jej označí jako chybný. Chybné rámce je možné následně během přenosu na MII rozhraní zneplatnit speciálním signálem, nicméně použití obvod PHY nemá tuto funkci implementovanou a proto se tato možnost momentálně nevyužívá.
- **FIFO paměť** – Primárně slouží jako rozhraní mezi hodinovou doménou FSO přijímače (pracovní kmitočet 156,25 MHz potřebný pro správnou funkci bloku CDR) a hodinovou doménou MII rozhraní PHY (MII_TXC o kmitočtu 25 MHz).
- **MI interface** – pokud jsou dostupná data v paměti FIFO, provede vyčtení vždy celého rámce najednou. Během čtení je prováděna konverze z 8 bitových slov na 4 bitová slova potřebná pro rozhraní MII.
- **DCM** – digital clock manager – slouží ke generování hodinových signálů potřebných pro korektní funkci bloku CDR. Jde o dvojici hodinových signálů o kmitočtu $5/4 \cdot 125 \text{ MHz} = 156,25 \text{ MHz}$, které jsou vzájemně fázově posunuty o 90° a umožňují provádět efektivně pětinasobné převzorkování přijímaného datového signálu [32].

Data, která přicházejí na vstup bloku Aligner + Framer jsou 4 bitová, z kterých se na výstupu vytvoří data 8 bitová, která putují do paměti FIFO (First In First Out). Princip paměti je naznačen na obr. 8.1. Uložená data do zásobníku jako první, budou jako první ze zásobníku vybrána. Ze zakódovaných dat 8b/10b se pomocí Serializéru vytvoří z paralelních dat, data sériová, které se přenáší v podobě 1 na 0 z vysílací na přijímací stranu. Veškeré tyto způsoby kódování jsou nutné z důvodu synchronizace mezi transceivery, a také aby nedocházelo k výskytu stejnosměrné složky. V případě nevysílání dat musejí být oba systémy stále správně zesynchronizovány, a kvůli tomu vysílač vysílá klidové stavy (idle sequenci), které se objevují i při samotném přenosu dat. Podobný proces bylo nutné nakonfigurovat na přijímací stranu.

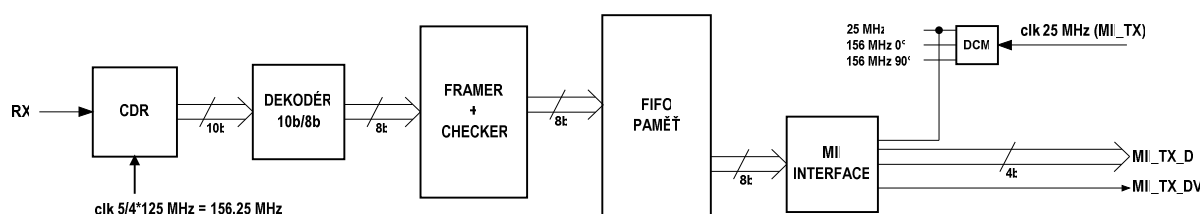
Kromě vysílací a přijímací části je v FPGA implementován procesor PicoBlaze, který byl použit pro odladění designu a konfiguraci obvodu PHY prostřednictvím rozhraní SMI (Serial Management Interface), což je mutace protokolu I2C. Procesor umožňuje zobrazovat základní data o přenosové lince na konzoli terminálu díky rozhraní UART, které je realizováno převodníkem FT232R.



Obr. 8.1: Princip paměti FIFO



Obr. 8.2: Vnitřní struktura přenosu dat v obvodu FPGA na vysílací stranu



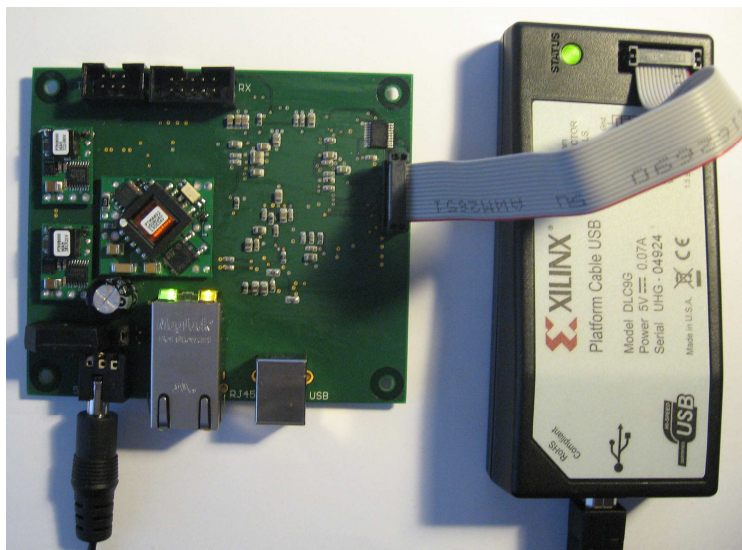
Obr. 8.3: Vnitřní struktura přenosu dat v obvodu FPGA na přijímací stranu

Implementovaný design zabírá včetně řídicího procesoru zabírá jen malou část použitého obvodu FPGA, ve kterém tak zbývá prostor pro implementaci dalších funkcí, jako je například zabezpečovací kódování (FEC; Forward Error Correction). Kompletní design byl implementován do obvodu FPGA a poté se ověřila jeho funkčnost přímým propojením desek (bez optické hlavičky).

- Počet klopných obvodů (Slice Registers) 629 (5 %)
- Počet tabulek LUT (Slice LUTs) 716 (12 %)
- Počet blokových pamětí RAM (Block RAM/FIFO) 3 (9 %)
- Počet globálních bufferů (BUFG/BUFGCTRLs) 9 (56 %)
- Počet obvodů pro úpravu hodinových signálů (PLL_ADVs) 2 (100 %)

8.4 Oživení a ověření zařízení

Funkčnost obvodu FPGA se ověřila nejdříve jednoduchým způsobem, a to rozblikáním LED diod na konektoru RJ45, který je vidět na obr. 8.4. Pomocí nástroje Platform Cable USB se implementoval nakonfigurovaný program do FPGA přes JTAG konektor. Pouze propojením zařízení UTP kabelem s PC, se ověřila v programu Wireshark komunikace vysílaných a přijímaných paketů. Komunikace mezi obvodem FPGA a PC se ověřila pomocí rozhraní UART v programu Terminal. Kompletní moduly jsou připravené k použití. Nejdříve se moduly musí uchytit do optických hlavice, a poté správným způsobem nasměrovat vysílací a přijímací stranu.



Obr. 8.4: Ověření funkčnosti obvodu FPGA

ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem se zabýval popisem, návrhem a konstrukcí optického bezkabelového spoje. V teoretické části práce jsem důkladně popsal problematiku optických bezkabelových spojů, jejich složení, parametry a také fyzikální podstatu světla. Tyto spoje zajišťují datový přenos mezi přijímací a vysílací stanicí pomocí světelných paprsků, které procházejí volnou atmosférou. V práci došlo také ke srovnání zdrojů světelných záření, a po zhodnocení všech faktů jsem zvolil variantu řešení. Atmosférické jevy jsou důležitou součástí FSO a jsou podrobně rozebrány v kapitole 4. FSO spoje zahrnuje i energetická bilance spoje, která se zabývá informacemi o veškerých útlumech a je nezbytnou součástí každého takového spoje pro určení např. maximální a minimální délky spoje, ovšem u které je třeba znát meteorologické vlivy v dané oblasti.

V praktické části jsem značnou pozornost věnoval návrhu schéma a následně desek plošných spojů vysokorychlostního optického spoje, které byly zhotoveny pomocí programu Eagle 5.6 pro celou sestavu (interface, vysílač a přijímač). Samotný návrh se skládá z jednotlivých částí, které jsou popsány v kapitole 6. Úplné schéma optického spoje je navrženo pro komunikaci v duplexním režimu tzn., že v jednom okamžiku lze přijímat i vysílat data. Každá strana linky se skládá z totožných modulů. Vysílač je realizován pomocí vysokorychlostního LED Driveru, u kterého je použita dioda LED s velmi rychlou dobou odezvy (10ns). Přijímací strana je složena z transimpedančního i limitujícího zesilovače a rychlé fotodiody PIN, díky které optický signál procházející atmosférou je přeměněn na elektrický.

Konfiguraci obvodu FPGA jsem realizoval v programu XILINX ISE Design Suite 14.4. Na konfiguraci obvodu se značnou částí podílel vedoucí práce, jelikož některé úseky programu již měl připravené k použití a nebylo třeba je přepracovávat. Funkčnost zařízení byla ověřena přímým propojením vysílací a přijímací částí bez optické hlavičky. Přenosová rychlost spoje by měla být okolo 100 Mb/s dosahem cca 100 m. Na tuto vzdálenost optický paprsek u LD i LED diod bývá značně rozptýlen, a proto je nutné použít dostupných optických čoček, které jsou umístěny v optické hlavičce. Pro získání nerozblhávajícího paprsku se umísťují před zdroje záření kolimační čočky, které sloučí světlo do souvislého paprsku.

Oba vyrobené moduly (Interface, TX a RX) jsou plně funkční a jsou připravené na umístění do hlavic optického spoje. Kompletní návrh FSO spoje s realizací elektronické a optické části i se správným nakonfigurováním obvodu (FPGA) je těžko zvládnutelné, a konstruktér by měl mít dostatek zkušeností jak v samotné elektronice, tak i optice a jiných oblastech. Jelikož jsem se v práci zabýval především elektronickou částí spoje, tak ke kompletní realizaci (tzn. umístění zhotovených desek do optických hlavic a ověření parametrů) z časových důvodů (termíny dodání některých součástek) bohužel nedošlo, i když to by překračovalo náplň mé práce. Při návrhu spoje jsem využíval především katalogových listů, literaturu a konzultace u vedoucího práce, který mně dal mnoho odborných rad. Vyrobené zařízení by se mohlo rovnat s komerčními dostupnými produkty např. Elspeedy 100-200 RTX s přenosovou rychlostí 100 Mb/s a dosahem 200-400 m, LightPointe AireLite 100 Laser Link s dosahem 500 m a přenosovou rychlostí 100Mb/s nebo i s velmi dobře známou stavebnicí Ronja, která v dnešní době už zaostává zejména přenosovou rychlostí.

LITERATURA

- [1] PUŽMANOVÁ, R. Optika bez drátů [online]. 2010 – [cit. 2012-1-12]. Dostupné na [www: <http://archiv.cesnet.cz/sdruzeni/napsali-o-nas/2010/06/201006_ETM.html >](http://archiv.cesnet.cz/sdruzeni/napsali-o-nas/2010/06/201006_ETM.html)
- [2] NĚMEC, D. *Bezdrátový optický přenos*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav telekomunikací. 2012, 64 s.
- [3] PUŽMANOVÁ, R. Bezdrátové optické sítě [online]. 2003 – [cit. 2012-2-12]. Dostupné na [www: <http://www.lupa.cz/clanky/bezdratove-opticke-site/>](http://www.lupa.cz/clanky/bezdratove-opticke-site/)
- [4] HORÁK, J. *Optické pojítko*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav telekomunikací. Brno, 2009, 93 s.
- [5] WILFERT, O. *Fotonika a optické komunikace*. 1. vydání Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav radioelekt. 2007, 128 s. ISBN 8021435372.
- [6] WILFERT, O. *Kvantová a laserová elektronika* 1. vydání Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav radioelekt. 2012, 142 s. ISBN 8021435372.
- [7] CHOBOT, L. *Bezdrátový přenos informace pomocí optických modulů*. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011, 111 s.
- [8] KOLKA, Z. *Počítačové a komunikační sítě*. Přednášky, Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav radioelekt., 2012
- [9] WILFERT, O. *Optoelektronika*. Elektronické skriptum, Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav radioelekt., Brno, 2004, 150 s.
- [10] WILFERT, O. *Nové metody optických komunikací ve volném prostoru*, Brno, 2006. Dostupné na [www:<http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf>](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf)
- [11] Optoelektronické prvky. Internetový článek [online]. [cit. 2012-3-12]. Dostupné na [www:<http://home.zcu.cz/~houlec/www/htm/PN.htm>](http://home.zcu.cz/~houlec/www/htm/PN.htm)
- [12] Učební texty pro výuku předmětu mikroelektronické systémy. Internetový článek [online]. [cit. 2012-3-12]. Dostupné na [www:< http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Tonhauser/opto.html>](http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Tonhauser/opto.html)
- [13] ŠPORÍK, J. *Bezdrátový optický spoj v sítích lan a man*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav telekomunikací. 2009, 80 s.
- [14] KREJČÍ, R., HULICIUS E. *Polovodičové lasery a LED-ky*. Internetový časopis [online]. 2007 - [cit. 2012-3-12]. Dostupné na [www:<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>](http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html).
- [15] LUKÁŠ, M. Laserové diody. Internetový časopis [online]. 2001 – [cit. 2012-04-12]. Dostupné na [www:<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>](http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html)
- [16] KULHAVÝ, K. Bezláknová optika 2 [online]. 2002 – [cit. 2013-18-5] Dostupné na [www:< http://www.root.cz/clanky/bezvlaknova-optika-2/>](http://www.root.cz/clanky/bezvlaknova-optika-2/)
- [17] VACULÍN, T. Optický bezdrátový spoj v atmosférickém přenosovém prostředí. Internetový časopis [online]. 2003 - [cit. 2012-5-12]. Dostupné [www:<http://www.elektrorevue.cz/clanky/03014/index.html>](http://www.elektrorevue.cz/clanky/03014/index.html)
- [18] MICREL. KSZ8051MLL [online]. 2010 – [cit. 2012-12-13]. Dostupné na [www:<http://www.farnell.com/datasheets/1508786.pdf>](http://www.farnell.com/datasheets/1508786.pdf)
- [19] UNIS COMPUTERS . Networking & communications. FSO – popis technologie [online]. [cit. 2013-14-5]. Dostupné na [www:<http://www.uniscomp.cz/t/fso-popis-technologie/1089.?lang=cs>](http://www.uniscomp.cz/t/fso-popis-technologie/1089.?lang=cs)

- [20] DORDOVÁ, L. *Metoda stanovení charakteristik atmosférického přenosového prostředí v optické oblasti spektra*. Dizertační práce. Brno: FEKT VUT, 2009.
- [21] SVAČINA, J. *Speciální elektronické součástky a její aplikace*. Učební elektronické texty. Brno: FEKT VUT v Brně 2004.
- [22] PETERKA, J. Bájecný svět počítačových sítí - Stomegabytový ethernet [online]. 2011 - [cit. 2013-11-5] Dostupné na [www:<http://www.earchiv.cz/b07/b0100001.php3>](http://www.earchiv.cz/b07/b0100001.php3)
- [23] Communication. Fiber Optics Without Fiber [online]. 2001 – [cit. 2013-11-5]. Dostupné na [www:<http://www.mems.ece.ufl.edu/courses/spring2003/wireless.pdf>](http://www.mems.ece.ufl.edu/courses/spring2003/wireless.pdf)
- [24] Elektromagnetické vlny, mikrovlnná technika [online]. 2010 – [cit. 2013-2-5]. Dostupné na [www:<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=rayleighova_vz_dalenost&bck=6-1-A>](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=rayleighova_vz_dalenost&bck=6-1-A)
- [25] AIRLINX Communications. FSO topologies [online]. [cit. 2013-8-4]. Dostupné na [www:<http://www.airlinx.com/index.cfm/id/57-68.htm>](http://www.airlinx.com/index.cfm/id/57-68.htm)
- [26] Atmosférické optické spoje [online]. [cit. 2013-2-5]. Dostupné na [www:<http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/studium/doc/dre2/optika.pdf>](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/studium/doc/dre2/optika.pdf)
- [27] VITÁSEK, J. Atmosférické přenosové prostředí [online]. 2011 [cit. 2013 - 14 -5]. Dostupné na [www:<http://kat440.vsb.cz/optice/images/stories/freeaccess/vit0028/OAK/NC3_APP.pdf>](http://kat440.vsb.cz/optice/images/stories/freeaccess/vit0028/OAK/NC3_APP.pdf)
- [28] SALEH, B. E. A. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-00-6
- [29] VRBOVÁ, M. JELÍNKOVÁ, H , GAVRILOV, P. Detektory optického záření [online]. 1994 – [cit. 2013-14-5]. Dostupné na [www:<http://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/>](http://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/)
- [30] ELEKTRONIKA ZA OKAMŽIK [online]. [cit. 2013-4-4]. Dostupné na [www:<http://www.edunet.souepl.cz/EZO/index.htm>](http://www.edunet.souepl.cz/EZO/index.htm)
- [31] VITÁSEK, J. Energetická bilance FSO spoje [online]. 2011 – [cit. 2013-14-5]. Dostupné na [www:<http://kat440.vsb.cz/optice/images/stories/freeaccess/vit0028/OAK/NC3_energ_bil.pdf>](http://kat440.vsb.cz/optice/images/stories/freeaccess/vit0028/OAK/NC3_energ_bil.pdf)
- [32] KUBÍČEK, M.; KOLKA, Z. Blind Oversampling Data Recovery with Low Hardware Complexity. Radioengineering; IF 0. 312, 2010, roč. 2010, č. 1, s. 74-78. ISSN: 1210- 2512.
- [33] XILINX. Spartan-6 FPGA Configuration [online]. 2010 – [cit. 2013-11-5]. Dostupné na [www:<http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug380.pdf>](http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug380.pdf)

SEZNAM SYMBOLŮ

A_u	Napětové zesílení
A_{FD}	Aktivní plocha fotodiody
b_c	Celkový počet přenesených bitů
b_{Ch}	Celkový počet chybně přenesených bitů
B_m	Šířka pásma přenosu optického přijímače
c	Rychlost světla
C	Kapacita fotodiody
C_n^2	Strukturní parametr indexu lomu
D_{VOS}	Průměr vysílací optické soustavy
D_{POS}	Průměr přijímací optické soustavy
\dot{E}	Komplexní amplituda
$E_{fn, fp}$	Energie kvazihladin
E_g	Šířka zakázaného pásu
Erf	Error fiction (chybová funkce)
f_{fluct}	Frekvence fluktuací
f_u	Frekvence úniků
f_0	Mezní frekvence
G_{FD}	Vnitřní zesílení
I	Intrinsická vrstva, optická intenzita
I_0	Optická intenzita na ose šíření
k	Vlnové číslo
L_0	Pomocná délka
L_{12}	Délka spoje
L_{VP}	Vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
M	Dynamická rezerva linky
n	Index lomu
n_Z	Frekvence optického záření
P	Výkon optické vlny
P_{FD}	Optický výkon na fotodiodě
P_{LD}	Výkon laserové diody
P_{max}	Úroveň přijímaného výkonu
P_{min}	Minimální detekovatelný výkon fotodiody

$P_{m,RXA}$	Střední výkon přijatý vstupní aperturou přijímače
$P_{m,TXA}$	Střední výkon vyzářený výstupní aperturou vysílače
P_0	Citlivost přijímače
\dot{q}	Komplexní parametr svazku
t	Čas
S	Plocha PN přechodu
S_{DV}	Plocha dostupného výkonu
S_I	Proudová citlivost fotodiody
S_0	Plocha dostupného výkonu neovlivněná atm. turbulencemi
S_U	Napěťová citlivost
U_{PZ}	Napětí na výstupu přijímače
v	Rychlost šíření záření v daném prostředí
v_T	Rychlost nositelů náboje
w	Pološířka svazku, tloušťka vrstvy I
z_0	Rayleighova vzdálenost

α	Střední koeficient extinkce
α_{abs}	Člen odpovídající absorpci na molekulách
α_{atm}	Útlum atmosféry
α_e	Koeficient extinkce
α_{fluk}	Člen odpovídající střednímu zeslabení intenzity vlivem fluktuací
α_{IF}	útlum na interferenčním filtru
α_{part}	útlum atmosférickými částicemi
α_{POS}	Útlum přijímací optické soustavy
α_r	Parametr dimenze
$\alpha_{LD, VOS}$	Vysílací optická soustava- laserová dioda
$\alpha_{r,m}$	Člen odpovídající rozptylu na molekulách
$\alpha_{r,\epsilon}$	Člen odpovídající rozptylu na částicích
α_{VP}	Útlum šířením
α_{VOS}	Útlum vysílací optické soustavy
α_{turb}	útlum větrných turbulencí
$\alpha_{FD, VOS}$	Přijímací optická soustava-fotodioda
α_z	Útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje
$\alpha_{1,APP}$	Koeficient útlumu
γ_{POS}	Zesílení přijímací optické soustavy
γ_{tot}	Celkový zisk
φ_{VS}	Úhlová šířka vysílaného svazku
Δ_{fluk}	Dynamika fluktuací
Δt_i	Časové intervaly
Δu	Hloubka úniků
ϵ	Permitivita prostředí
ρ	Radiální vzdálenost
ρ_{atm}	Rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí
τ	Časová konstanta
v_T	Rychlost nositelů náboje

SEZNAM ZKRATEK

AGC	Automatic Gain Control
AM	Amplitudová modulace
APD	Avalanche Photo Diode;
APP	Atmosférické přenosové prostředí
ASK	Amplitude Shift Keying
BER	Bit Error Rate
CMI	Coded Mark Inversion
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
FD	Fotodioda
FM	Frekvenční modulace
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSO	Free Space optics
FTDI	Future Technology Devices International
GMII	Gigabit Media Independent Interface
HAP	High Altitude Platform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IM	Intenzitní modulace
IO	Integrovaný obvod
IR	Infračervené záření
JTAG	Joint Test Actoin Group
NEP	Ekvivalentní šumový výkon
LAN	Local Area Network
LD	Laserová dioda
LDVS	Low - Voltage Differential Signaling
LED	Luminiscenční dioda
LOS	Loss Of Signal (ztrátový vstupní signál)
LVPECL	Low - Voltage Positive Referenced Emitter - Coupled Logic
LVTTL	Low - Voltage Transistor-Transistor Logic
MAC	Media Access Control
MII	Media Independent Interface
MLT-3	Multi Level Transmit

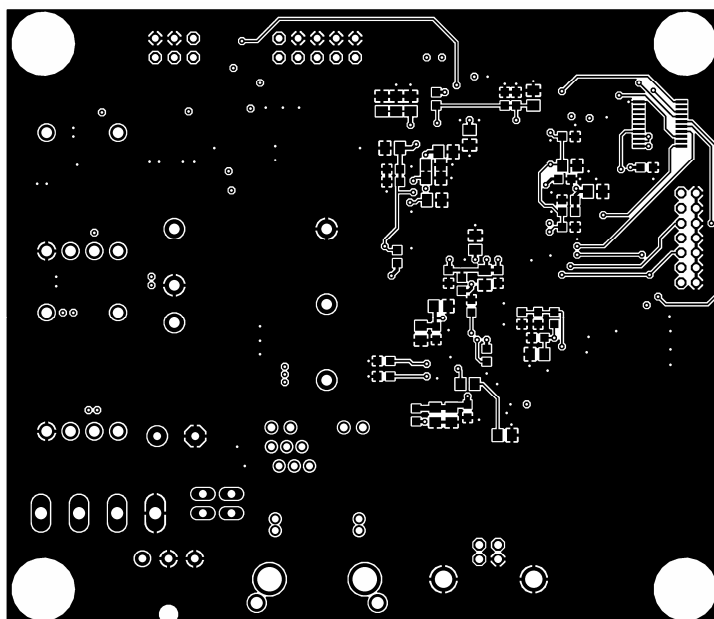
NEP	Noise Equivalent Power
NRZ	Non Return To Zero
OLED	Organic Light-Emitting Diode
OOK	On-off keying (klíčování)
OSI	Open Systems Interconnection
PCB	Printed Circuit Board (deska plošného spoje)
PECL	Positive emitter - coupled logic
PHY	Physical Protocol Sublayer, fyzická podvrstva
PMD	Physical Medium Dependent Sublayer
PN	Polovodičový přechod
POE	Power Over Ethernet
POS	Přijímací optická soustava
PROM	Programmable Read Only Memory
PS	Přijímací systém
PTP	point to point
PZ	Předzesilovač
RGMII	Reduced Gigabit Media Independent Interface
RXCLK	Hodinový kmitočet přijímače
RX	Přijímač
RZ	Return to Zero
SGMII	Serial Gigabit Media Independent Interface
SMT	Surface Mount Technology
SNR	Poměr signálu k šumu
TAP	Test Access Port
TCK	Test Clock Input
TDI	Test Data Input
TDO	Test Data Output
TIA	Transimpedance Amplifier, transimpedanční zesilovač
TMS	Test Mode Select Input
TRST	Test Asynchronous Reset Input
TTL	Transistor Transistor Logic
TX	Vysílač
TXCLK	Hodinový kmitočet vysílače
TXER	Transmit Error
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

USB	Universal Serial Bus
UV	Ultra fialové záření
VIS	Viditelné záření
VOS	Vysílací optická stanice
VS	Vysílací systém
Wi-Fi	Bezdrátová síť v počítačových sítích
WLAN	Wireless Local Area Network
4b/5b	Kódování 4bity/5bity signálu
8b/10b	Kódování 8bity/10bity signálu

SEZNAM PŘÍLOH

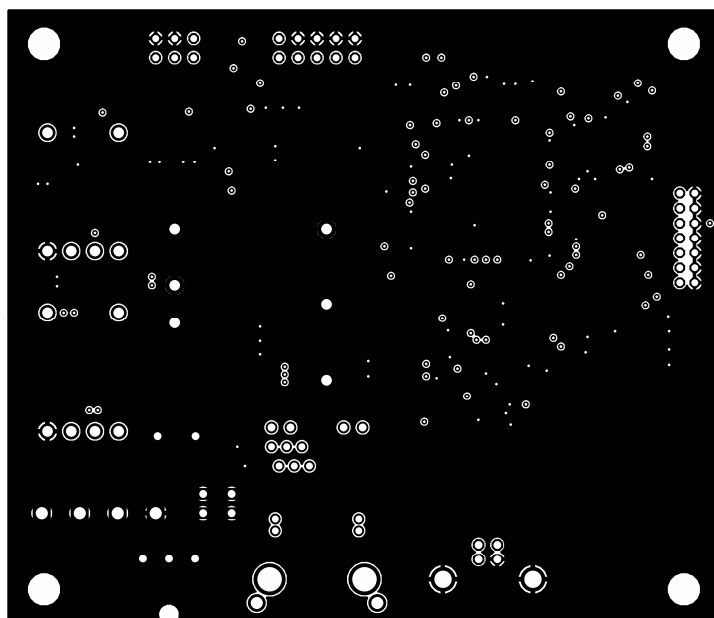
A	INTERFACE	71
A.1	Obvodové zapojení.....	71
A.2	Deska plošného spoje – vrstva TOP.....	72
A.3	Deska plošného spoje – vrstva GND.....	72
A.4	Deska plošného spoje – vrstva POWER	73
A.5	Deska plošného spoje – vrstva BOTTOM	73
A.6	Osazovací výkres – pohled seshora.....	74
A.7	Osazovací výkres – pohled zespodu.....	75
B	VYSÍLAČ TX	76
B.1	Obvodové zapojení.....	76
B.2	Deska plošného spoje – vrstva TOP.....	77
B.3	Deska plošného spoje – vrstva BOTTOM	77
B.4	Osazovací výkres – pohled seshora.....	78
B.5	Osazovací výkres – pohled zespodu.....	78
C	PŘIJÍMAČ RX	79
C.1	Obvodové zapojení.....	79
C.2	Deska plošného spoje – vrstva TOP.....	80
C.3	Deska plošného spoje – vrstva BOTTOM	80
C.4	Osazovací výkres – pohled seshora.....	81
C.5	Osazovací výkres – pohled zespodu.....	81
D	SEZNAM SOUČÁSTEK	82
E	FOTODOKUMENTACE	84

A.2 Deska plošného spoje – vrstva TOP



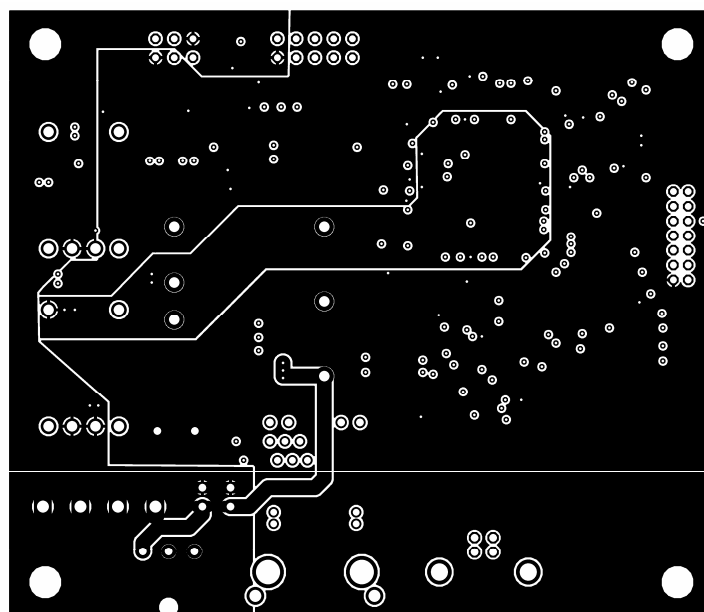
Rozměr desky 96x83 [mm], měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje – vrstva GND



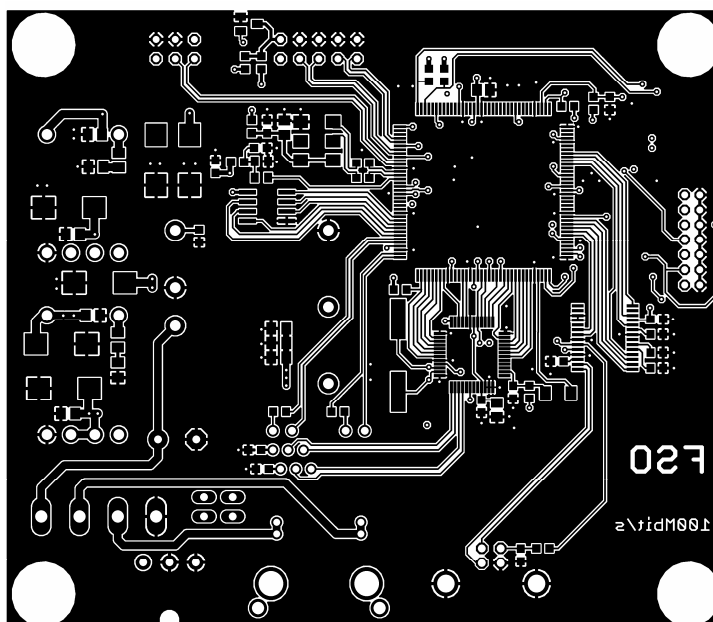
Rozměr desky 96x83 [mm], měřítko M1:1

A.4 Deska plošného spoje – vrstva POWER



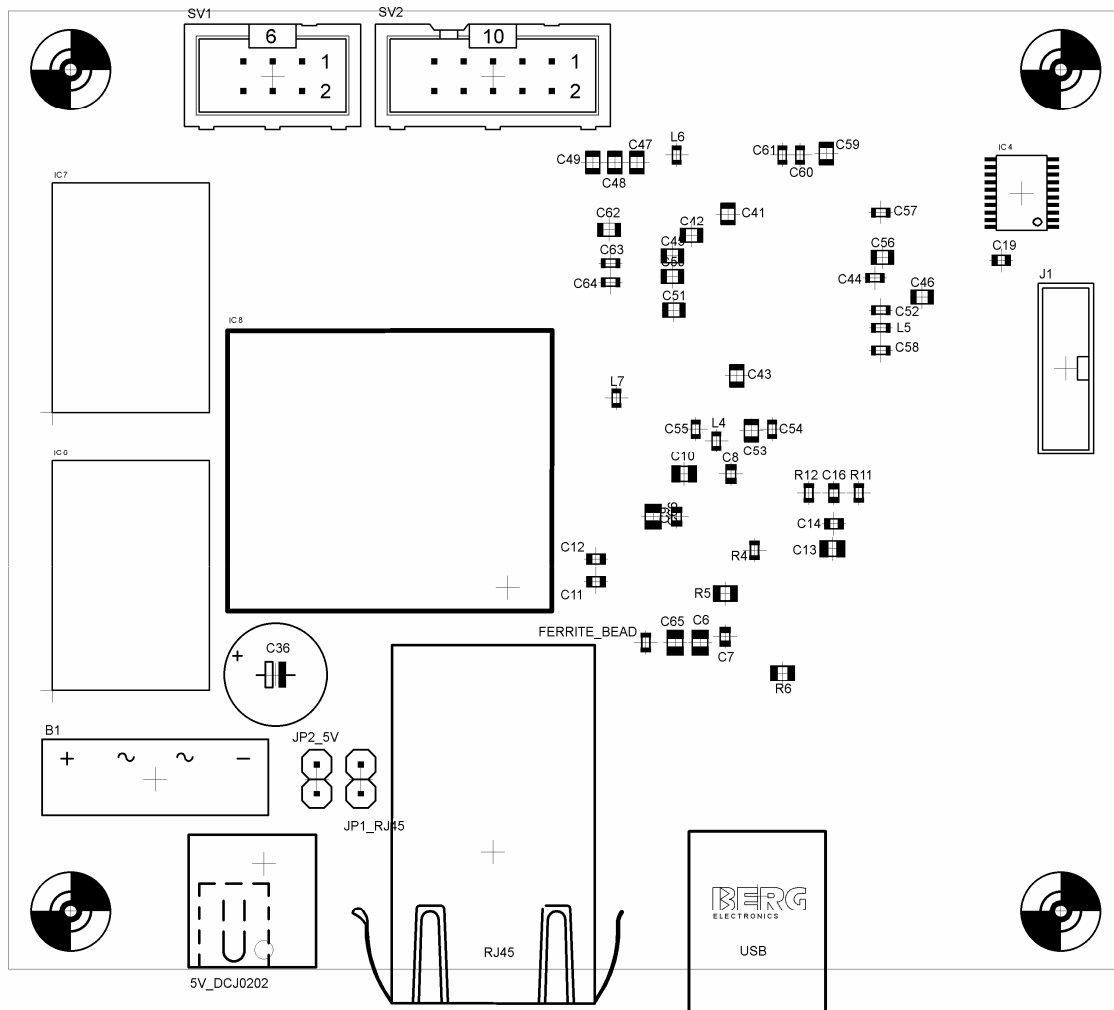
Rozměr desky 96x83 [mm], měřítko M1:1

A.5 Deska plošného spoje – vrstva BOTTOM



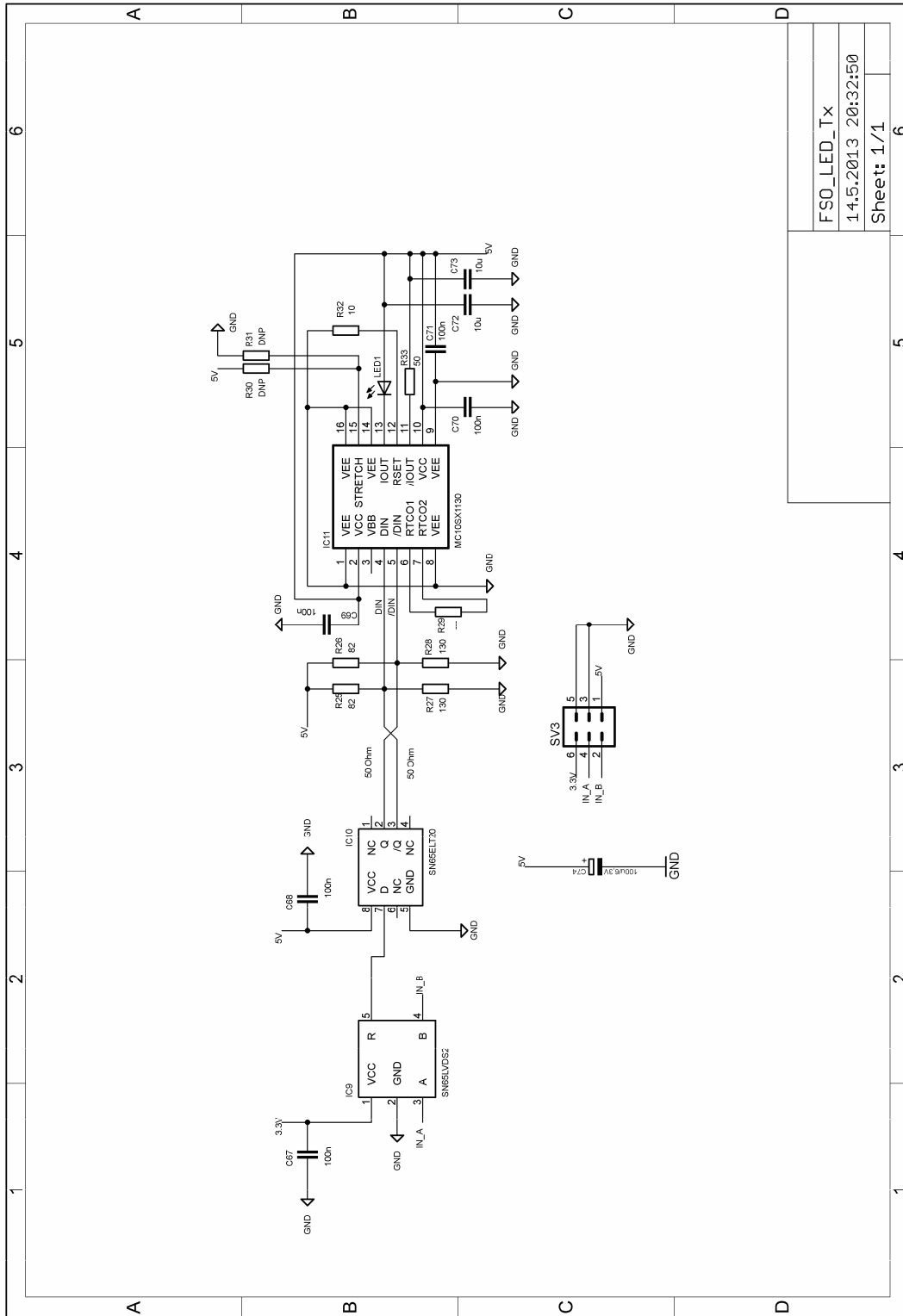
Rozměr desky 96x83 [mm], měřítko M1:1

A.6 Osazovací výkres – pohled shora



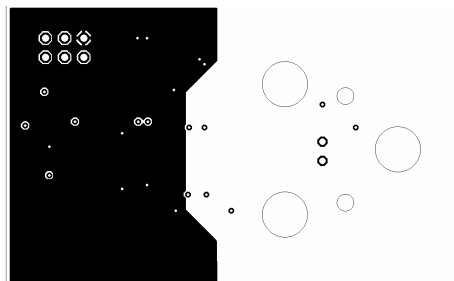
B VYSÍLAČ TX

B.1 Obvodové zapojení



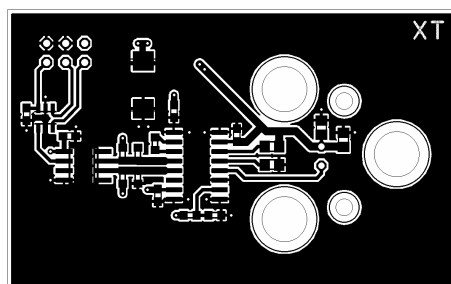
FS0_LED_TX
14.5.2013 20:32:50
Sheet: 1/1

B.2 Deska plošného spoje – vrstva TOP



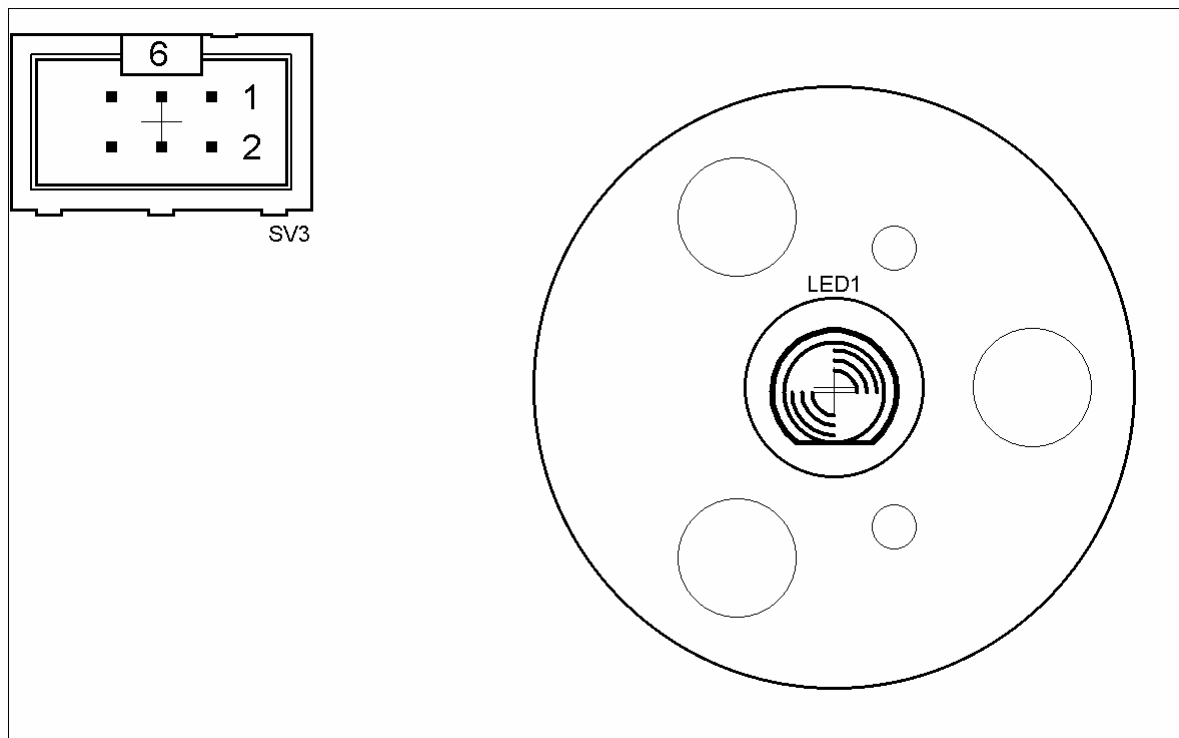
Rozměr desky 60x36 [mm], měřítko M1:1

B.3 Deska plošného spoje – vrstva BOTTOM

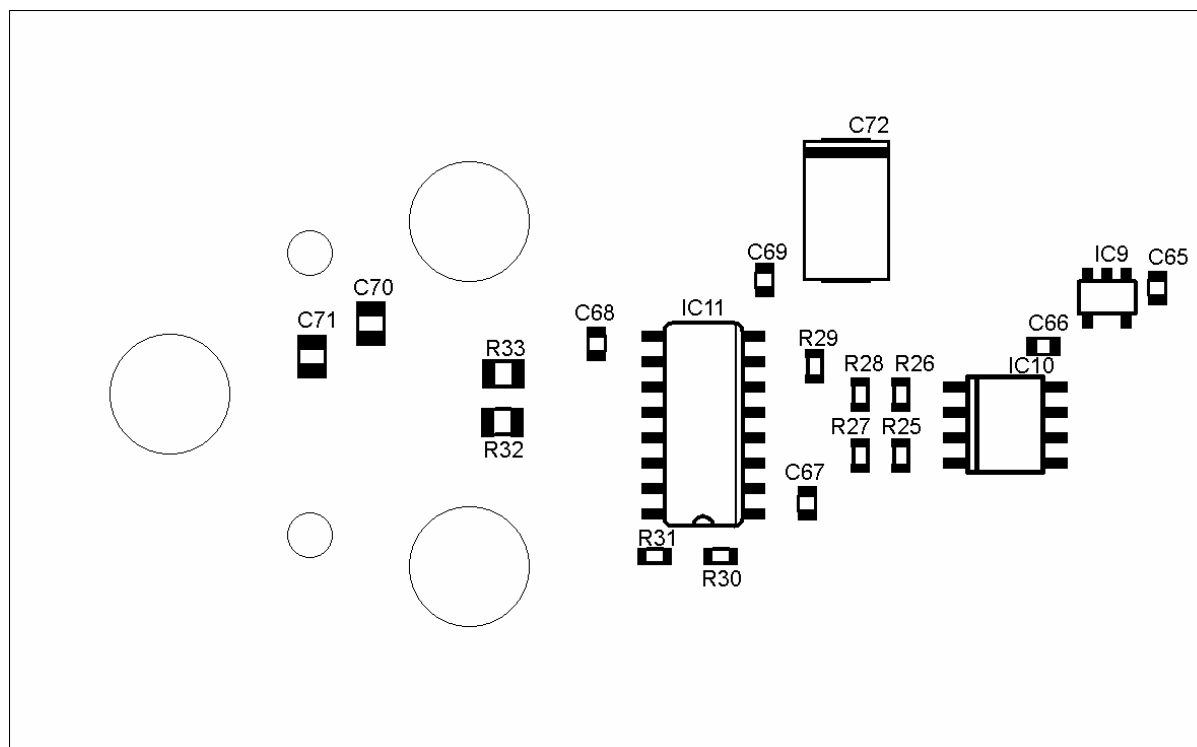


Rozměr desky 60x36 [mm], měřítko M1:1

B.4 Osazovací výkres – pohled shora

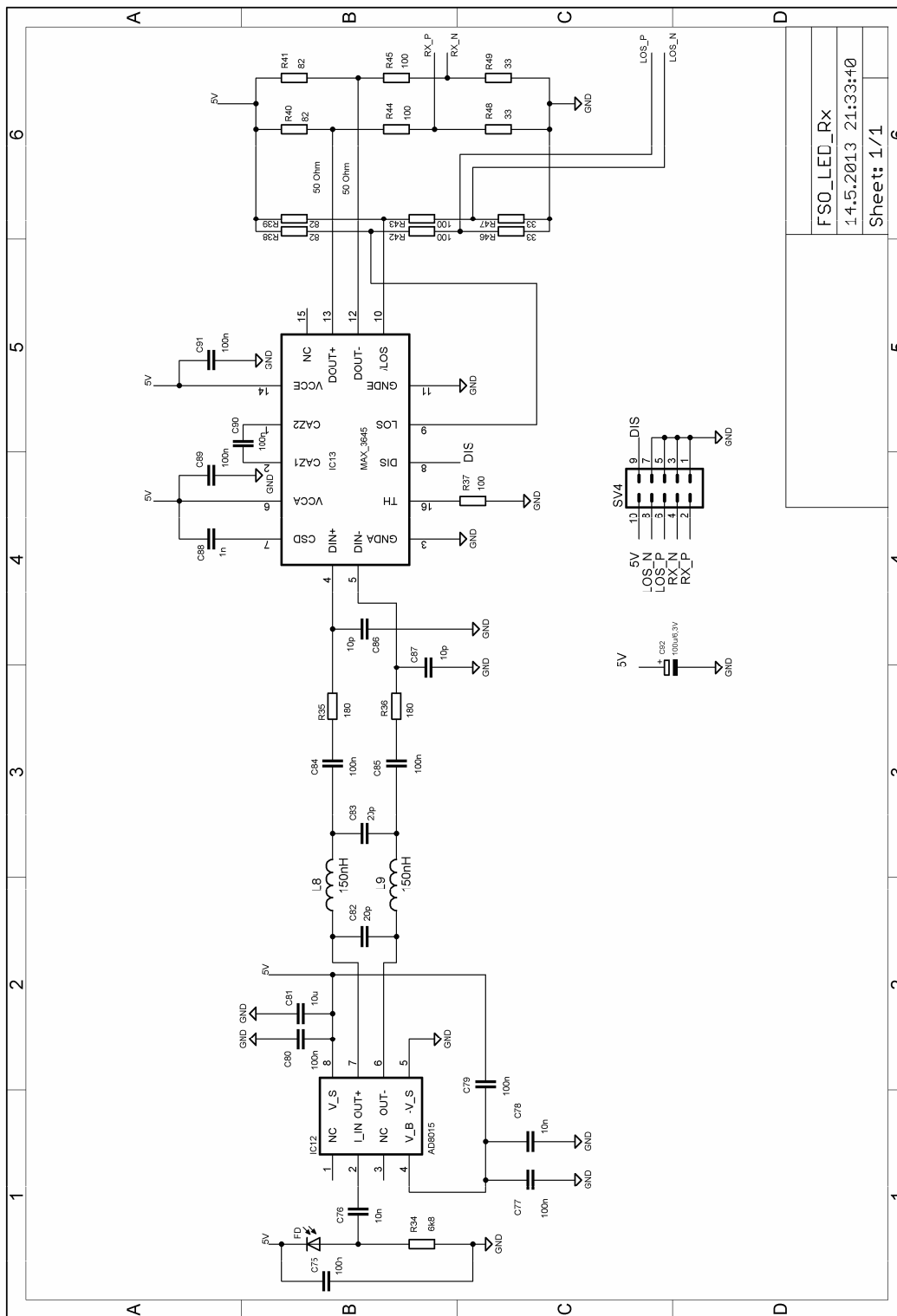


B.5 Osazovací výkres – pohled zespodu



C PŘIJÍMAČ RX

C.1 Obvodové zapojení

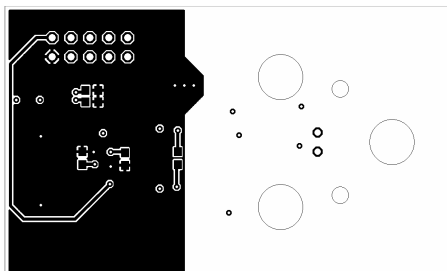


FSO_LED_RX

14.5.2013 21:33:40

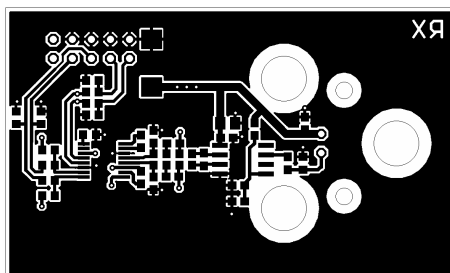
Sheet: 1/1

C.2 Deska plošného spoje – vrstva TOP



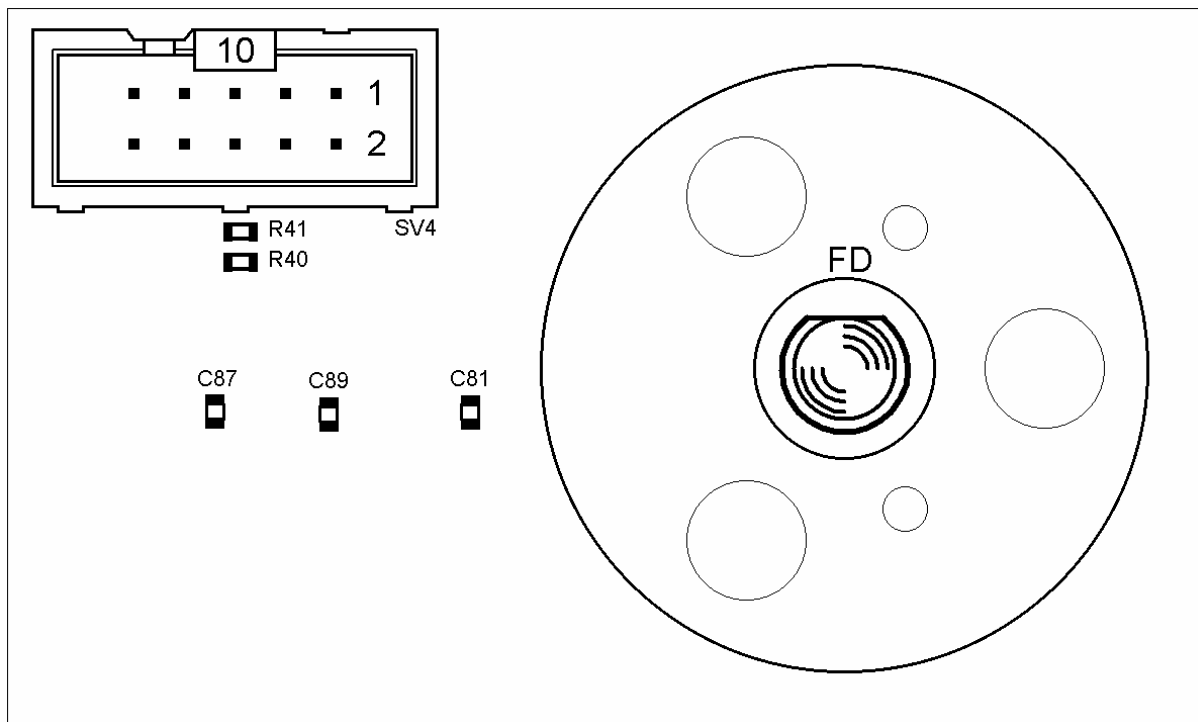
Rozměr desky 60x36 [mm], měřítko M1:1

C.3 Deska plošného spoje – vrstva BOTTOM

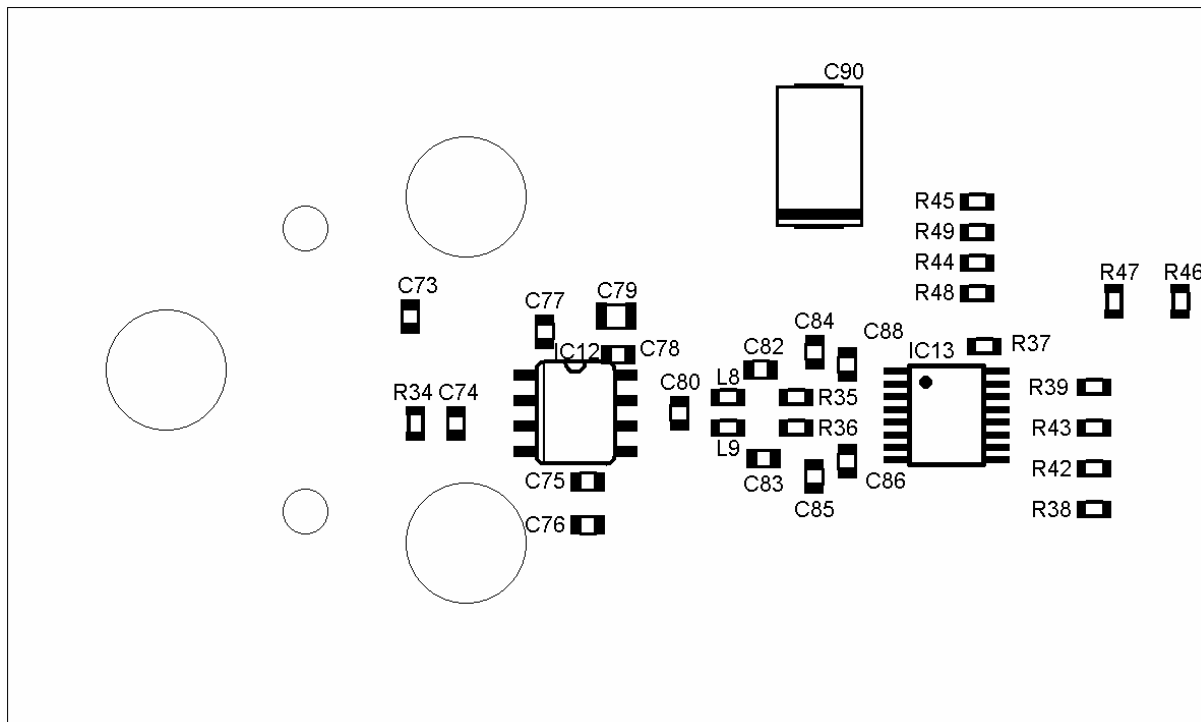


Rozměr desky 60x36 [mm], měřítko M1:1

C.4 Osazovací výkres – pohled sešhora



C.5 Osazovací výkres – pohled zespodu

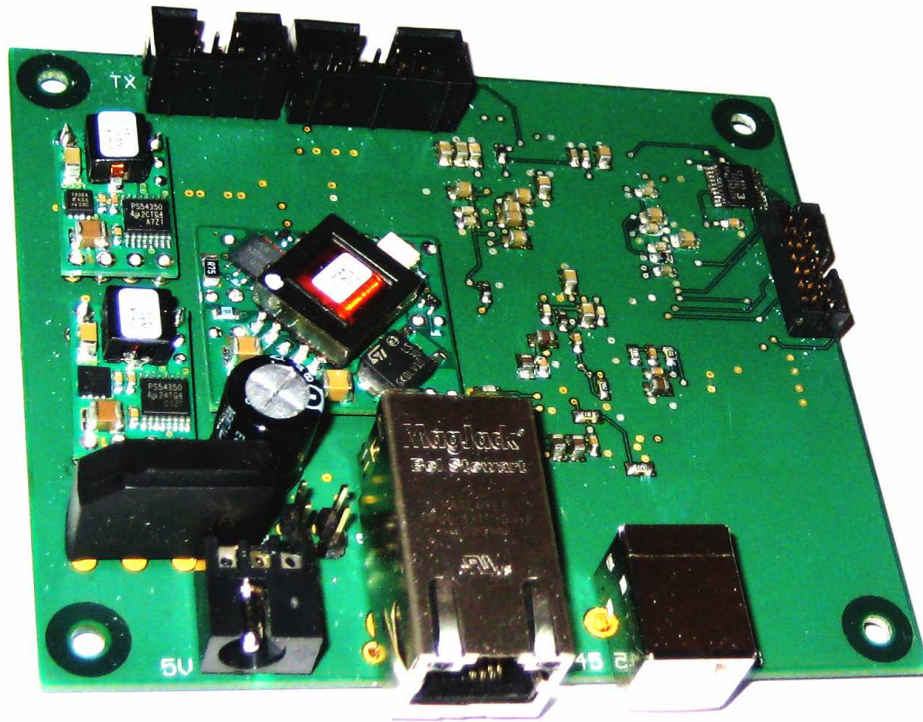


D SEZNAM SOUČÁSTEK

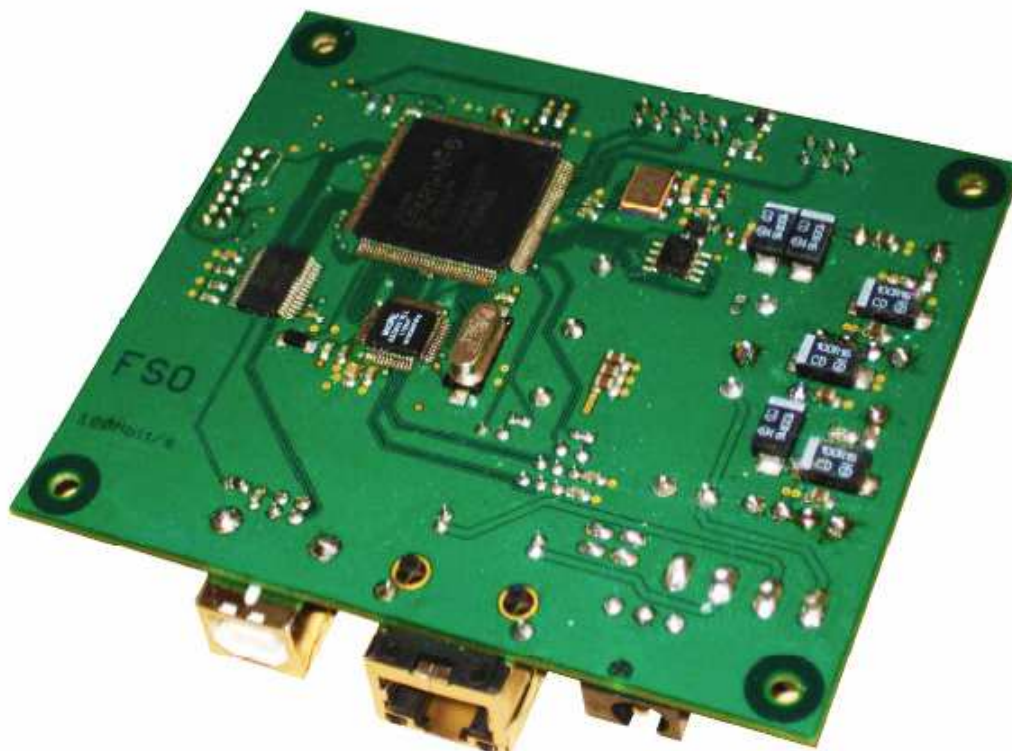
Položka	Počet	Označení	Popis	Hodnota	Pouzdro
1	2	C1, C2	Kondenzátor keramický SMD	1000p	0603
2	6	C3, C18, C22, C23, C76, C78	Kondenzátor keramický SMD	10n	0603
3	1	C4	Kondenzátor keramický SMD	2,2u	0805
4	26	C5, C7, C8, C9, C14, C15, C16, C17, C19, C20, C21, C24, C67, C68, C69, C70, C71, C75, C77, C79, C80, C84, C85, C89, C90, C91	Kondenzátor keramický SMD	100n	0603
5	16	C6, C10, C13, C27, C28, C32, C33, C37, C38, C39, C40, C65, C66, C72, C73, C81	Kondenzátor keramický SMD	10u	0805
6	2	C11, C12	Kondenzátor keramický SMD	22p	0603
7	1	C25	Kondenzátor keramický SMD	1u	0805
8	8	C26, C29, C30, C31, C34, C35, C74, C92	Kondenzátor elektrolytický SMD	100u	D/7343-31W
9	1	C36	Kondenzátor elektrolytický SMD	47u	E5-8,5
10	14	C41, C42, C43, C45, C46, C47, C48, C49, C50, C51, C53, C56, C59, C62	Kondenzátor keramický SMD	4,7u	0805
11	10	C44, C52, C54, C55, C57, C58, C60, C61, C63, C64	Kondenzátor keramický SMD	0,47u	0603
12	2	C82, C83	Kondenzátor keramický SMD	20p	0603
13	2	C86, C87	Kondenzátor keramický SMD	10p	0603
14	1	C88	Kondenzátor keramický SMD	1n	0603
15	1	D1	Dioda	1N4148	Minimelf
16	1	FD	Fotodioda	SFH203FA	LED 5mm
17	1	FR_B	Feritová perla	220R	R0603
18	1	IC1	Physical Layer Transceiver	KSZ8051MLL	TQFP48
19	1	IC2	FPGA	6SLX9TQG144	TQ144
20	1	IC3	USB UART	FT232RL	SSOP28
21	1	IC4	Paměť FLASH	XCF04S-VO20	VO20
22	1	IC5	EEPROM	24C08BSN	SO-08
23	1	IC6	Regulátor napětí	PTH08000W	THM – 6 pin
24	1	IC7	Regulátor napětí	PTH08000W	THM – 6 pin
25	1	IC8	DC/DC konvertor	PTMA402050	THM – 6 pin
26	1	IC9	Převodník LVDS na LVTTTL	SN65LVDS2	SOT23-DBV
27	1	IC10	Převodník LVTTTL na PECL	SN65ELT20	SO-08
28	1	IC11	LED Driver	MC10SX1130	SO16
29	1	IC12	Transimpedanční zesilovač	AD8015	SO08
30	1	IC13	Limitující zesilovač	MAX3645	QSOP16

Položka	Počet	Označení	Popis	Hodnota	Pouzdro
31	1	J1	JTAG konektor	14 pin	JP_2X7_RM2.00
32	1	JP1_RJ45	Oboustranný kolík - přímý	-	1X02
33	1	JP2_5V	Oboustranný kolík - přímý	-	1X02
34	7	L1,L2, L3, L4, L5, L6, L7	Feritová perla	220R	0603
35	2	L8, L9	Induktor SMD	150 nH	0603
37	1	LED1	LED dioda	OP245PS	LED5MM
38	1	Q1	Krystalový oscilátor	25 MHz	HC49UP
39	2	R1,R2	Rezistor SMD	150R	0603
40	2	R3, R12	Rezistor SMD	10k	0603
41	2	R4, R7	Rezistor SMD	1k	0603
42	1	R5	Rezistor SMD	300R	0603
43	1	R6	Rezistor SMD	6k2	0603
44	8	R8, R9, R10, R11, R13, R14, R15, R16	Rezistor SMD	4k7	0603
45	7	R17, R19, R37, R42, R43, R44, R45	Rezistor SMD	100R	0603
46	1	R18	Rezistor SMD	330R	0603
47	1	R20	Rezistor SMD	390R	0603
48	1	R21	Rezistor SMD	27k	0603
49	1	R22	Rezistor SMD	270R	0603
50	1	R23	Rezistor SMD	1k6	0603
51	1	R24	Rezistor SMD	1k	0603
52	6	R25, R26, R38, R39, R40, R41	Rezistor SMD	82	0603
53	2	R27, R28	Rezistor SMD	130	0603
54	1	R29	Rezistor SMD	2k	0603
55	1	R30, R31	Rezistor SMD	DNP	0603
56	1	R32	Rezistor SMD	10	0805
57	1	R33	Rezistor SMD	50	0805
58	1	R34	Rezistor SMD	6k8	0603
59	2	R35, R36	Rezistor SMD	180R	0603
60	4	R46, R47, R48, R49	Rezistor SMD	33R	0603
61	1	RJ45	Konektor RJ45	-	JP1
62	2	SV1, SV3	Konektor se zámkem	-	ML6
63	2	SV2,SV4	Konektor se zámkem	-	ML10
64	1	T1	Tranzistor MOS-FET	BSS138B	SOT23-BEC
65	1	USB	Konektor USB	-	PN61729-S
66	1	X01	Oscilátor SMD	125 MHz	EG21
67	1	X02	Oscilátor SMD	100 MHz	ASDM_OSC
Celkem	179				

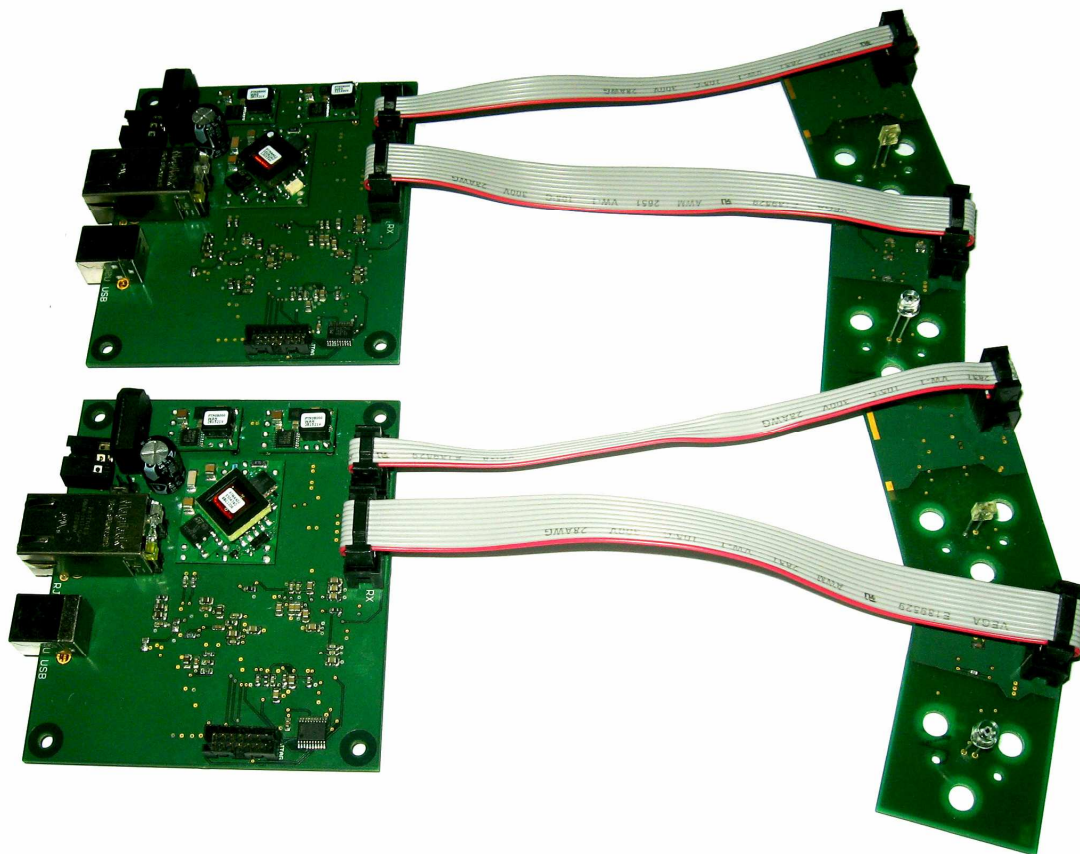
E FOTODOKUMENTACE



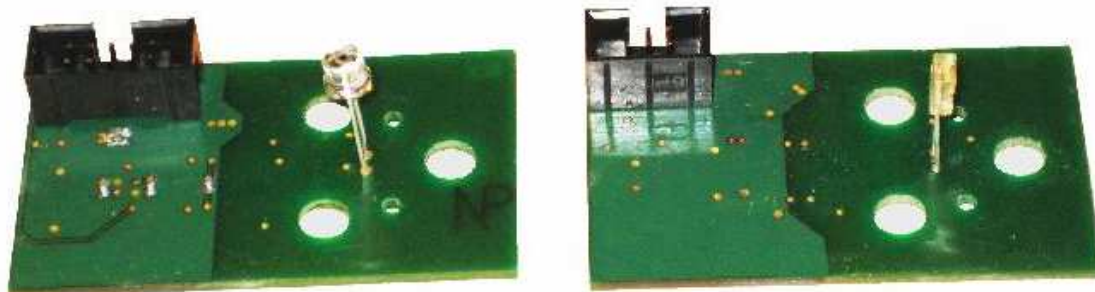
Pohled shora (strana TOP)



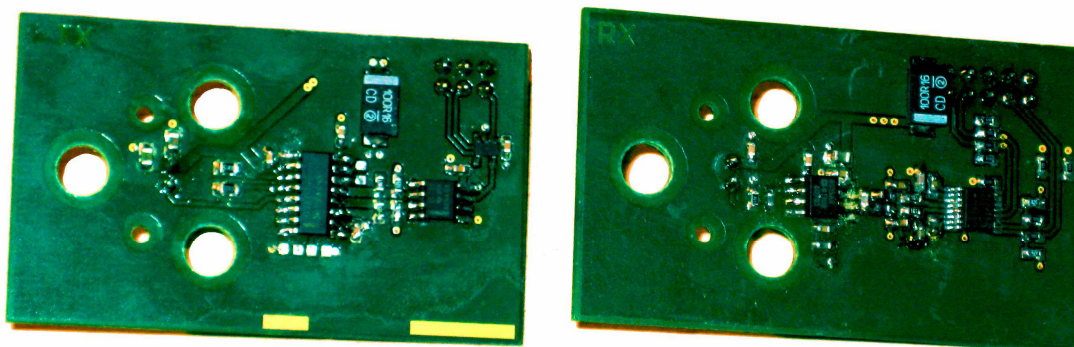
Pohled zespu (strana BOTTOM)



Propojené moduly



Pohled seshora (strana TOP, vlevo RX a vpravo TX)



Pohled zespodu (strana BOTOOM, vlevo RX a vpravo TX)