

# 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

BEZDRÁTOVÝ DATOVÝ OPTICKÝ SPOJ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JIŘÍ HAŇKA

BRNO 2013



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

## BEZDRÁTOVÝ DATOVÝ OPTICKÝ SPOJ

WIRELESS OPTICAL LINK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ HAŇKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JURAJ POLIAK

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Jiří Haňka

**ID:** 133092

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2012/2013

**NÁZEV TÉMATU:**

## Bezdrátový datový optický spoj

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s koncepcí bezkabelových optických spojů obecně a detailně se zaměřte na přenositelnost dat. Podrobně rozeberte jednotlivé parametry optických vysílačů a přijímačů. Navrhněte bezdrátový optický datový spoj pro přenos ethernetového signálu volným prostorem.

Navržený optický spoj sestavte a proměřte jeho parametry. Ověřte funkci spoje za reálných podmínek přenosu ethernetového signálu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WILFERT, O. Optoelektronika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2008.

[2] MAJUMDAR, A. K., RICKLIN, J. C. Free-Space Laser Communications: Principles And Advances. New York: Springer, 2007.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 31.5.2013

**Vedoucí práce:** Ing. Juraj Poliak

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Zaměření této práce je směřováno do oblasti přenosu digitálních dat za pomoci optické bezdrátové komunikace realizovanou dvěma optickými hlavicemi pracujícími v plně duplexním režimu. Obecně práce popisuje současné možnosti optických spojů, jejich princip a srovnání s ostatními spoji. Uvedeny jsou základní prvky realizovaného vysílače a přijímače, jeho vlastnosti a zapojení. Práce objasňuje možnosti přenosu a dále rozebírá jednotlivé vnější jevy, jež mají vliv na vlastnosti přenášeného optického signálu. Je zde popsána optická část návrhu a konstrukce optického bezkabelového spoje, zakončená energetickou bilancí tohoto spoje. Dále tato práce pojednává o základním využití technologie ethernet při přenosech, kódování a modulacích dat přenášených optickým spojem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Optický bezkabelový spoj, LED dioda, fotodioda, energetická bilance spoje, Ethernet, atmosferické přenosové prostředí, optické hlavice, konstrukce OBS.

## **ABSTRACT**

This thesis is aimed at section of transmission of digital data by using two optical wireless communications realized by two free-space optics transceivers working in full-duplex mode. Generally, the work describes present options of optical connections, their principles and comparison with other connections. Basic components of realized transmitter and receiver are mentioned with their characteristics and wirings. The work describes options of transmission and further deals with various external events, which influence characteristics of transmitted optical signal. Thesis describes the optical part of design and construction free-space optic and it's ending energy balance of this link. Further, the work treats of basic use of ethernet technology in transmissions, coding and modulations of data transmitted by optical connection.

## **KEYWORDS**

Optical wireless link, LED diode, photodiode, energy link balance, Ethernet, atmosphere transfer environment, free-space optics transceiver, construction OBS.

HAŇKA, Jiří *Bezdrátový datový optický spoj*: bakalářská práce. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2013. 61 s. Vedoucí práce byl Ing. Juraj Poliak



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Bezdrátový datový optický spoj“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 autorského 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.

BRNO .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jurajovi Poliakovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat Ústavu fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i. za poskytnutá statistická meteorologická data a v neposlední řadě kolegovi Bc. Janu Pučálkovi společně s Ing. Michalem Kubičkem, Ph.D. za úsilí a spolupráci na projektu.

BRNO .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

Úvod	10
<b>1 Optoelektronika a šíření světla</b>	<b>11</b>
1.1 Rozdělení optických záření	11
1.2 Šíření světla atmosférou	12
1.2.1 Absorpce	13
1.2.2 Rayleighův rozptyl	13
1.2.3 Mieův rozptyl	13
1.2.4 Turbulence v atmosféře	14
<b>2 Optický bezkabelový spoj</b>	<b>15</b>
2.1 Výhody a nevýhody OBS:	16
2.2 Hlavice pro OBS	16
2.2.1 Vysílač	17
2.2.2 Přijímač	17
2.3 Optické polovodičové zdroje	18
2.3.1 LED dioda	18
2.3.2 Laserova dioda	19
2.4 Optické polovodičové snímače	20
2.4.1 Fotodioda typu PIN	21
2.4.2 Lavinová fotodioda	22
2.5 Vícecestné šíření	22
2.6 Energetická bilance OBS	22
<b>3 Ethernet</b>	<b>25</b>
3.1 100 BASE Fast Ethernet	25
3.2 Kódování	26
3.2.1 Kódování Manchester	26
3.2.2 Kódování NRZ	26
3.2.3 Kódování MLT-3	27
3.3 Formátový rámeček	27
3.4 Modulace	28
3.4.1 Modulace on-off keying (OOK)	28
3.4.2 Pulzně polohová modulace (PPM)	29
<b>4 Blokové schéma zapojení OBS</b>	<b>30</b>
4.1 Vysílač	30
4.1.1 PHY	30

4.1.2	Programovatelné hradlové pole FPGA - TX . . . . .	31
4.1.3	Budič LED . . . . .	32
4.1.4	UART . . . . .	32
4.1.5	PECL . . . . .	32
4.2	Přijímač . . . . .	32
4.2.1	Transimpedanční zesilovač (TIA, Transimpedance Amplifier) .	33
4.2.2	Limitující zesilovač (LA, limiting amplifier) . . . . .	33
4.2.3	FPGA - RX . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Návrh spoje</b>	<b>34</b>
5.1	Výběr komponentů . . . . .	34
5.1.1	Optimalizace vysílače . . . . .	35
5.1.2	Optimalizace přijímače . . . . .	37
5.2	Šum na fotodetektorech . . . . .	39
5.2.1	Výstřelový šum . . . . .	39
5.2.2	Tepelný šum . . . . .	40
5.3	Šumové vlastnosti přijímače . . . . .	40
5.4	Výkonová bilance spoje . . . . .	41
5.4.1	Geometrický útlum . . . . .	41
5.4.2	Meteorologické útlumy čisté atmosféry . . . . .	42
5.4.3	Dynamický meteorologický útlum . . . . .	44
5.5	Dostupnost spoje . . . . .	48
5.5.1	Praktické využití modelu energetické bilance . . . . .	51
5.6	Bezpečnost spoje . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
	<b>Literatura</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>57</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Elektromagnetické spektrum [6]. . . . .	11
1.2	Vychýlení optického svazku příčinou turbulencí . . . . .	14
2.1	Blokové schéma optického bezkabelového spoje [7]. . . . .	15
2.2	Příklad provedení hlavice pro OBS [12] . . . . .	16
2.3	Útlumy v jednotlivých částech OBS [8]. . . . .	23
3.1	Porovnání metod kódování. [16] . . . . .	27
3.2	Ethernetový rámec. [17] . . . . .	27
3.3	Základní funkce PPM modulace [7] . . . . .	29
4.1	Blokové schéma vysílače OBS. . . . .	30
4.2	Vnitřní struktura FPGA [19]. . . . .	31
4.3	Blokové schéma přijímače OBS. . . . .	33
5.1	Propustnost optického záření atmosférou v závislosti na vlnové délce. [16] . . . . .	34
5.2	Parametry spojné apertury . . . . .	36
5.3	Závislost SNR na délce spoje . . . . .	38
5.4	Závislost BER na délce spoje . . . . .	38
5.5	Typy částic ovlivňující propustnost v čisté atmosféře [29]. . . . .	43
5.6	Útlum optického signálu v závislosti na meteorologické viditelnosti prostředí. . . . .	45
5.7	Intenzita srážek v roce 2012 pro meteorologickou stanici Milešovka . . . . .	46
5.8	Porovnání meteorologických vlivů v poměru intenzity srážek . . . . .	47
5.9	Porovnání meteorologických modelů . . . . .	48
5.10	Graf závislosti linkové rezervy na délce spoje . . . . .	49
5.11	Graf závislosti normované linkové rezervy na délce spoje . . . . .	49
5.12	Změny výkonové bilance spoje při změně vzdálenosti . . . . .	50
5.13	Způsob převodu linkové rezervy na dostupnost spoje [28]. . . . .	50
5.14	Procentuální dostupnost spoje v závislosti na rezervě spoje M [28]. . . . .	51
5.15	Výkonová bilance OBS pro vzdálenost 500 m . . . . .	51

## SEZNAM TABULEK

1.1	Tabulka stavů APP [8] . . . . .	13
5.1	Srovnání využívaných optických zdrojů . . . . .	35
5.2	Základní parametry vysílací LED OP245PS . . . . .	35
5.3	Přepočet parametru BER na poměr SNR [23] . . . . .	37
5.4	Rozdělení typů rozptylu v závislosti na velikosti atmosferických částic a úhlu rozptylu na nich vznikajícím pro $\lambda = 850$ nm [29] . . . . .	43
5.5	Mezinárodní rozdělení útlumu prostředí v závislosti na meteorologické viditelnosti pro viditelnou oblast spektra [29] . . . . .	44
5.6	Hodnoty parametru $\delta$ [7] . . . . .	45
5.7	Rozdělení bezpečnostních tříd [7] . . . . .	52

# ÚVOD

Přenášení dat na velkou vzdálenost bylo pro lidstvo vždy velkým lákadlem. Věda se vyvíjela a vznikaly různé způsoby jak přenést bezdrátově informace. Pro tuto problematiku se nejprve využívalo například Marconiho telegrafní rádiové spojení, které dříve zcela postačovalo na přenášení menších objemů dat. V současné době je ale bohužel rádiové pásmo přehlceno množstvím kanálů, a tak se hledají možné způsoby pro efektivnější přenos mimo toto pásmo. Například v České republice tyto data o obsazenosti rádiového pásma shromažďuje český telekomunikační úřad [1]. Jedním z nich je i optický přenos, který v současné době není licencován. Optoelektronika v dnešní době nachází uplatnění v mnoha směrech včetně vysokorychlostních sítí. Má řadu výhodných vlastností, které u jiných komunikačních systémů prakticky nelze realizovat a díky tomu se považuje za budoucnost komunikačních systémů [2]. Jednou z nich je velice obtížná možnost odposlouchávání, a velká odolnost proti EM rušení. Ve své podstatě se jedná o atmosferický přenos pomocí modulovaného zaostřeného optického svazku, jenž má velice malé postranní vyzařování. Ten lze realizovat vysokorychlostní laserovou nebo elektroluminiscenční diodou ve vysílači a k ní vhodně zvoleným fotocitlivým prvkem v přijmači. Zde bývá použita fotodioda typu PIN nebo lavinová fotodioda. Bohužel jako každá technologie má i tato své nevýhody v podobě silné závislosti na počasí a viditelnosti mezi hlavicemi. To je řešeno výkonovou rezervou, více svazky, speciálním kódováním nebo záložním mikrovlnným spojem. I přesto je ale tato technologie vyhovující požadavkům moderní komunikace, a proto velké firmy investují do jejího vývoje. Jako jedno z prvních takových zařízení je možné uvést optické pojítko pracující na systému RONJA (Reasonable Optical Near Joint Access). Je to optické pojítko, které bezdrátově propojuje dva počítače, funguje na velkou vzdálenost s konstantní přenosovou rychlostí 10 Mb/s pro použití do ethernetové karty nebo switche s RJ-45 konektorem. V současné době se výzkumníkům z Kalifornie a Tel Aviv University podařilo přenést 2,56 terabitů informací s pomocí multiplexingu 8 x 300Gbps využitím nové metody modulace. V této práci se budeme věnovat vytvoření optického pojítka o rychlosti 100 Mb/s, přenášejícího signál ethernetu a průzkumu všech vlivů působících na přenášený signál, abychom se seznámili s problematikou bezkabelového optického přenosu. Na tuto práci lze později navázat diplomovou prací s možností vylepšení parametrů novější technologií [3],[4].

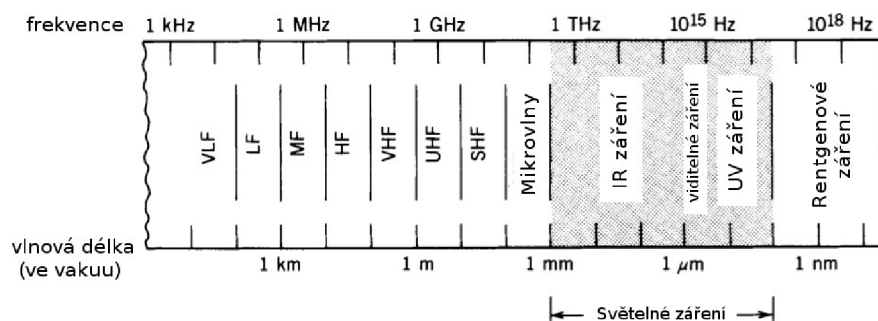
# 1 OPTOELEKTRONIKA A ŠÍŘENÍ SVĚTLA

V tomto oboru se zabýváme vlastnostmi světelného toku nebo jeho interakcí s okolními látkami. Na světlo lze pohlížet ze dvou stran. Jako první definici světelného toku můžeme uvažovat vlnovou teorii, kdy optické záření identifikujeme jako časově závislou změnu elektromagnetického pole v určitém bodě. Tento jev se projevuje hlavně v nižších vlnových délkách světelného toku a světlo se tedy z tohoto pohledu chová jako postupná vlna na níž lze uplatnit veškeré zákonitosti vlnění. Druhá definice popisuje světlo jako kvanta částic přenášejících energii, které jsou chápány jako kvazičástice, tj. částice s nulovou klidovou hmotností. Z tohoto hlediska má světlo také povahu částicovou. Tento charakter uplatňujeme hlavně při vysvětlování interakce světla s volnými elektrony uvnitř látky, kdy lze pozorovat takzvaný fotoelektrický jev. Tento jev objasnil roku 1905 Albert Einstein kdy popsal, že šíření světla je i přes vlnový charakter vln je lépe popsatelná jako šíření konečného počtu energetických kvant lokalizovaných v prostoru, které se posouvají, aniž by byly rozděleny a které mohou být absorbovány nebo emitovány pouze jako celek [5]. Roku 1924 dostává za tento objev Nobelovu cenu - začátek kvantové mechaniky.

## 1.1 Rozdělení optických záření

Pokud uvažujeme vlnový charakter optického záření, pak ho lze z hlediska délky vln v optické oblasti rozdělit na [6]:

- Infračervené (IR) -  $\lambda = 760 - 1000 \mu\text{m}$
- Viditelné -  $\lambda = 400 - 750 \text{ nm}$
- Ultrafialové (UV) -  $\lambda = 10 - 400 \text{ nm}$



Obr. 1.1: Elektromagnetické spektrum [6].



Typické standardizované vlnové délky využívající se pro přenos dat jsou 880 nm, 1310 nm a 1550 nm, ale experimentálně jsou využívány i jiné. Obecně platí, že pro lepší optický výkon se používají polovodičové prvky vyzařující v pásmu nad 1  $\mu\text{m}$ . Bohužel jsou tyto prvky dražší, a proto se pro obvyklé levnější optické spoje využívají zařízení pracující na vlnových délkách 880 nm [7].

## 1.2 Šíření světla atmosférou

Světlo se v atmosféře šíří přímočaře ve směru vyzáření ze zdroje a je ovlivněno jevy jako je extinkce optické intenzity, turbulence optické intenzity a přerušování svazku. Prostředí je velmi důležitý aspekt pro šíření optického vlnění. Každé prostředí má své parametry, které musíme při návrhu optických spojů uvažovat. Dále lze přesněji tyto jevy rozdělit na:

- extinkce optické intenzity vlivem absorpce a/nebo rozptylu na molekulách a/nebo aerosolech
- extinkce optické intenzity vlivem turbulence troposféry
- fluktuace optické intenzity vlivem turbulence troposféry
- fluktuace optické intenzity působením deště nebo sněhu
- fluktuace optické intenzity vlivem deformace tvaru svazku
- přerušování svazku letícím ptákem

Extinkci optické intenzity lze popsat středním koeficientem extinkce [8]

$$\alpha = \alpha_{abs} + \alpha_{r,m} + \alpha_{r,\check{c}} + \alpha_{fluk}, \quad (1.1)$$

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

Pro ohodnocení extinkce v atmosferickém přenosovém prostředí (APP) se vychází z Bouguerova zákona kdy po jeho integraci dostaneme vztah [8]

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda)\exp[-\alpha(\lambda)\Delta z] \quad (1.2)$$

kde  $I_1$  je optická intenzita na začátku vrstvy a  $I_2$  je optická intenzita na konci vrstvy tloušťky  $\Delta z$ . Předpokladem je konstantní hodnota extinkce na celé vrstvě  $\Delta z$ .

Tab. 1.1: Tabulka stavů APP [8]

$V_M$ [km]	$\alpha$ [km <sup>-1</sup> ]	stav atmosféry
více než 63	méně než 0,062	velmi čistá
63 až 26	0,062 až 0,15	čistá
26 až 1,3	0,15 až 3,07	opar
1,3 až 0,06	3,07 až 61,1	mlha
méně než 0,06	více než 61,1	silná mlha

### 1.2.1 Absorpce

Absorpce je jedním z fyzikálních jevů, které nastávají při interakci fotonu s jinou částicí. Při tomto jevu dochází k předání energie mezi atomem a fotonem. Touto interakcí fotonu s jinou částicí dojde k excitaci elektronu na vyšší energetickou hladinu atomu. Tím vzniká útlum absorpcí. Tato energie může být znovu vyzářena formou světla nebo jiného typu energie. Velikost absorpce je dána absorpčním koeficientem, který udává schopnost materiálu absorbovat fotony v závislosti na délce vlny dopadajícího záření.

### 1.2.2 Rayleighův rozptyl

Rayleighův rozptyl je další vnitřní účinek, který přispívá k útlumu světla. Náhodná lokalizované varianty molekulární pozic ve vzduchu vytvářejí náhodné nehomogenity indexu lomu, které se chovají jako malá centra rozptylu. V tomto případě je amplituda rozptýleného pole úměrná  $\omega^2$  a intenzita rozptýleného pole  $\omega^4$  nebo také  $1/\lambda_0^4$ . Z toho plyne že krátké vlny jsou rozptylovány více než dlouhé, neboli modré světlo je rozptylováno více než červené. Jev je pojmenován po objeviteli Lordu Rayleighovi, který přišel s teorií, že rozptyl se vytváří odrazem od jednotlivých zrněk prachu. Později toto tvrzení upravil na odrazy světelného toku od molekul, kdy se optický svazek láme od směru šíření. Tato vlastnost světla se dá pozorovat například při zbarvení oblohy naší planety.

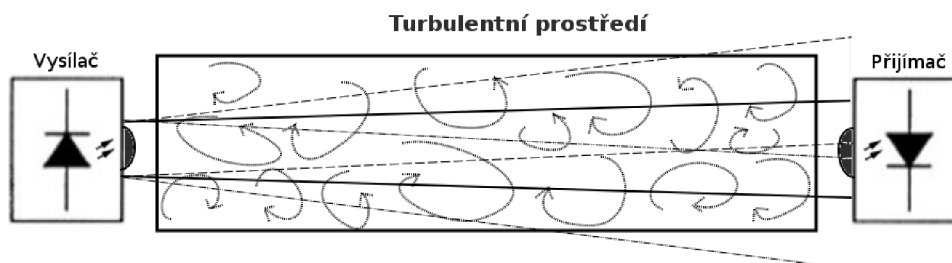
### 1.2.3 Mieův rozptyl

Tato teorie je v podstatě návazností na předešlou teorii Lorda Rayleigha. Uveřejnil ji německý fyzik Gustav Mie [9], když popsal rozptyl světla na částicích vycházejících z Maxvelových rovnic, což umožnilo obecnější použití teorie rozptylu světla. Miova teorie narozdíl od Rayleighové teorie nemá omezení v použití na částice mnohem menší než je vlnová délka, a proto ji lze použít pro výpočet rozptylu na sférických

částicích libovolné velikosti a pro částice elektricky nabitě. Rozšířenou Mieovu teorii lze pak použít i pro výpočet rozptylu na nesférických částicích, čehož se využívá například v meteorologii při radiolokaci, neboť ledové částice a velké kapky nemají obecně sférický tvar. Nevýhodou je její složitost a proto pro většinu případů lze využít pouze Rayleighovu [10].

### 1.2.4 Turbulence v atmosféře

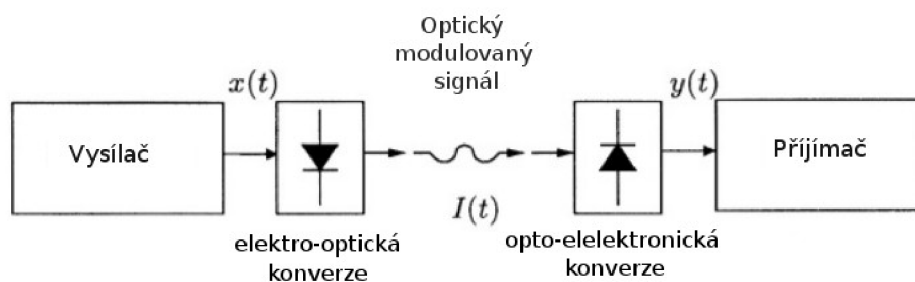
Atmosferická turbulence je jev způsobující kolísání přijímaného signálu. Na vzniku turbulencí se podílí dva činitelé. Záření Slunce, které vyvolává náhodné časoprostorové změny indexu lomu a dále je to pohyb atmosféry, který může být buď laminární či turbulentní. Masy vzduchu s odlišnými teplotami mají různé indexy lomu. Index lomu je funkcí tlaku a teploty. Ve vzduchu se vytváří oblasti teplotních nehomogenit, které jsou místem konstantního indexu lomu. Tyto lokální nehomogenity (vzdušné víry) jsou charakterizovány jak rozměry tak časovou stálostí. Vzdušné víry mají tvar "koulí" o průměru  $l \in \langle l_0, L_0 \rangle$ . Vlastnosti atmosféry dovolují jen určité rozměry těchto vírů, které se pohybují řádově od několika mm do km. Rozměrově větší víry se rozpadají za kratší dobu a mají charakter mechanického pohybu. Malé víry se rozpadají za delší dobu a jsou teplotního charakteru [11].



Obr. 1.2: Vychýlení optického svazku příčinou turbulencí

## 2 OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ

Optický bezkabelový spoj (OBS) je zařízení pro komunikaci bez nutnosti použití jakýchkoli kabelových propojů využívající optické pásmo k přenosu dat. Světlo má oproti radiovým frekvencím extrémně velkou šířku pásma, což znamená, že dokáže přenášet mnohem více informací jedním komunikačním kanálem. Bezdrátové optické spoje předávají informace tím, že modulují optické záření v reakci na vstupní signál elektrického proudu. Informace zasílané na tento kanál není obsažena v amplitudě, fázi nebo frekvenci přenášené optickým signálem, ale spíše v intenzitě vysílaného signálu. Tento elektro-optický proces převodu se nazývá modulace optické intenzity a je obvykle proveden světlo-emitující diodou (LED) nebo laserovou diodou (LD). OBS je realizován dvěma hlavicemi s přijímací i vysílací elektronikou pro zajištění plně duplexní komunikace. Využití je hlavně tam kde je problematické táhnout kabelové spoje [7]



Obr. 2.1: Blokové schéma optického bezkabelového spoje [7].

OBS dělíme zejména dle charakteristických prostor v kterých jsou použity na:

- **INDOOR** - Spoj pracující v uzavřeném prostoru bez vnějších atmosferických vlivů. Neuvažujeme zde například změny počasí nebo vířivé proudy. Obvykle se jedná o části budov či jiných uzavřených komplexů.
- **OUTDOOR** - Zde se jedná o otevřené prostředí v němž nelze zamezit vnějším vlivům při narušování optického svazku. Je zde potřeba uvažovat více okolních rušení. Tuto kategorii lze ještě rozdělit na atmosférické (stacionární a mobilní) a satelitní (pracující v blízkém nebo vzdáleném kosmu).

## 2.1 Výhody a nevýhody OBS:

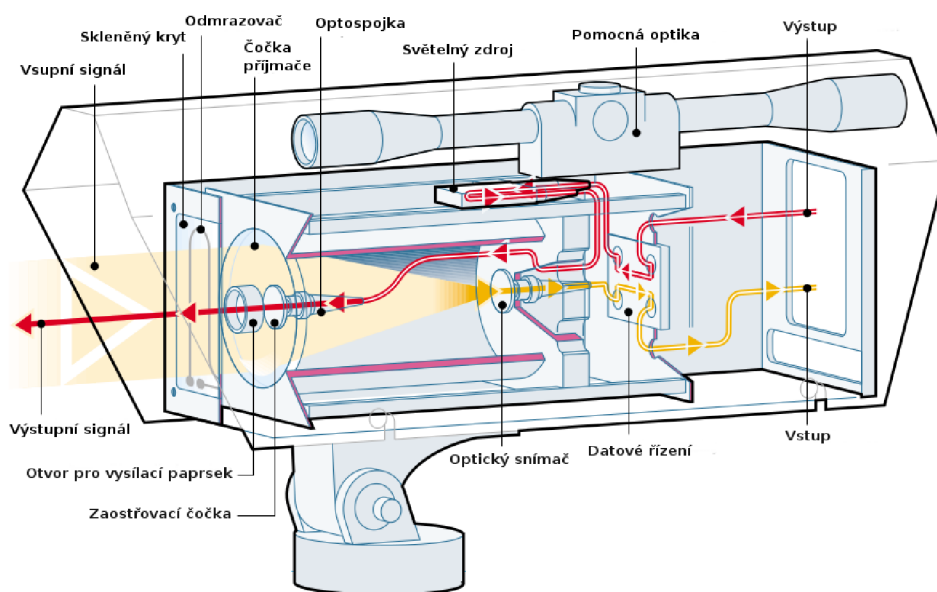
### Výhody:

- galvanické oddělení elektronických bloků
- odolnost proti vnějšímu elektromagnetickému rušení
- vysoká výkonová dynamika systému
- vysoká přenosová rychlost komunikačních systémů
- vysoká citlivost senzorů
- vysoká přesnost naváděcích systémů
- aplikace optických bezkabelových spojů (absence legislativních překážek)

### Nevýhody:

- potřeba určité opatrnosti při práci s optickým vláknem a laserem
- podmínka přímé viditelnosti mezi zdrojem a přijímačem
- oproti radiovým spojům větší závislost kvality přenosu na stavu počasí

## 2.2 Hlavice pro OBS



Obr. 2.2: Příklad provedení hlavice pro OBS [12] .

K vytvoření OBS v plně duplexním stavu je zapotřebí dvou zařízení, která spolu dokáží komunikovat odesláním i přijímáním dat v reálném čase. K tomu se využívají hlavice, které mají v sobě integrovány alespoň jeden přijímač a jeden vysílač. Ke

zlepšení šířky pásma nebo přesnosti přenosu a odstranění chyb se někdy využívá více kanálů. Kromě tohoto je zde prováděno i kódování, modulace, demodulace a realizace propojení s řídicím systémem. Hlavice se obvykle montují na střechy budov a musí mezi sebou mít přímou viditelnost. Dříve byly tyto hlavice velice drahé a používali se převážně pro armádní složky, avšak v dnešní době je již na trhu několik volně dostupných modelů.

### 2.2.1 Vysílač

Vysílací část hlavice slouží ke zpracování vstupního signálu ze sítě a jeho následnou modulaci na optický svazek. Optický výkon tohoto svazku je omezen kvůli bezpečnosti, aby nemohlo dojít k poškození citlivé tkáně (například očí) při případném přerušení paprsku. Bezpečnost svazku se rozděluje do několika skupin, pro které jsou definovány maximální výkony standardizovaných vlnových délek. Modulace se provádí budícím systémem, který na základě kódovacího signálu vysokorychlostně spíná zdroj světelného záření. Světelný výkon zářiče je definován jako funkce vstupního proudu. Jako tento zdroj se nejčastěji využívají vysokosvitivé elektroluminiscenční diody (LED) nebo laserové diody (LD). Pro efektivnější spínání těchto diod se využívá neúplného vyhasnutí při nulové úrovni, čímž se dioda může zase rychleji zcela rozsvítit. Pro udržení správné intenzity záření se snímá světelný tok pomocnou fotodiodou, která funguje jako zpětná vazba budiče.

### 2.2.2 Příjímač

Tento blok má za úkol naopak přijmout opticky modulovaný signál fotocitlivým prvkem a převést ho na změny amplitud definovaného napětí. Tyto změny se v přijímači rozeznávají a vyhodnocují se pomocí stejného kódování jako je realizováno na vysílači. Přijímaný signál je ovlivněn útlumem optického přenosového prostředí a šumem, který je přijímaný společně s užitečným signálem. Pro rozeznání informace je potřeba oddělit tento signál od šumu a následně ho transimpedančním zesilovačem (TIA) zesílit, abychom mohli bezpečně rozeznávat vysoké a nízké úrovně. Příjímač je klíčový prvek určující celkový výkon zařízení vzhledem k citlivosti nejmenších úrovní signálu. Pro vysokorychlostní kanál lze použít PIN diody nebo diody lavinového typu. TIA převádí malé změny fotoproudu z diody s přidáním co nejméně šumových složek. Z jeho výstupu je napětí ale příliš malé a tak se za něj ještě zapojuje zesilovač s vysokým ziskem pro dosažení rozeznávaných logických úrovní.

## 2.3 Optické polovodičové zdroje

Zdroje optického záření slouží k vyzáření elektromagnetického vlnění světelné vlnové délky průchodem elektrického proudu. Polovodičové prvky jsou v podstatě PN přechody v propustném směru, jejichž minoritní nosiče při rekombinaci produkují energii vyzářenou ve formě fotonů, vztažené přibližně lineárně k velikosti procházejícího proudu. Pro zlepšení vyzařování jsou do substrátu injektovány další minoritní nosiče pro zlepšení rekombinace. V důsledku toho je možná rekombinace i přes zakázané pásmo při zachování hybnosti. Většina fotonů emitovaných tímto procesem mají poté energii popsanou vztahem:

$$E_{\text{photon}} = E_g = hv, \quad (2.1)$$

kde  $E_g$  je energie potřebná pro přechod zakázaného pásma,  $h$  je Planckova konstanta a  $v$  je frekvence vyzářeného fotonu. Pokud jde o délku vlny emitovaného fotonu pak lze tuto rovnici přepsat jako:

$$\lambda = \frac{1240}{E_g}, \quad (2.2)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka vyzářeného elektronu v nm a  $E_g$  je rozdíl energií mezi horní částí valenční skupiny a dnem pásma vodivosti v izolačních látkách a polovodičích v elektronvoltech. Základními vlastnostmi, kterými hodnotíme tyto zdroje jsou velikost vyzářeného výkonu  $P$ , rychlost spínání  $t_s$ , vlnová délka vyzářeného světelného toku  $\lambda$  a koherence. [7]

### 2.3.1 LED dioda

LED neboli Light emitting diode je označení elektroluminiscenčních diod. Dioda bývá také označována jako luminiscenční nebo pro náročnější aplikace jako superluminiscenční dioda (SLED). Základní princip činnosti je stejný jako u klasické usměrňovací diody. Dioda je opatřena přechodem PN, na který je přiloženo napětí v propustném směru. V důsledku přiloženého napětí dochází k injekci minoritních nosičů náboje přes PN přechod. Po překonání určité vzdálenosti tyto nosiče rekombinují s nosiči opačného znaménka. Rekombinační proces v aktivní oblasti se vyskytuje náhodně a v důsledku toho jsou fotony generované nesouvisle (tj. vztah fáze mezi emitovanými fotony je náhodný v čase). Tento jev nazýváme spontánní emise. V dnešní době se využívá ke zlepšení účinnosti tzv. konstrukce s dvojitou heterostrukturou. Jedná se o vytvoření úzkého pásma mezi polovodičem P a N, ve kterém je soustředěna veškerá rekombinace. Mezi výhody použití této struktury patří skutečnosti, že injekčně dotované nosiče jsou omezeny do přesně vymezené aktivní oblasti, kde dochází k velké koncentraci vstříkovaných nosičů. Výsledkem

je snížení časové konstanty zářivé rekombinace, zvýšení frekvence, odezvy zařízení a velikosti amplitudy vyzářené světelné vlny. Pro zrychlení spínacího procesu lze diodu využívat pouze v režimu neúplného uzavření. Dále je možné odvodit výraz pro výstupní optickou mohutnost zařízení jako funkce řídicího proudu,

$$P_{vol} = hv \frac{J}{qd} B \tau_n (p_0 + n_0 + \frac{\tau_n J}{qd}), \quad (2.3)$$

kde  $P_{vol}$  je výstupní výkon,  $J$  je proudová hustota,  $hv$  je energie fotonu,  $d$  je tloušťka aktivní oblasti,  $B$  koeficient zářivé rekombinace,  $\tau_n$  je délka životnosti elektronu v aktivní oblasti a  $p_0, n_0$  je koncentrace nosičů v aktivní oblasti při tepelné rovnováze. Další vlastností, kterou u LED posuzujeme je její zahřívání vlivem protékajícího proudu přes ohmické oblasti samotné diody a tím přeměnu elektrické energie také na nežádoucí tepelnou. Tímto lze posuzovat účinnost samotného zařízení. Toto zvýšení teploty degraduje vnitřní kvantovou účinnost zařízení tím, že ubírá elektronům energii pro překonání zakázaného pásma a snižuje tedy pravděpodobnost rekombinace. Dopad vlastního zahřívání diody na linearitu může být zlepšen využíváním v pulzním provozu. Delší provoz za vysokých teplot prostředí snižuje výstupní optický výkon a může vést k poruše zařízení. Celkovou účinnost přeměny elektrické energie na světlo má LED až 50%. [13],[7].

### 2.3.2 Laserova dioda

Laserové diody (LD) jsou novější technologie, které ale stále využívají zhotovení základů LED techniky. LD stále závisí na přechodu nosiče přes zakázané pásmo k výrobě vyzářeného fotonu, nicméně úpravy na zařízení a struktuře umožňuje efektivně vyrábět koherentní světlo, přes úzkou optickou šířku pásma. Funkce je založena na vzniku stimulované emise optického záření v polovodičích při kvantových přechodech elektronů z vodivostního do valenčního energetického pásu a existenci zářivé rekombinace nosičů náboje elektronů a děr. Inverze populace hladin je dosaženo injkcí nosičů náboje přechodem PN (injekční laser). Existenci stimulované emise dokázal A. Einstein ve své práci z roku 1912. Při tomto procesu foton s frekvencí dopadá na atom (resp. molekulu) ve vyšším energetickém stavu a přiměje ho k přechodu do nižšího stavu za vyzářením dalšího fotonu. Původní foton se přitom nepohltí a oba fotony se pohybují společně dále stejným směrem, jako foton, který emisi vyvolal. Jsou synchronizovány, mají stejnou frekvenci a stejnou fázi. Jedná se tedy o koherentní záření (koherentní vlnění). Záření se tak zesiluje a proces se může lavinovitě opakovat s dalšími atomy (resp. molekulami). Aby k tomuto procesu došlo je do zařízení vsunuta optická zpětná vazba. Tato optická zpětná vazba se vytvoří umístěním odrazné plochy do cesty generovaných fotonů a odesílá je zpět přes aktivní optoelektronické komponenty, kde se rekombinační proces opakuje. Toho



je dosaženo například tím, že se nastaví index lomu okolních materiálů. Konce zařízení mají zrcadlové plošky, které jsou štěpeny ze sypkého materiálu. Jedny tyto plošky poskytují téměř úplnou reflexi zatímco druhé umožňují některým fotonům přenos do volného prostoru. Provoz této optické zpětnovazební struktury je analogický mikrovlnným rezonátorům, které vykonávají totéž pouze s elektromagnetickou energií a vysokou vodivostí kovů. Ve srovnání s ostatními světelnými zdroji má LD účinnost přeměny elektrické energie na světlo až 90%. Bohužel je laser více citlivý na zahřívání a je nutná složitější kontrola zabezpečení a tím i složitost celého zařízení. Výstupem z LD je soustředěný úzký optický svazek. [13], [14].

## 2.4 Optické polovodičové snímače

Optické snímače nejčastěji tvořené fotodiodami jsou polovodičové součástky citlivé na světlo, které jsou vyráběny téměř stejným způsobem jako "normální" polovodičové diody. Hlavním rozdílem je, že fotodiodové čipy jsou větší a jsou konstrukčně přizpůsobeny k tomu, aby se dopadající světlo dostávalo na PN přechod. Při dopadu fotonu na přechod předá svou energii elektronu ve valenční vrstvě a tím mu umožní přesun do vodivostního pásu. Tímto způsobem dochází k vybuzení změny proudu na součástce které jsou dále snímány příslušnou elektronikou. Fotodiody jsou typicky konstruovány z materiálů jako jsou Si, Ge, ale mohou být použity i jiné materiály (GaAlAs, GaAs, InGaAs). Každý z těchto materiálů dodává fotodiodě specifické vlastnosti a tím možnost použití v jiném optickém pásmu. Základní provoz v ustáleném stavu polovodičové fotodiody může být modelován výrazem:

$$I_p = q\eta_i \frac{P_p}{hv}, \quad (2.4)$$

kde  $I_p$  je průměrný generovaný fotoproud,  $\eta_i$  je vnitřní kvantová účinnost zařízení,  $P_p$  je vyzářený výkon a  $hv$  je energie fotonu. Kvantová účinnost zařízení je pravděpodobnost vzniku páru elektron-díra při nárazu fotonu na PN přechod. Klíčový prvek pro fotodiody je responzivita (spektrální citlivost). Tu lze vyjádřit vztahem:

$$R_p = \frac{I_p}{P_p} = \frac{\eta_i}{qv}. \quad (2.5)$$

Nejllepší volbou detektoru pro vysoké rychlosti komunikačních systémů je fotodioda typu PIN nebo lavinová fotodioda [7].

Dalším velice důležitým parametrem posuzovaným u fotosnímačů je šumová vlastnost fotodiod. Ta je zpravidla definována veličinou „výkon ekvivalentní šumu“ (NEP). NEP určuje střední výkon harmonicky modulovaného optického výkonu, při kterém je střední hodnota napětí na fotodiodě rovna standardní odchylce šumového napětí. Lze jej vyjádřit jako

$$NEP = \frac{\sqrt{\langle \Delta u_s \rangle^2}}{S_U}, \quad (2.6)$$

kde  $\Delta u_s$  je standardní odchylka šumového napětí a  $S_U$  je napěťová citlivost fotodiody. Tuto hodnotu lze poté přiřadit k určité jednotce šířky pásma přenosu  $B_m$ , jelikož výkon šumu je přímo úměrný této šířce pásma a tím určit minimální hodnotu výkonu v které lze ještě snímat dopadající signál, aniž by chybovost klesla pod stanovenou mez.

$$NEP = \frac{\sqrt{\langle \Delta u_s \rangle^2}}{S_U \sqrt{B_m}}. \quad (2.7)$$

K této hodnotě se dále obvykle přidává rezerva spoje pro správný příjem.

### 2.4.1 Fotodioda typu PIN

Tento typ fotodiody se skládá ze dvou silně dotovaných polovodičů P a N mezi něž je vložena nedotovaná intrinsická oblast I, která má mnohonásobně větší odpor. Světlo, které proniká do fotodiody nejprve překonává konstrukčně velice tenkou oblast P a energie fotonu se dostává až do vnitřní sekce I. Tam jsou fotony absorbovány a dochází k vytvoření volných nosičů, které jsou vlivem silného elektrického pole přetaženy do silně dotovaného substrátu, aniž by stihly zrekombinovat. Některé nosiče ovšem stihnou zrekombinovat, což snižuje celkovou citlivost fotodiody. Pro dosažení dobrého efektu citlivosti diody je potřeba velká plocha pro přijímání světelného toku. Tím se zvyšuje celková kapacita zachycené energie, kterou vyjádříme jako:

$$C = \varepsilon \frac{S}{w}, \quad (2.8)$$

kde  $\varepsilon$  je permitivita prostředí  $S$  je plocha přechodu a  $w$  je tloušťka implicitní vrstvy. Bohužel se s rostoucí plochou pro lepší příjem optického výkonu se zhoršuje i časová konstanta  $\tau$  kterou můžeme spočítat jako:

$$C = \frac{w}{v_T}, \quad (2.9)$$

kde  $v_T$  je rychlost nosičů náboje. Proudová citlivost fotodiody se poté definuje jako proud na jejím výstupu  $I$  vztažený k jednotce optického výkonu  $P$ , který na fotodiody dopadá:

$$C = \frac{dI}{dP}. \quad (2.10)$$

Jelikož je fotodioda klíčovým prvkem celého přístroje, je nutný pečlivý návrh přijímacích struktur, aby nebylo nadměrně sníženo systémové pásmo nebo zvýšen šum na vstupu přijímače.[8]

### 2.4.2 Lavinová fotodioda

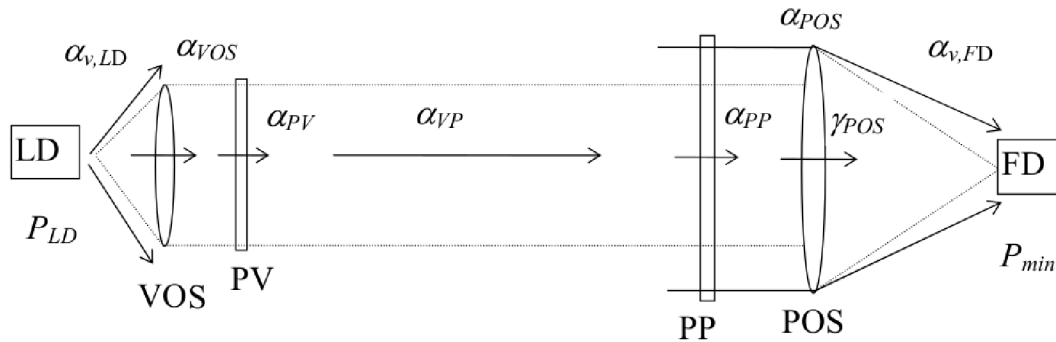
Základní konstrukce lavinových fotodiód je velmi podobná s PIN fotodiódou. Rozdíl je v tom, že pro každý foton, který je absorbován vnitřní vrstvou, může způsobit více než jednu přeměnu na pár elektron-díra. V důsledku toho, mají tyto diody fotoodporový zisk větší než jedna, zatímco PIN fotodiody jsou stanoveny na jednotku zisku. Toho je dosaženo zvětšením intrinsické oblasti I a přiložením větším napětím, čímž dojde k tzv. lavinovému jevu. Uvolněné elektrony po interakci s fotony jsou urychlovány relativně vysokým přiloženým napětím ( $U = 100 \text{ V}$ ) a strhávají k uvolnění další elektrony. Tímto uzpůsobením lze zvýšit citlivost diod. Nevýhodou ovšem u těchto prvků zůstává také nárůst a zesílení šumu na snímači a špatná nelineární kontrola diody. Pro správnou funkci diody je zapotřebí poměrně komplikovaná stabilizace dalšími zařízeními.[7]

## 2.5 Vícecestné šíření

Stejně jako je tomu v případě kmitočtových systémů rádiového přenosu, účinky vícecestného šíření jsou důležité i pro bezdrátové optické sítě. Způsobují zde rušení, ale v některých případech se dají použít také jako zlepšení pokrytí. Vyzářená výstupní optická vlna z vysílače může mít mnoho odrazů a lomů vlivem okolí před dopadem na přijímač. U rozhlasových systémů může součet vysílaného signálu a jeho obrazy způsobit na příjmu antény spektrální nuly v přenosové charakteristice. Tyto nuly jsou umístěny na kmitočtech, kde fázový posuv mezi cestami způsobuje destruktivní interferenci v přijímači. Ačkoli vícecestné rušení není hlavní překážkou v bezdrátové optické vazbě, časová disperze přijímaného signálu v důsledku vícecestného šíření problémem zůstává. Tato disperze je často modelována jako lineární časově invariantní systém neboť vlastnosti kanálu mění pomalu, po mnoho period symbolů. Nejvíce se toto rušení projevuje v IR spektru [7].

## 2.6 Energetická bilance OBS

Energetická bilance je grafické znázornění výkonu OBS v decibelové míře, zahrnující útlumy mezi vyzářenou a dopadající vlnou. V této části jsou rozebrány jednotlivé vlivy [8], které mají zesilující nebo tlumící vliv na přenášený signál:



Obr. 2.3: Útlumy v jednotlivých částech OBS [8].

- **Výkon vysílací LED ( $P_{LD}$ )** - samotný výkon LED diody určuje základní úroveň výkonu který dokáže optická soustava přenést. Proto se snažíme dosáhnout co největší účinnosti tohoto prvku.
- **Účinnost vysílací vazby ( $\alpha_{v,LD}$ )** - účinnost vysílací vazby LED závisí na úhlové šířce a rozložení svazku vyzařovaném LD a na numerické apertuře vysílací optické soustavy. V decibelové míře se tato účinnost vyjádří jako  $\alpha_{v,LD} = |10 \log \frac{P_{VOS}}{P_{LD}}|$ , kde  $P_{VOS}$  je výkon dopadající na aperturu vysílací optické soustavy. V praxi je možno předpokládat, že útlum vazby je přibližně 1,5 dB.
- **Útlum šířením ( $\alpha_{VP}$ )** - útlum šířením je určen vztahem  $\alpha_{VP} = |20 \log \frac{P_{L_0}}{L_0 + L_{VP}}|$ , kde  $L_{VP}$  je vzdálenost mezi hlavicemi spoje a  $L_0$  je tzv. pomocná délka, která udává vzdálenost čočky od vyzařující LED. Tato vzdálenost  $L_0$  se vyjádří dle vzorce  $L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}}$ , kde  $D_{VOS}$  je průměr vysílací optické soustavy a  $\varphi_{VS}$  je úhlová šířka vysílaného svazku.
- **Zesílení přijímací optické soustavy ( $\gamma_{POS}$ )** - to je dáno poměrem ploch přijímací a vysílací apertury, rozložením intenzity v Gaussovu svazku a umístěním středu přijímací apertury v ose Gaussova svazku. Vyjádření v decibelové míře je  $\gamma_{POS} = |20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} + 3 \text{ dB}|$ , kde  $D_{POS}$  je průměr přijímací optické soustavy.
- **Účinnost přijímací optické soustavy ( $\alpha_{v,FD}$ )** - závisí (za předpokladu konstantního ozáření přijímací apertury) na poměru aktivní plochy fotodiody  $A_{FD}$  a velikosti skvrny  $A_{spod}$ , kterou v ohniskové rovině přijímací optické soustavy vytváří přijaté světlo. Pro  $A_{FD} > A_{spod}$  je  $\alpha_{v,FD} = 0 \text{ dB}$ .
- **Rezerva spoje ( $\rho_{atm}$ )** - rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí  $\rho_{atm}$  lze odvodit z dlouhodobého měření útlumu atmosférického přenosového prostředí (APP). Například je možno zvolit  $\rho_{1,atm} \cong 6 \text{ dB/km}$ .
- **Minimální hodnota poměru signálu k šumu ( $SNR_0$ )** - hodnota se stanovuje v závislosti na typu modulace a požadované chybovosti ( $BER$ ). Pro intenzitní

modulaci typu OOK a chybovost spoje  $BER = 10^{-6}$  je  $SNR_0 = 13,5$  dB. Minimální detekovatelný výkon přijímače  $P_{min}$  závisí na přenosové rychlosti, typu použité fotodiody a šumových parametrech předzesilovače. Pro fotodiodu PIN a přenosovou rychlost  $v_I = 10$  Mbit/s bývá hodnota minimálního detekovatelného výkonu přijímače  $P_{min} \cong -43$  dBm. Citlivost přijímacího systému je definovaná jako minimální úroveň přijatého optického výkonu  $P_0$ , která je nutná k dosažení stanovené hodnoty  $SNR_0$  a vyjádří se  $P_0 = P_{min} + SNR_0$ .

- **Dynamika přijímače ( $\Delta_P$ )** - pro dynamiku přijímače je definována tzv. oblast dynamiky jako  $\Delta_P = P_{max} - P_0$ , kde  $P_{max}$  je saturace přijímače. Tato oblast přijímacího systému je vzhledem k vysoké míře fluktuací přijímaného výkonu (vliv šumu APP) významnou veličinou. Její hodnota v decibelové míře bývá  $\Delta_P \cong 30$  dB.
- **Útlum nedokonalostí spoje ( $\alpha_z$ )** - útlum zahrnuje nedokonalé zamíření hlavic spoje, což způsobují různé vlivy jako jsou nezkušenost obsluhy při zaměřování, mechanické deformace úchytu hlavice při aretaci, teplotní deformace konzol a pod. Empiricky bylo zjištěno, že útlum  $\alpha_z$  nepřevyšuje hodnotu 1,5 dB.

## 3 ETHERNET

V další části této práce se budeme zabývat prací s přímými daty, jejich adresováním, kódováním, modulací a sdílení prostřednictvím komunikačních sítí mezi jednotlivými stanicemi. K tomuto účelu bylo vyvinuto mnoho systémových rozvržení z nichž jedno z nejvíce využívaných je systém ethernetu. Technologie ethernetu je konstruována na principu čtení dat ze sítě všemi stanicemi v jeden okamžik. Příslušné stanice čtou data v kterých hledají svoji zakódovanou adresu obvykle posílanou na předních bitech datového paketu (definovaného rámce dat). V případě že adresu naleznou považují datový paket za vyhovující a načtou z něj posílaná data. V opačném případě nereagují a vyčkají náhodně generovaný interval pro pokus o načtení dalších dat, aby nedocházelo ke kolidujícím stavům. Tento systém začala využívat jako první společnost Xerox, která ho následně nechala patentovat a standardizovat. Poté ho začaly využívat mnohé další firmy, které k němu vytvářely mnoho dalších variací. Z hlediska vývoje je ethernet rozdělen na:

- **Ethernet** - první standard tohoto systému pracující na přenosové rychlosti 10 MB/s, jenž využíval k přenosu koaxiální kabel, kroucenou dvoulinku nebo optické vlákno.
- **Fast Ethernet** - rychlejší verze s přenosovou rychlostí 100 Mb/s definovaná standardem IEEE 802.3u. Vlastnostmi a kódováním se dosti podobá jeho starší verzi. V současné době je zatím asi nejvíce používaná varianta tohoto systému.
- **Gigabit Ethernet** - další nárůst přenosové rychlosti na 1 Gb/s kde přenos dat je opět ve stejném formátu. V prvních verzích byla konstrukce uvedena pouze pro optické vlákno (IEEE 802.3z), později byla doplněna i varianta pro kroucenou dvojlinku (IEEE 802.3ab).
- **Desetigigabitový Ethernet** - tato varianta představuje poslední standard přijatý v roce 2003 pod názvem IEEE 802.3ae. Varianta je určena zatím jen pro optický kabel.

Další možnosti přenosu jsou nadále zdokonalovány a předpokládá se další navýšení standardu na 100 Gb/s.

### 3.1 100 BASE Fast Ethernet

Z hlediska návrhu komunikačního spoje s rychlostí přenosu 100 Mb/s se zaměříme na skupinu 100 Mb ethernetu. Tato skupina se dá rozdělit ještě do podskupin podle možnosti uzpůsobení vedení pro datový tok [15]

- **100Base-TX** - Tato varianta využívá přenos s použitím UTP kabelu kategorie 5 (kroucené dvojlinky uzpůsobené na přenos do 100Mb/s). Původně pracovala pouze v režimu half-duplex (jednosměrná komunikace v jeden okamžik) později byla rozšířena na full-duplex (obousměrnou komunikaci v jednom okamžiku)
- **100Base-T2 (T4)** - Varianta vhodná pro starší rozvody strukturované kabeláže využívající dva nebo čtyři páry UTP kabelu.
- **100Base-FX** - Varianta využívající dvojici optických vláken k přenosu dat. Vhodná do prostředí se silným elektromagnetickým rušením.

## 3.2 Kódování

Při přenosu dat je důležité zajistit jejich bezpečnou cestu od vysílače k přijímači, případně sesynchronizování nebo oddělení jednotlivých částí přenášených dat. K tomuto účelu slouží kódování datových toků (signalizační metoda používá v telekomunikační systém pro účely přenosu), což je prováděno rozdělením dat do definovaných polí a přiřazení specifikovaného algoritmu pro rozeznání napětových úrovní pro příslušný stav jednotlivých bitů. Nejčastěji používané jsou dvoustavové, ovšem někdy i tři a více stavové signály. Pro společné použití tohoto kódování byly ustanoveny přesně definované protokoly. Pro příklad si uvedeme některé používané typy kódování a jejich srovnání [16]:

### 3.2.1 Kódování Manchester

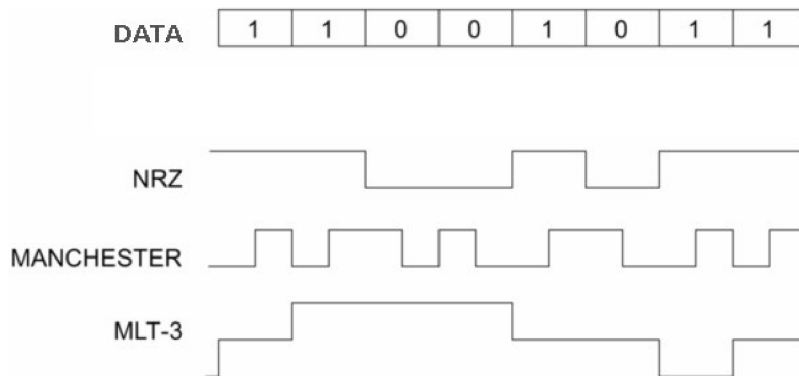
Tento typ kódování je prováděn vyjádřením logických úrovní změnou signálu. Tedy sestupnou (pro log. 0) nebo vzestupnou (pro log. 1) hranou. Výhodou Manchester kódování je vyšší odolnost vůči rušení, zjednodušení synchronizace při synchronních přenosech a konstantní střední hodnota. Podstatnou nevýhodou je ovšem potřeba dvou bitů na vyjádření jednoho datového bitu, čímž je způsobena potřeba dvojnásobné frekvence. Jedná se o starší metodu využívající se nejvíce u 10BASE technologií.

### 3.2.2 Kódování NRZ

Kódování tohoto typu se odvíjí od názvu této metody tedy "Non Return to Zero", což znamená, že při značení logických úrovní se v kódu vyskytuje pouze nízká a vysoká úroveň a nepoužívá se nulové napětí. Jedná se o základní kód, který se využívá na velmi krátké vzdálenosti. Díky nenulové složce je problematická jeho obnova. Vysoká úroveň značí log.1 nízká log.0.

### 3.2.3 Kódování MLT-3

Kódování MLT (Multi-Level Transmit) je kód linky, který používá tři napěťové úrovně. Toto rozhraní vyzařuje méně elektromagnetického rušení a vyžaduje menší šířku pásma než většina ostatních binárních nebo ternárních rozhraní, které fungují na stejném datovém toku. Inicializace log. 1 se vytvoří přechodem z jednoho stavu na další dle stanovené posloupnosti  $-1 \rightarrow 0 \rightarrow +1 \rightarrow 0 \rightarrow -1$ . Žádná změna identifikuje log. 0.



Obr. 3.1: Porovnání metod kódování. [16]

## 3.3 Formátový rámeček

Dále se pro zlepšení bezpečnosti signálu, snížení chybovosti, adresaci nebo synchronizaci využívá rozdělení datového toku na jednotlivé formátované rámce. Pro datový tok ethernetu se využívá nejčastěji rámeček 802.3, Ethernet IIo [17], [16]:

Preamble	SFD	MAC cíle	MAC zdroje	Typ/délka	Data a výplň	CRC32	Mezera mezi rámečky
7× oktet 10101010	1× oktet 10101011	6 oktetů	6 oktetů	2 oktety	46-1500 oktetů	4 oktety	12 oktetů
64-1518 oktetů							
72-1526 oktetů							

Obr. 3.2: Ethernetový rámeček. [17]

- **Preamble** - tvar 10101010..., dočasná synchronizace vysílače a přijímače, ale pouze do 10 Mb/s. Vyšší rychlosti jsou již synchronizované jinak. V nich slouží pouze k uchování kompatibility.



- **SFD** - Jednobařtové pole detekující konec synchronizace a začátek datového rámce. Obsahuje sekvenci bitů 10101011.
- **MAC cíle** - Pole obsahující MAC adresu cíle. Můžė v ní být zahrnuto adresování i několika cílům najednou.
- **MAC zdroje** - Pole obsahující MAC adresu zdroje. Lze poté dohledat v rámci bezpečnosti zdroje vysílaného signálu.
- **Typ/délka** - Dle uvedených hodnot určuje typ nebo délku přenášených dat. Jestliže je uvedená hodnota menší než 0x600 v hexadecimální soustavě, pak určuje délku rámce. V opačném případě udává hodnotu protokolu vyšší vrstvy.
- **Data a výplň** - Obsahuje samotná přenášená data, které musí být dlouhé od 64 do 1500 bajtů. Při nevyplnění minimální hodnoty se do datového rámce doplní automaticky detekovaná výplň bitů.
- **CRC32** - Někdy také nazývané FCS je pole pro kontrolní součet celého rámce. Při odesílání se do tohoto pole zakóduje kontrolní součet, a při přijímání se stejným algoritmem ověří jeho správnost. Při neshodném výsledku je rámec vyhodnocen jako chybný a tím ignorován.

Mezi těmito rámci je vložena mezera dvanácti bajtů.

## 3.4 Modulace

Modulace slouží k přetvoření datového signálu na signál který má vhodné vlastnosti k přenosu na dlouhé vzdálenosti. Princip spočívá v přeměně změn amplitud v signálu na změny dobře přenositelného signálu. Při optických spojích lze definovat několik způsobů modulace a přeměny elektrické energie na optickou:

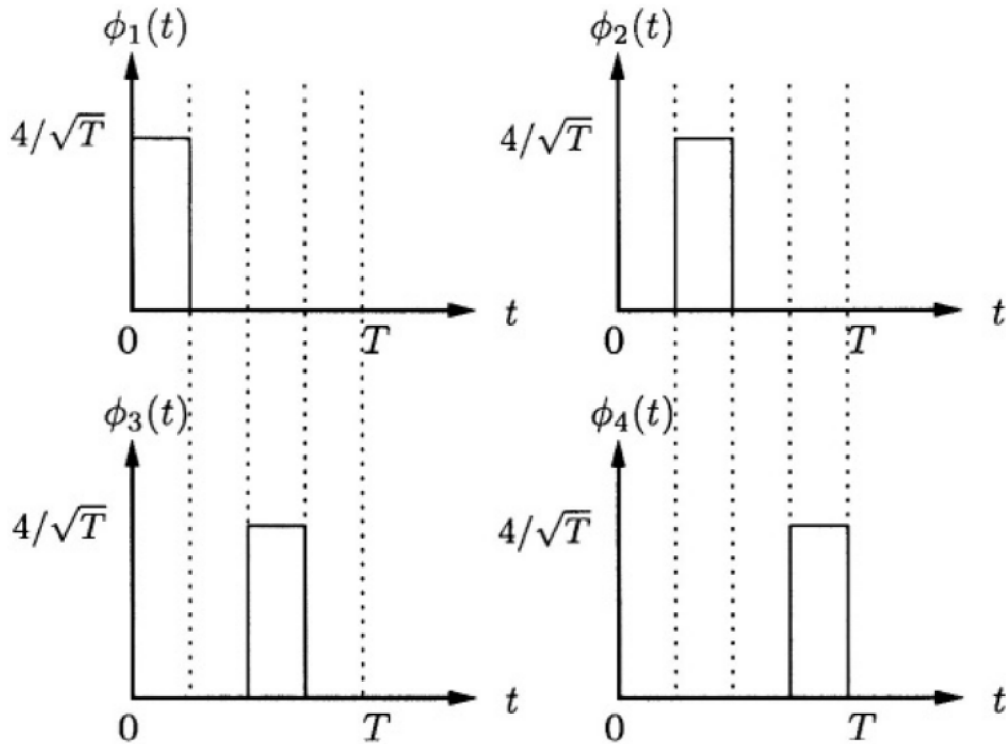
### 3.4.1 Modulace on-off keying (OOK)

Tento typ modulace je postaven na nejjednodušším principu klíčování, kdy při změně úrovní napětí na vstupu se tato změna přeneše na velikost výkonu vyzářeného optického signálu na výstupu. V digitální formě signálu to znamená, že při logické úrovni "1" je optický výkon vyzářujícího prvku na maximum, naopak v logické úrovni "0" je optický výkon roven nule. Jistou alternativou pro rychlejší přenos je i zmenšení pracovní oblasti spínání mezi logickými úrovněmi. V mnoha konvenčních kanálech, je tato modulace také známá jako non-return-to-zero (NRZ) kódování. Má výhodu možnosti vysílání i během nulové úrovně čímž šetří energii. Nevýhodou však je náchylnost na rušení, kdy jsou přijímány i falešné rozhodovací úrovně a tím se zvyšuje chybovost komunikace. Kvůli nekonstantní amplitudě se pro dobrý příjem dat za fotodetektor obvykle zapojuje zesilovací prvek a obnovovač signálu.

Tato modulace se uplatňuje v nepříliš složitých komunikačních aplikacích jako je například přenos IrDA [18].

### 3.4.2 Pulzně polohová modulace (PPM)

PPM je spolu s OOK standardně používaná technologie optické modulace. Princip této metody je založen na změně pozice vysílaného signálu vztaženého k pozici signálu synchronizačního. Tedy každá perioda je rozsekána na několik úseků a tyto úseky mají definovanou hodnotu velikosti amplitudy. V případě logických úrovní jsou definovány pouze dva úseky s co největším rozestupem. Dále je v každé periodě signálu vyslán impuls který je dle úrovně na vstupu posunut v čase na předdefinovaný úsek periody. Pomocí stejného algoritmu se toto kódování demoduluje. Výhodou této metody je zvýšení vysílaného výkonu, jelikož se veškerá energie výkonu vyzáří v krátkém impulsu. K tomu je ovšem potřeba velice rychlého spínání vysílačích zařízení pro zajištění krátkého impulsu [7].

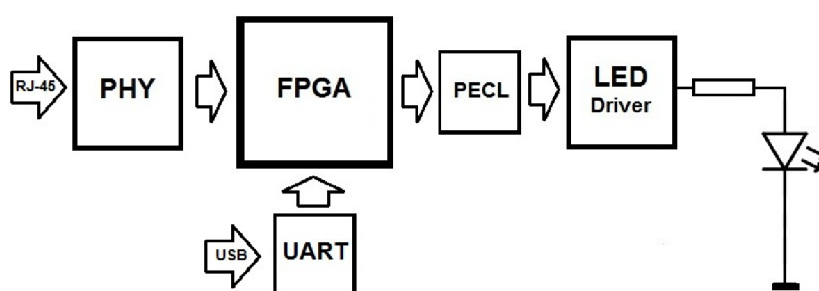


Obr. 3.3: Základní funkce PPM modulace [7]

## 4 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ OBS

### 4.1 Vysílač

Vysílač nám slouží k získávání dat ze sítě ethernet a k jejich uzpůsobení pro vysílání po OBS. V námi konstruovaném zařízení je tento převod realizován programovatelným hradlovým polem (FPGA) spolupracujícím s fyzickou vrstvou ethernetu prostřednictvím tzv. "Phyteru"(PHY) a na opačné straně s řídicím obvodem pro buzení LED diody. K tomuto zařízení jsou dále připojené obslužné nebo pomocné obvody.



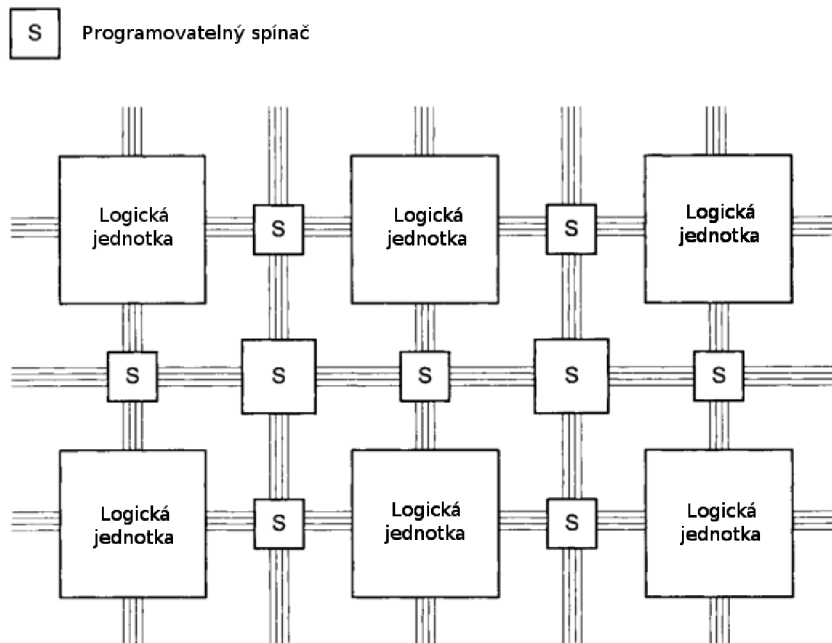
Obr. 4.1: Blokové schéma vysílače OBS.

#### 4.1.1 PHY

Tento chip nám umožňuje číst data ze sítě ethernet, kde je použito třístavové MLT-3 kódování a na výstupu přeformulovat tento signál na NRZ kódování. Dále je zde realizováno automatické nastavení ethernet komunikace tzv. autonegotiation, což znamená, že PHY zjistí nejvyšší možnou podporovanou rychlost připojeného zařízení, a pokud ji podporuje také, nastaví se obě zařízení na tuto jednotnou rychlost. Pro spojení s blokem FPGA, kde bude umístěna zjednodušená verze řídicí vrstvy (MAC, media access control) bude provedena komunikace přes nezávislé rozhraní MII, které umožňuje rychlosti přenosu 10 nebo 100 MB/s. V tomto rozhraní jsou data vedeny po čtyřech trasách (dvě navzájem invertované pro Tx a to stejné pro Rx). Dále se v tomto bloku využívá převod 4b/5b což přispívá k omezení chybovosti. Každou skupinu 4 po sobě jdoucích bitů převede PHY dle předem stanoveného slovníku na formát dlouhý 5 bitů, přičemž v tomto slovníku jsou zavedeny na jedno pěti bitové slovo vždy alespoň dva logické přechody. Nevyužité kombinace těchto slov mohou být použity například jako ukazatel na chybu či jiné upozornění. Nevýhodou však je snížení rychlosti ze 125 Mb/s na 100 Mb/s. Tyto bitová slova jsou za sebe řazeny sériově a posílány dále do FPGA.

## 4.1.2 Programovatelné hradlové pole FPGA - TX

Programovatelné hradlové pole (FPGA, Field programmable gate array) je zařízení, které obsahuje dvojrozměrné pole programovatelných logických obvodů a spínačů. V tomto integrovaném obvodu se logická hradla programují a spínači navzájem propojí pomocí hardwarových popisových jazyků (HDL). Jedním z nejpoužívanějších programovacích nástrojů pro tento jazyk jsou například Verilog, nebo VHDL. Programování v těchto nástrojích je principiálně stavěno na základech jazyka C, ačkoli se mírně liší v syntaxi. Výhodou FPGA je její komplexnost a možnost přeprogramovatelnosti po výrobě zařízení. Nevýhodou ovšem zůstává potřeba znovunahrání vytvořeného programu po každém spuštění, jelikož FPGA je obvod volatilní tedy závislý na napětí. Pro tento účel je potřeba externí paměť, ze které je po spuštění zařízení nahrána konfigurace FPGA. V tomto zařízení slouží toto hradlové pole jako interface se zjednodušenou MAC vrstvou k řízení přístupu do systému ethernet. Obvod rovněž jako PHY používá autonegotation funkci. Dále se v tomto bloku provádí kódování 8b/10b k dosažení lepší kontroly dat, zajišťující disparitu a DC-rovnováhu. Přitom je splněn potřebný počet změn na deset bitů zajištěním podmínky, že odesílané logické stavy musí být změněny alespoň jednou za pět po sobě jdoucích bitů. Výsledný datový tok se vysílá sériově do řídicího obvodu vysílací LED diody [19].



Obr. 4.2: Vnitřní struktura FPGA [19].

### 4.1.3 Budič LED

Tento obvod slouží k vysokorychlostnímu spínání a kontrole proudu vysílací LED diodou. Je potřebné aby tento obvod umožňoval co nejkratší přechod mezi stavy. Na základě vstupních datových úrovní tento obvod spíná LED a tím vytváří optickou modulaci OOK která je vyzářena do přenosového prostředí. Existuje mnoho typů těchto obvodů, které jsou většinou specializovány na přesnou aplikaci. Nevýhodou je dostupnost v méně kusovém množství.

### 4.1.4 UART

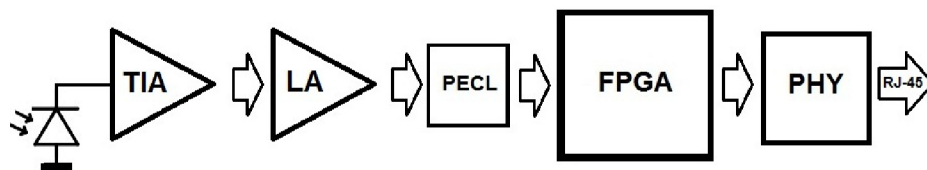
Universální asynchronní přijmač/vysílač (UART, Universal Asynchronous Receiver Transmitter) je standardizovaný obvod pro asynchronní sériovou komunikaci mezi mikrokontrolérem a vyšším zařízením (např. PC). V této práci je tento obvod realizován pro programovatelnost FPGA a PC přes USB port. Obvod převádí data řazená přes USB na řazení, které dokáže přijímat FPGA. Univerzální označení znamená, že formát dat a přenosové rychlosti jsou konfigurovatelné.

### 4.1.5 PECL

S rostoucím počtem integrovaných digitálních obvodů na trhu a tím i vytvořených nových technologií bylo potřeba zajištění kompatibility mezi nimi. K přizpůsobení mezi těmito obvody se využívá tzv. PECL terminátor (positive emitter-coupled logic) což je volně přeložitelné jako pozitivní emitorově vázaný logický člen. Ten zajistí převod dat mezi výstupem jednoho obvodu a vstupem navazujícího obvodu s rozdílnými napěťovými úrovněmi. Existuje mnoho standardizovaných napěťových pásem, k nimž je pomocí těchto obvodů realizována konverze.

## 4.2 Přijímač

Do přijímače přichází spolu s užitečným signálem také rušivé složky které je nutno odfiltrvat nebo alespoň nějak kompenzovat. Navíc tento signál vlivem již zmiňovaných útlumových vlivů se do přijímače dostává tvarově rozladěný a utlumený. Proto je nutné tento signál obnovit a zesílit než z něj budeme moci číst potřebná data. V přijímači jsou tedy použity transimpedanční zesilovač který nám zesílí signál, následně limitující zesilovač který zajistí konstantní amplitudu signálu jdoucího do FPGA a znovu přizpůsobující obvody PECL.



Obr. 4.3: Blokové schéma přijímače OBS.

### 4.2.1 Transimpedanční zesilovač (TIA, Transimpedance Amplifier)

Tento blok slouží ke snímání malých změn proudu na vývodech přijímací fotodiody a následnému zesílení a převodu na změnu napětí. Transimpedanční zesilovače jsou daleko univerzálnějšími prvky než obyčejné operační zesilovače. Zesílením je kompenzován útlum, ke kterému dochází při přenosu přes APP. Transimpedanční zesilovače jsou svými vlastnostmi předurčeny k vysokorychlostnímu zpracování dat. Na bázi transimpedančních zesilovačů se vyvíjí progresivní směr v obvodové technice kmitočtových filtrů [20].

### 4.2.2 Limitující zesilovač (LA, limiting amplifier)

Tento zesilovač je v zařízení použit k omezení a stabilizaci napětí na požadované úrovni, tedy k zabezpečení citlivých integrovaných obvodů. Zesilovač vyrovnává napětí na výstupu při kolísající úrovni napětí na vstupu. Nemůže tedy dojít k přetížení a následnému poškození zařízení vlivem přebuzení fotodiody. Kolísající změny může způsobovat vychylování optického svazku z přijímací optiky.

### 4.2.3 FPGA - RX

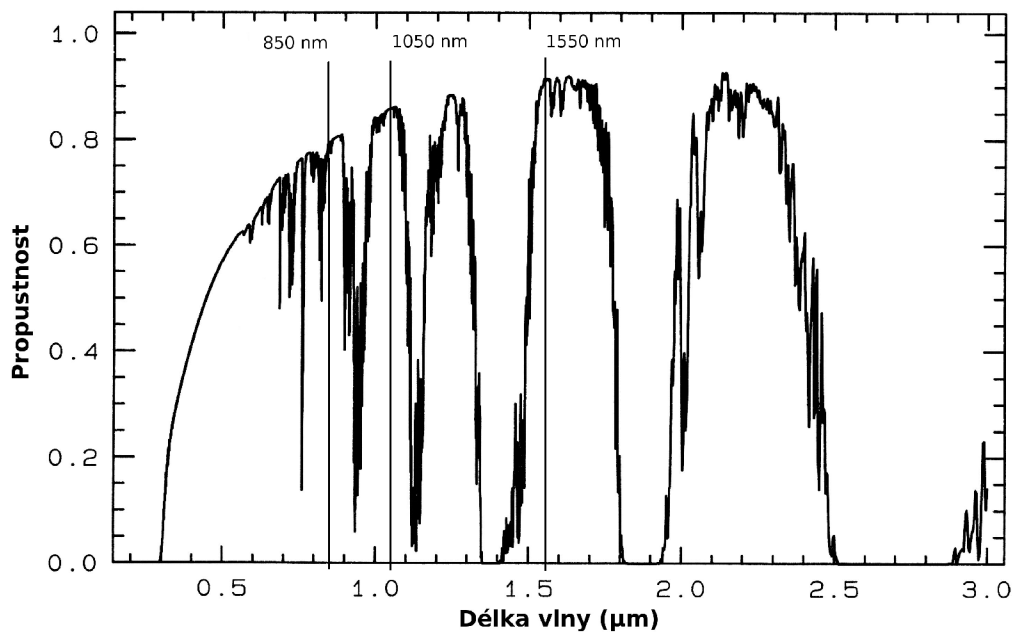
Přijímaný zesílený signál nemá potřebné tvarové vlastnosti ke čtení a zpracování dat v něm uložených. V již použitém FPGA je proto realizována obnova užitečného signálu (CDR, Clock data recovery). Ta se provede zesílením, přefiltrováním a vyrovnáním signálu, který je následně rozdělen podle přesně definovaného hodinového signálu a dál jsou posílány úseky signálu s jmenovitými hodnotami logických úrovní. Z tohoto CDR bloku poté FPGA provede deserializaci a dekodování 8b/10b kódu inverzním algoritmem jako tomu bylo při kódování odesílaného signálu. Na výstupu jsou nakonec odesílána čtyřbitová slova do PHY.

## 5 NÁVRH SPOJE

V návrhu spoje se řeší optimalizace vysílače i přijímače pro co nejlepší přenesený výkon vhodným výběrem komponentů, vytvořením výkonové bilance spoje, bezpečnost zařazením spoje do příslušné bezpečnostní třídy a dostupnost, která je odvozena od statistického rozboru meteorologických vlivů v čase.

### 5.1 Výběr komponentů

Výběr komponentů se odvíjí od zvolení pásma ve kterém má být OBS použit. Toto pásmo lze určit pomocí následujícího grafu z kterého vybereme nejlepší propustnost atmosféry pro optický signál. Propustnost atmosféry je závislá na délce vlny přenášeného signálu a velikosti částic v atmosféře. Jestliže jsou tyto dva parametry přibližně srovnatelné, dochází k rozptylu a tedy i velkým útlumům. Proto se snažíme volit vlnové délky v pásmech propustnosti. Nejvíce používaná pásma jsou v okolí 850 nm, 1050 nm a 1550 nm, z nichž nejekonomičtější z pohledu dostupnosti a ceny součástek je zde pásmo 850 nm, na něhož je dimenzována i naše optoelektronická soustava.



Obr. 5.1: Propustnost optického záření atmosférou v závislosti na vlnové délce. [16]

### 5.1.1 Optimalizace vysílače

Po výběru optického pásma je nejdůležitější částí optického vysílače samotný zdroj generující optický výkon. Obecné srovnání zdrojů je seřazeno zde

Tab. 5.1: Srovnání využívaných optických zdrojů

	Výhody	Nevýhody
<b>LED</b>	Jednoduchost, nižší cena, snadnější regulace teploty, lepší bezpečnost pro oči	Nekoherentnost záření, menší výkony, modulace do stovek MHz, složitější kolimace paprsku
<b>Laserová dioda</b>	Koherentní záření, modulace do několika GHz, vysoký optický výkon	Vyšší cena, složitost ovládání, nebezpečné pro oči

Jelikož je LED levnější a jednodušší alternativa zdroje než laserová dioda, zvolili jsme ji do našeho vysílače. Tento zdroj není tak závislý na teplotě, a proto nebude použito zařízení k regulaci teploty. Ovšem nevýhodou LED ve srovnání s LD je mnohem širší vyzařovací charakteristika, která musí být kolimována do úzkého optického svazku. Při výběru vysílacího i přijímacího prvku musíme dále řešit maximální rychlost spínání. Jelikož při přenosu bude využita rychlost 100 Mb/s s digitální amplitudovou modulací OOK, je potřebná doba přechodu mezi jednotlivými indikovanými stavy  $\delta_{LED} \leq 10$  ns. Těmto výše uvedeným parametrům vyhovuje například námi použitá LED dioda typu OP245PS od firmy OPTEK Technology. Pro zajištění rychlejšího spínání lze pracovat v aktivní oblasti neúplného uzavření LED diod. K praktickému návrhu jsou níže popsány základní parametry použité vysílací LED

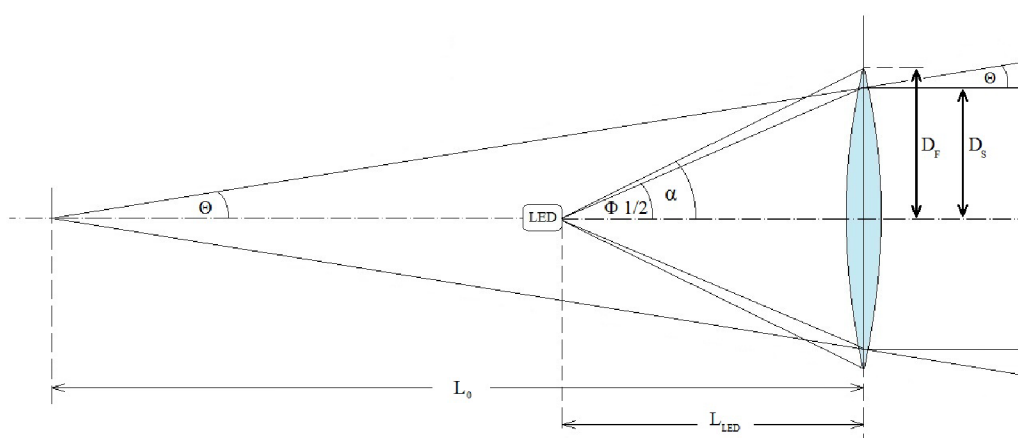
Tab. 5.2: Základní parametry vysílací LED OP245PS

Značka	Veličina	Hodnota	Jednotka
$P_{LED}$	výkon	10	mW
$\lambda$	délka vlny	850	nm
$\Phi_{1/2}$	Vyzařovací úhel v bodě polovičního výkonu	18	stupeň
$\tau$	doba spínání	10	ns

Nastavování divergence je prováděno vysílací aperturou, kde se snažíme pokrýt co největší plochu zmiňované vyzařovací charakteristiky. Divergence tohoto svazku za



vysílací aperturou je v řádu jednotek miliradiánů. Vhodným nastavením vzdálenosti mezi aperturou a zdrojem lze minimalizovat ztráty vzniklé na tomto přechodu. Výběr apertury se odvíjí od vyzařovacího úhlu použitého optického zdroje. Jelikož potřebujeme rozšiřující paprsek zkolimovat bude použita spojná čočka. Vzdálenost od čočky bude odpovídat přibližně ohniskové vzdálenosti použité čočky, avšak je nutné brát v úvahu, že výstupní svazek bude mít nepatrnou divergenci. Tato divergence je vytvořena proto, aby došlo k rozšíření stopy na vstupu přijímače a tím vznikla rezerva pro vychýlení svazku vlivem turbulencí. Proto je od celkové velikosti čočky  $D_F$  odečtena rezerva na nastavování divergence. Lze zvolit například milimetr z každé strany čočky. Tím vznikne nová pomocná délka  $D_S$ .



Obr. 5.2: Parametry spojn  apertury

Z tohoto obrázku je patrn , že zjištění potřebn  vzdálenosti ohniska čočky  $L_o$  dosáhneme použit m goniometrických funkcí

$$\operatorname{tg}(\Phi_{1/2}) = \frac{D_S}{L_o}, \quad (5.1)$$

 pravou dostáváme vztah

$$L_o = \frac{D_S}{\operatorname{tg}(\Phi_{1/2})}. \quad (5.2)$$

V katalogu výrobce optických čoček zvolíme aperturu, kter  nejvíce vyhovuje spo ten m parametrům čočky. Pro námi vybran  zdroj je mo n  použit nap říklad aperturu THORLABS LB1811.

### 5.1.2 Optimalizace přijímače

Pro každý spoj je nutné k zajištění správné funkce detekčních prvků určit potřebný minimální detekovatelný optický výkon, aby byla zajištěna požadovaná kvalita přenosu, ohodnocená chybovostí BER. Chybovost spoje je nejčastěji první vstupní veličinou, na kterou je OBS dimenzován. Je vyjádřením poměru chybně přenesených bitů na celkový počet přenesených bitů. Pomocí požadované chybovosti BER se následně odvozuje potřebný odstup signálu od šumového pozadí vyjádřený konstantou SNR. Pro přepočítání chybovosti na poměr SNR je možné vyjít z následující tabulky

Tab. 5.3: Přepočítání parametru BER na poměr SNR [23]

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

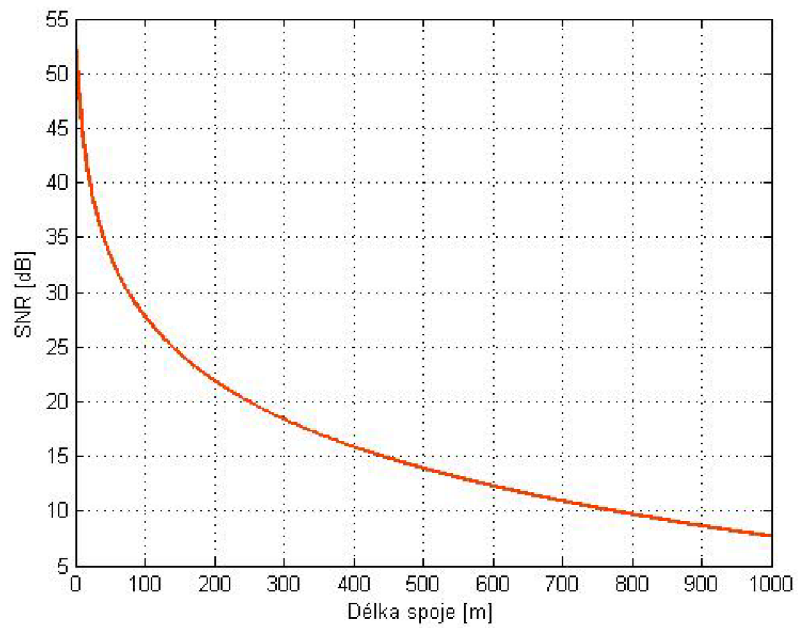
Pokud bychom chtěli znát přesnější vyjádření SNR z hodnoty BER, lze využít chybovou rovnici, ze které odvodíme vztah mezi chybovostí a potřebným odstupem signálu od šumu [23]

$$BER = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{SNR}}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (5.3)$$

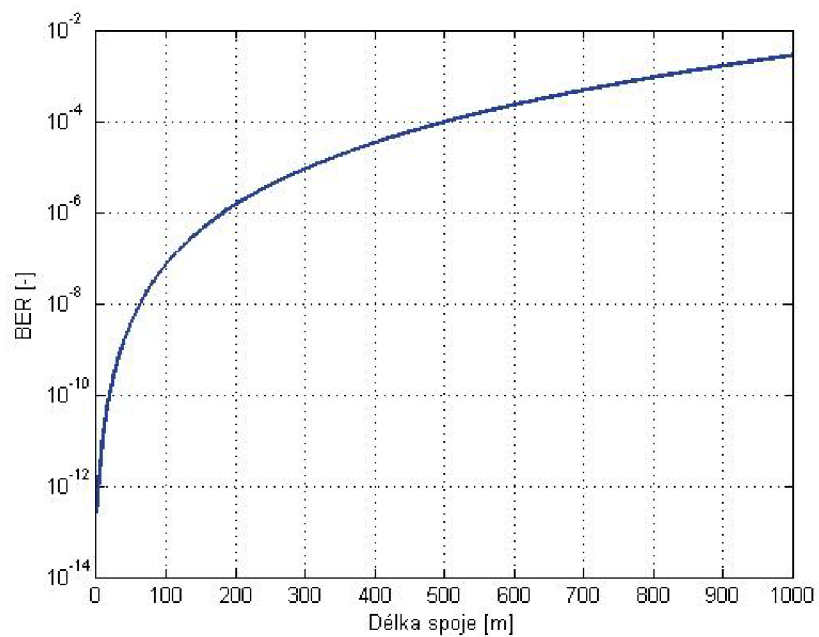
kde  $\operatorname{erf}$  vyjadřuje právě chybovou rovnici

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx. \quad (5.4)$$

Jestliže se tedy bude vlivem rostoucí vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem zmenšovat poměr SNR, bude výsledný přenos vykazovat větší chybovost. Výsledná chybovost BER bude tedy stoupat, jak je vidět z následujících grafů



Obr. 5.3: Závislost SNR na délce spoje



Obr. 5.4: Závislost BER na délce spoje

Pro optickou amplitudovou modulaci OOK je možné použít například chybovost  $BER = 10^{-9}$ . Na základě známé hodnoty odstupu signálu od šumu SNR, je odvozena

veličina NEP (Výkon ekvivalentní šumu) sloužící pro popis šumových vlastností konkrétní fotodiody. NEP určuje střední výkon harmonicky modulovaného optického výkonu, při kterém je střední hodnota napětí na fotodiodě rovna standardní odchylce šumového napětí [8]. Tato hodnota bývá většinou uvedena výrobcem a je vztažená na jednotkovou šířku pásma přenosu. Pro získání konkrétní hodnoty úrovně výkonu šumového pozadí pro fotodiodu v jednotkách dBm tedy vynásobíme  $NEP_1$  dodávaný výrobcem odmocninou šířky pásma  $B_m$  a zlogaritmujeme

$$NEP = 10 \log \left( \frac{NEP_1}{10^{-3}} \sqrt{B_m} \right). \quad (5.5)$$

Z hlediska geometrického zisku fotodiody mají největší vliv velikost přijímací čočky a správné nastavení zaostřovací soustavy čoček. Důvodem k tomuto postupu je snaha o předání co možná největší části výkonu dopadajícího na přijímací aperturu fotocitlivému prvku. Při tomto ostření je nutné soustředit veškerý optický výkon na aktivní plochu fotodiody. Tato podmínka se realizuje buď klasickou čočkou, nebo lze použít Fresnelovu čočku, která se od klasické čočky liší zejména menší hmotností. K zaostření paprsku na aktivní plochu fotodiody se aplikuje stejný postup jako byl použit při kolimaci vysílaného optického svazku.

## 5.2 Šum na fotodetektorech

V reálném optickém přenosovém prostředí lze najít několik druhů vysokofrekvenčního náhodného signálu o velice nízké amplitudě. Tyto vlnění jsou v elektronice označovány jako "šum". Tyto parazitní jevy se detekují spolu s přijímaným užitečným signálem na detektorech a tím zvyšují pravděpodobnost chyby detekce. V optických bezkabelových spojkách nás zajímá hlavně výstřelový a tepelný šum [23].

### 5.2.1 Výstřelový šum

Výstřelový šum je označení pro souhrn kvantového šumu, šumu temného proudu a šumu pozadí. Tento šum je způsobený dopadáním fotonů na fotodiodu, čímž jsou náhodně generovány nosiče a tím i proud kterým jsou přenášeny. Vstupní výkon lze v ideálním případě považovat za konstantní, což znamená, že počet dopadajících fotonů za jednotku času je v průměru konstantní. Výstřelovým šumem potom rozumíme časově proměnnou odchylku od této konstantní hodnoty. Rychlost a počet nosičů odpovídá konstantní hodnotě proudu těmito nosiči vytvořené. Doba přechodu nosiče odpovídá době přenášeného impulzu. Impulzy jsou shodné pouze generované náhodně, což má za následek náhodné výchylky kolem průměrné hodnoty, tedy šum v jejím okolí. Tuto průměrnou hodnotu výstřelového šumu vyjadřuje následující rovnice [24]

$$i_s = \frac{\eta e P}{h f}, \quad (5.6)$$

kde  $e$  je elementární elektrický náboj,  $\eta$  představuje kvantovou účinnost fotodetektoru,  $P$  dopadající optický výkon,  $h$  je Planckova konstanta a  $f$  je frekvence záření. Pokud známe nyní střední hodnotu proudu výstřelového proudu, lze dopočítat i výkon způsobený tímto šumem na odporu fotodiody  $R_{FD}$  [24]

$$P_V = 2e\Delta f(i_s + I_D)R_{FD}. \quad (5.7)$$

Zde  $\Delta f$  představuje šířku pásma přijímaného optického signálu a  $I_D$  je hodnota temného proudu, čímž rozumíme proud, který fotodioda generuje i za tmy. K těmto šumům lze ještě zařadit šum pozadí, který je generován rušivým optickým zářením okolního prostředí. Tento šum lze filtrovat zařazením polarizačního filtru na vstup přijímače [8].

### 5.2.2 Tepelný šum

Druhou složkou nejvíce ovlivňující detekční prvek je šum tepelný (také Johnsonův nebo Nyquistův). Zdrojem tohoto šumu je nahodilý pohyb elektronů v přijímacím obvodu reprezentovaném vstupním odporem fotodiody. Tento pohyb je způsoben skutečností, že každý elektron v obvodu při nenulové teplotě má svou vlastní energii. Proud šumu vznikající tímto pohybem je tedy závislý pouze na teplotě  $T_0$  v Kelvinech a je reprezentován rovnicí [24]

$$P_T = 4kT_0\Delta f, \quad (5.8)$$

kde  $k$  je Boltzmanova konstanta.

## 5.3 Šumové vlastnosti přijímače

Je-li známý šumový výkon detekčního prvku, lze do šumových vlastností přijímače zahrnout i aktivní prvky za přijímací fotodiody. Největší podíl na šumových vlastnostech přijímače má tedy transimpedanční zesilovač (ANALOG DEVICES AD8015) a limitující zesilovač (MAXIM MAX3645) formující příchozí snímání signál. Každý tento aktivní prvek má svůj vlastní šum  $P_{N-AMP}$  ekvivalentní jeho vnitřní šumové teplotě a zisk  $G$ , kterým je vstupní signál společně s parazitním šumem zesílen. Zisk i vstupní šum zesilovače lze obvykle získat od výrobce. Výkon šumu na výstupu zesilovače lze získat dle vztahu [27]

$$P_{N-OUT} = G(P_{Nin} + P_{N-AMP}). \quad (5.9)$$

Zde je možné jako výkon šumu na vstupu prvního kaskádně zapojeného zesilovače  $P_{Nin}$  zvolit parametr NEP, ke kterému jsou dále připočítávány šумы aktivních prvků v cestě signálu. Aplikací tohoto vztahu na oba zesilovače v přijímači získáme přibližný celkový výkon šumu na konci kaskádního zapojení vstupujícího do tvarovacích obvodů a řídicí logiky. Pro námi použité komponenty vychází tento výstupní šumový výkon 6,5 mW.

## 5.4 Výkonová bilance spoje

Výkonový diagram spoje je graf znázorňující veškeré útlumy případně zesílení signálu, způsobené jevy okolního prostředí na cestě přenosu optického svazku volným prostorem. Pomocí tohoto grafu lze navrhnout oblast dynamiky spoje, ve které je zařízení použitelné s dosažitelnou chybovostí BER. Dynamika spoje se dá vyjádřit jako rozdíl minimálního detekovaného výkonu na přijímači  $P_{RXmin}$ , kdy je ještě zaručena požadovaná chybovost BER a maximálního výkonu, kterého je schopný přijímač detekovat  $P_{RXsat}$  [8]

$$\Delta P = P_{RXmin} - P_{RXsat}. \quad (5.10)$$

Celkový útlum OBS je složen z několika dílčích útlumů které si lze shrnout do dvou základních [28]

$$\alpha_{tot} = \alpha_{geom} + \alpha_{atm}. \quad (5.11)$$

Prvním z nich je geometrické rozložení optického svazku šířícího se prostředím, přičemž dochází ke ztrátám vyjádřených pomocí geometrického útlumu  $\alpha_{geom}$ . Druhou složkou je  $\alpha_{atm}$ , která vyjadřuje ztrátu energie signálu vlivem působení atmosférického prostředí.

### 5.4.1 Geometrický útlum

Geometrický útlum je ve spoji přítomen vždy a je způsoben ztrátou energie vlivem divergence spoje. Tento útlum vzniká již při generaci optického výkonu na zdroji, kde je způsoben nerovnoměrným úhlovým rozložením světla. Jelikož je vzdálenost mezi zdrojem a vysílací aperturou velmi malá, lze předpokládat útlum  $\alpha_{LEDRX} \approx 2$  dB. Ke zdaleka největšímu útlumu ovšem dochází mezi vysílací a přijímací aperturou, i když je optický paprsek zčásti kolimován. Tento celkový geometrický útlum vyjádříme jako [28]

$$\alpha_{geom} = \alpha_{geom1} - \gamma_{geom} = \left| 20 \log \frac{D_{RX}}{D_{TX} + \varphi_t L_v} \right| - \gamma_{geom}, \quad (5.12)$$

kde  $\alpha_{geom1}$  je geometrický útlum spoje,  $D_{RX}$  velikost přijímací čočky,  $D_{TX}$  je velikost vysílací čočky,  $\varphi_t$  je úhlová šířka svazku,  $L_v$  je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem a  $\gamma_{geom}$  je zisk vyjádřený z následující rovnice [28]

$$\gamma_{geom} = \gamma_{dif} + \gamma_v = \left| 20 \log \frac{D_{RX}}{D_{TX}} \right| + 3,67dB. \quad (5.13)$$

Zde je  $\gamma_{dif}$  funkcí rozdílých velikostí přijímací a vysílací apertury a  $\gamma_v$  je vložený zisk daný nerovnoměrným rozdělením optické intenzity dopadající na přijímací aperturu.

Pro přesnější vyjádření geometrického útlumu ho lze určit z měřených rozdílů výkonů na vysílací a přijímací apertuře [8]

$$\alpha_{TX/RX} = P_{TX} - P_{RX}. \quad (5.14)$$

K tomuto útlumu zahrneme ještě útlum samotné vysílací čočky  $\alpha_{VOS}$  a krycího skla vysílače  $\alpha_{CW1}$ . Tyto hodnoty získáme buď od výrobce nebo experimentálně proměřením útlumu dané periferie průchodem světelného toku na využívané vlnové délce.

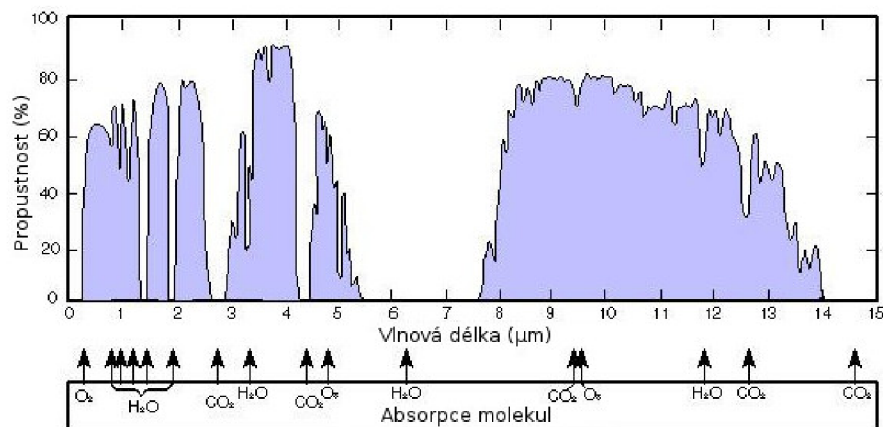
## 5.4.2 Meteorologické útlumy čisté atmosféry

Útlum v atmosféře je proměnnou veličinou a závisí na mnoha faktorech. V této části budou rozebrány ty, které ovlivňují spoj i při čisté atmosféře. Statické útlumy prostředí jsou kromě geometrie spoje způsobeny již na částicích, které jsou nedílnou součástí atmosféry a vyskytují se v ní vždy bez ohledu na meteorologickou situaci prostředí. Pro přesnější vyjádření výkonové bilance je tedy k tomuto modelu geometrické extinkce svazku připočten také útlum způsobený atmosferickými vlivy  $\alpha_{atm}$ , který vyjádříme pomocí následující rovnice [29]

$$\alpha_{atm} = \alpha_{ml} + \alpha_{al} + \beta_{ml} + \beta_{al}, \quad (5.15)$$

kde  $\alpha_{ml}$  a  $\alpha_{al}$  představují absorpční koeficienty pro molekuly a aerosoly,  $\beta_{ml}$  a  $\beta_{al}$  rozptylové koeficienty na molekulách a aerosolech. Ošetření absorpce na molekulárních částicích je uvažována již při výběru přenosového pásma, které je dimenzováno do okna propustnosti čisté atmosféry. Tato propustnost je dána zejména velikostí a koncentrací částic v přenosovém prostředí, což přímo ovlivňuje počet interakcí mezi fotony a těmito částicemi. Při těchto interakcích předává foton svoji energii jednotlivým molekulám a tím dochází k útlumu na přenosové trase.

Na obrázku 5.5 jsou uvedeny jednotlivé molekuly ovlivňující absorpci prostředí vzhledem k poměru velikostí částic a délky vln přenášeného pásma.



Obr. 5.5: Typy částic ovlivňující propustnost v čisté atmosféře [29].

Jestliže je tedy zabezpečen přenos signálu v okně propustnosti, můžeme absorpční koeficient pro čistou atmosféru zanedbat a počítat pouze s dominantními koeficienty rozptylu. Ten rozdělujeme z hlediska velikosti částic, na kterých k tomuto rozptylu dochází na Rayleighův, Mieův a geometrický rozptyl. K tomuto posouzení si definujeme poměrový parametr  $x_0 = 2\pi r_p/\lambda$ , kde  $r_p$  je poloměr velikosti částic obsažené v přenosovém prostředí.

Tab. 5.4: Rozdělení typů rozptylu v závislosti na velikosti atmosferických částic a úhlu rozptylu na nich vznikajícím pro  $\lambda = 850 \text{ nm}$  [29]

Typ částic	Rozptylový úhel [ $\mu\text{m}$ ]	Velikostní parametr $x_0$	Typ rozptylu
Molekuly vzduchu	0,0001	0,00074	Rayleighův
Částice oparu	0,1-1	0,074-7,4	Rayleighův-Mieův
Mlhové kapky	1-20	7,4-147,8	Mieův-Geometrický
Děšť	100-10000	740-74000	Geometrický
Sníh	1000-5000	7400-37000	Geometrický
Kroupy	5000-50000	37000-370000	Geometrický

Pro čistou atmosféru lze uvažovat útlum na částicích  $\alpha_{st} \approx 0,5 \text{ dB/km}$  [28], který je v atmosféře uplatněn vždy. Tento útlum je tedy závislý na délce spoje a po vynásobení touto délkou dostaneme  $\alpha_{atms}$ .



### 5.4.3 Dynamický meteorologický útlum

Se změnou počasí dochází také ke změnám přenosového prostředí a jeho útlumu. Následující část popisuje změnu útlumu v závislosti na meteorologické situaci prostředí, kde závislost extinkce na stavu atmosféry přibližně popisuje následující tabulka:

Tab. 5.5: Mezinárodní rozdělení útlumu prostředí v závislosti na meteorologické viditelnosti pro viditelnou oblast spektra [29]

Atmosferické podmínky	Srážky [mm/h]	Viditelnost [m]	Útlum [dB/km]
Velmi silná mlha		50	315
Silná mlha		200	75
Průměrná mlha		500	28,9
Mírná mlha	100	770	18,3
Velmi mírná mlha		1000 - 1900	13,8 - 6,9
	25	1900	6,9
Mírný opar		2000 - 2800	6,6 - 4,6
	12,5	2800	4,6
Velmi mírný opar		4000	3,1
	2,5	5900 - 10000	2 - 1,1
Čistý vzduch	0,25	18100 - 20000	0,6 - 0,54
Velmi čistý vzduch		23000 - 50000	0,47 - 0,19

Největší podíl na útlumu přenášeného signálu má mlha a s ní spojená meteorologická viditelnost. Lze extinkci v závislosti na viditelnosti popsat jako funkci Mieova rozptylu, kdy rozptyl bude maximální a tedy bude platit  $\frac{r_p}{\lambda} \approx 1$ . Poté lze útlum přibližně stanovit následující rovnicí [29]

$$\gamma_t(\lambda) \cong \beta_a(\lambda) = C_1(\lambda)^{-\delta}, \quad (5.16)$$

v níž  $C_1$  a  $\delta$  jsou konstantní parametry představující velikost částic a viditelnost a  $\lambda$  je operační vlnová délka. Vztah mezi meteorologickou viditelností a parametrem  $C_1$  nám umožňuje předefinovat viditelnost vztaženou k lidskému oku kde uvažujeme  $\lambda = 550$  nm na viditelnost pro jiné vlnové délky [29]

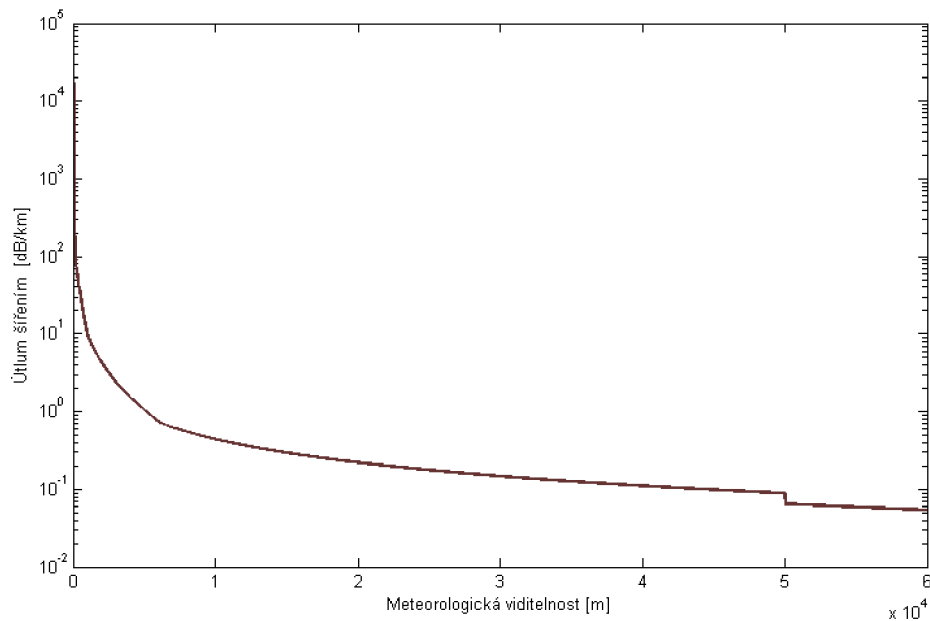
$$C_1 = \frac{3.91}{V}(0.55)^\delta. \quad (5.17)$$

Parametr  $\delta$  vychází z Kimova modelu v němž je rozdělen podle vzdálenosti meteorologické viditelnosti

Tab. 5.6: Hodnoty parametru  $\delta$  [7]

$\delta$	Viditelnost [km]
1,6	$V > 50$
1,3	$6 < V < 50$
$0,16V+0,34$	$1 < V < 6$
$V-0,5$	$0,5 < V < 1$
0	$V < 0,5$

Pomocí tohoto modelu je níže vykreslena závislost meteorologické viditelnosti na útlumu spoje



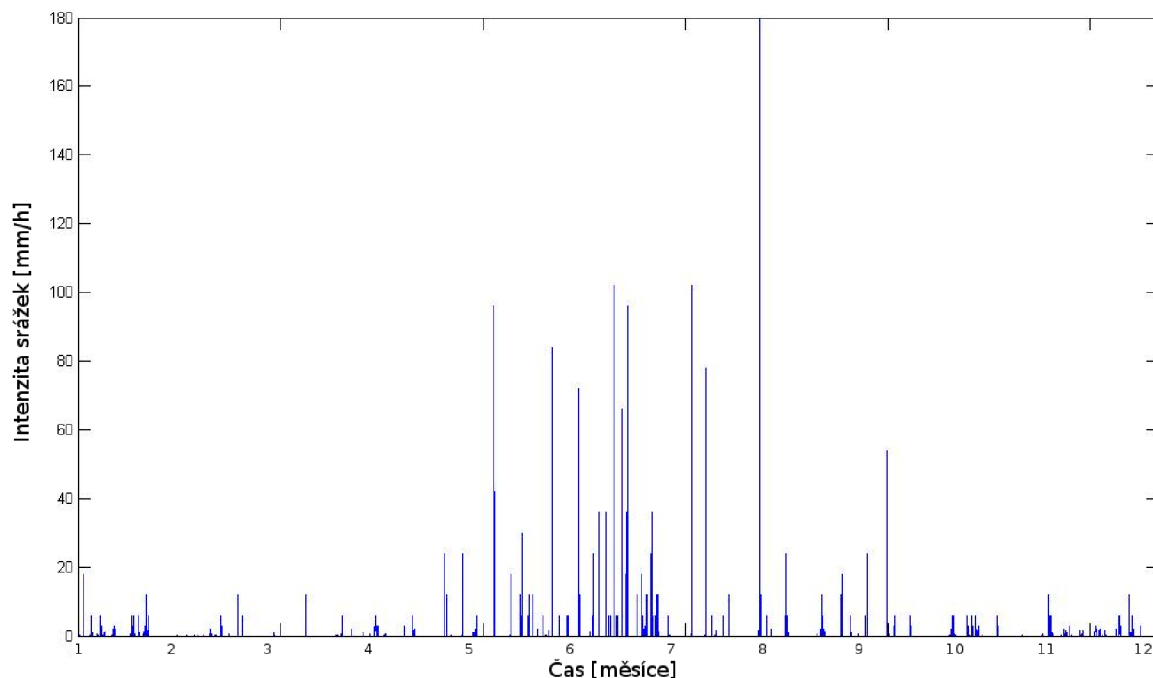
Obr. 5.6: Útlum optického signálu v závislosti na meteorologické viditelnosti prostředí.

Další možností ke zjištění útlumu je z intenzity srážek při kterých dochází k rozptylu na kapkách vody [29]

$$\alpha_{rain} = 1.076R_{pr}^{0.67}, \quad (5.18)$$

ve které  $R_{pr}$  je průměrný úhrn srážek ve využitelné oblasti (mm/h). Zde uvažujeme velikost kapky mnohem větší, než vlnová délka optického signálu. Tedy platí, že velikostní parametr  $x_0 \gg 1$ .

Na následujícím grafu zhotoveném na základě statistických údajů, dodaných Ústavem fyziky atmosféry AV ČR, je uvedena okamžitá intenzita srážek v průběhu roku



Obr. 5.7: Intenzita srážek v roce 2012 pro meteorologickou stanici Milešovka

Posledním meteorologickým aspektem ovlivňujícím útlum je sníh. Sníh rozlišujeme z pohledu útlumu optického výkonu na mokrý a suchý. Celkový útlum  $\alpha_{snow}$  v jednotkách dB/km v závislosti na intenzitě sněhových srážek  $S$  lze popsat vztahem [26]

$$\alpha_{snow} = aS^b. \quad (5.19)$$

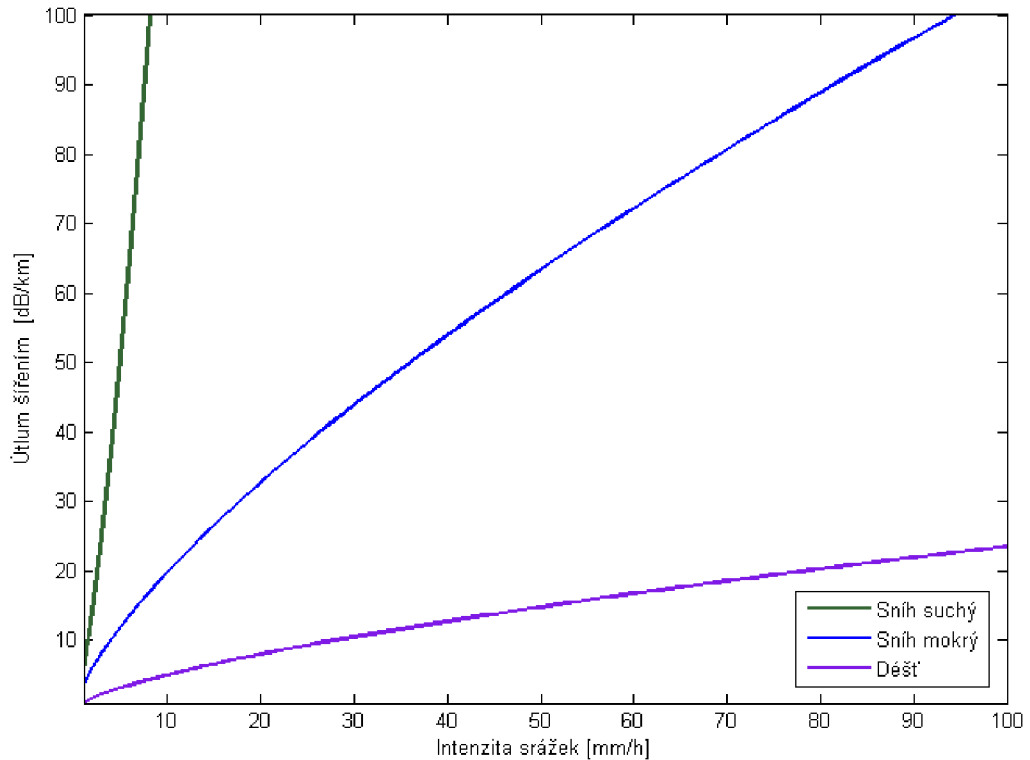
Pro každý ze zmiňovaných typů sněhu se v tomto vztahu mění koeficienty  $a$  a  $b$ . Uvažujeme-li sníh suchý jsou koeficienty popsány [26]

$$a = 5,42 \cdot 10^{-5} \lambda + 5,4958776 \quad b = 1.38. \quad (5.20)$$

Naopak pro mokrý sníh jsou koeficienty zadány následovně

$$a = 1.023 \cdot 10^{-4} \lambda + 3.7855466 \quad b = 0.72. \quad (5.21)$$

Jednotlivé meteorologické vlivy je možné porovnat rozmítáním intenzity srážek, přičemž každý z těchto vlivů má v tomto ohledu jinou závislost



Obr. 5.8: Porovnání meteorologických vlivů v poměru intenzity srážek

V tomto grafu je vidět, že největšího vlivu útlumu na průchod optického signálu dosahuje suchý sníh a naopak dešťové srážky uvažovaný OBS ovlivňují jen v malé míře.

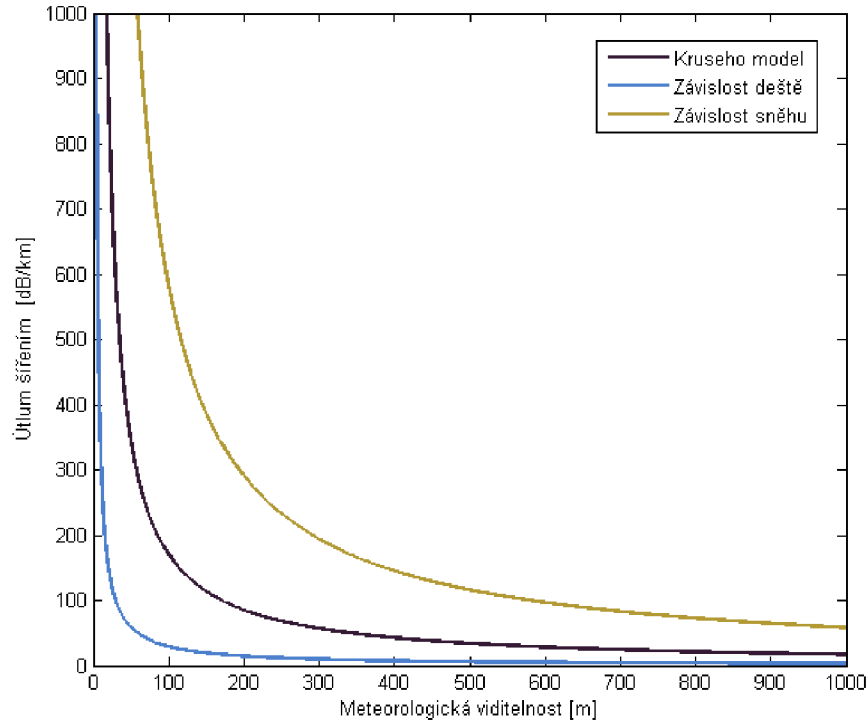
Jelikož intenzita srážek souvisí s meteorologickou dohledností  $V$ , můžeme útlum způsobený deštěm nebo sněhem také ekvivalentně vztáhnout k této veličině stejně jako mlhu a porovnat útlumové závislosti jednotlivých vlivů. Pro dešť lze přepočítat útlum z meteorologické viditelnosti vztahem [25]

$$\alpha_{rain} = \frac{2,9}{V}. \quad (5.22)$$

Sníh pak vypočteme jako

$$\alpha_{snow} = \frac{58}{V}. \quad (5.23)$$

Pokud bude nyní rozmítána meteorologická dohlednost  $V$ , zobrazí se pro každý z vlivů podobný graf, jako byl nasimulován při měření útlumu vlivem mlhy v prostředí. Tyto závislosti jsou pro porovnání zobrazeny níže.



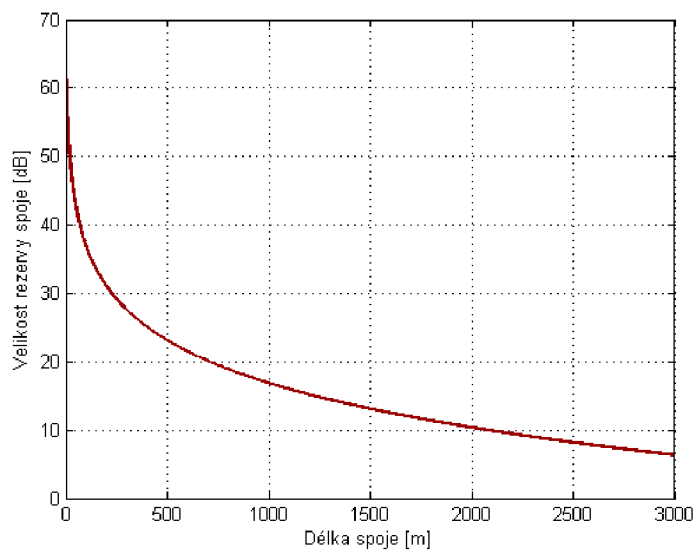
Obr. 5.9: Porovnání meteorologických modelů

## 5.5 Dostupnost spoje

Jelikož je OBS výrazně závislá na změnách meteorologického prostředí, mění se i výkonová úroveň na přijímací apertuře. V některých případech je výkonová úroveň nižší, než minimální požadovaný přijímaný výkon pro dostačující chybovost a spoj je tedy v těchto stavech nepoužitelný. K popsání dané problematiky se definuje dostupnost OBS  $P_{dos}$ , která vyjadřuje procentuální pravděpodobnost správné funkčnosti OBS v určitém časovém intervalu. Pro optimalizaci dostupnosti spoje se zahrnuje do dynamiky spoje ještě linková rezerva spoje  $M$ , která znázorňuje výkonovou rezervu pro ošetření změn přijímaného výkonu způsobené proměnlivostí meteorologické situace [28]

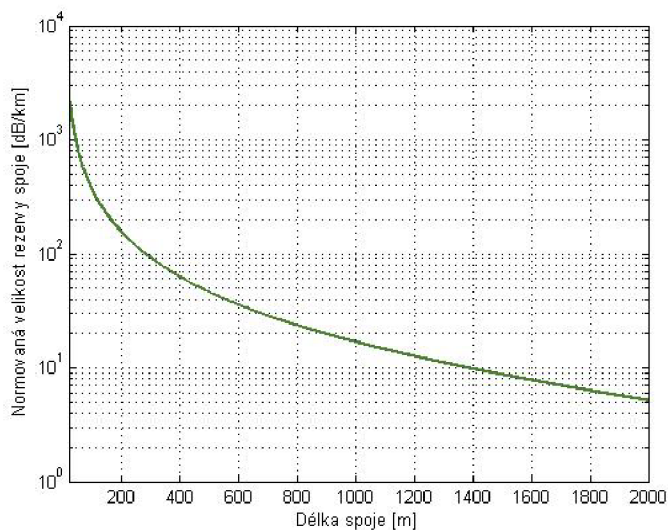
$$M = P_{TX} - P_{0RX} - \alpha_{geom} - \alpha_{atmS} + \gamma_{geom}. \quad (5.24)$$

Rozmítáním vzdálenosti mezi hlavicemi dostáváme graf, odpovídající závislosti linkové rezervy na délce spoje.



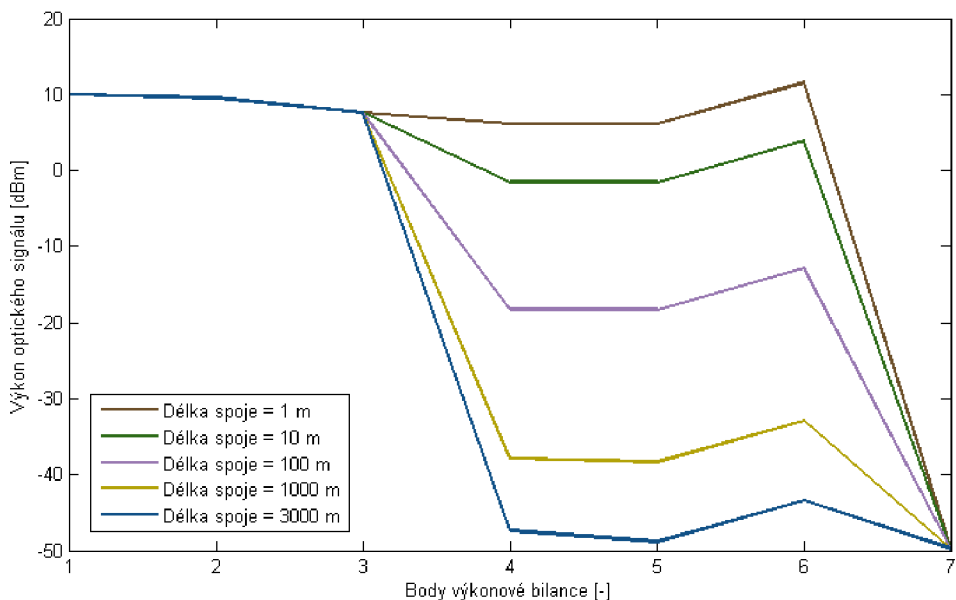
Obr. 5.10: Graf závislosti linkové rezervy na délce spoje

Pro zjištění dostupnosti spoje je nutné dále znormovat tuto závislost právě jeho délkou. Tímto postupem je zhotoven nový graf popisující změnu normované linkové rezervy  $M_1$  při změně délky spoje, ale nyní již v jednotkách dB/km



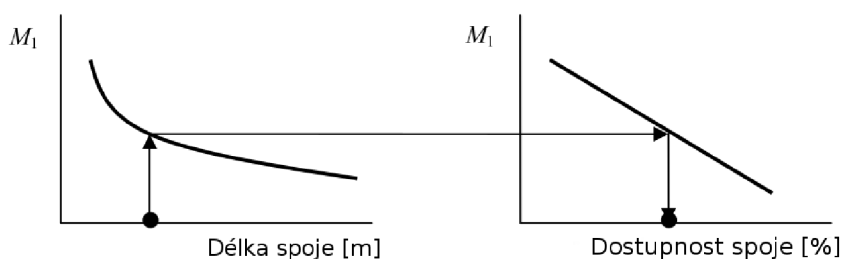
Obr. 5.11: Graf závislosti normované linkové rezervy na délce spoje

Na obrázku 5.12 jsou zobrazeny jednotlivé změny elektronické bilance při rozmítání vzdálenosti mezi hlavicemi a s tím spojené i změny zmiňované rezervy spoje  $M$

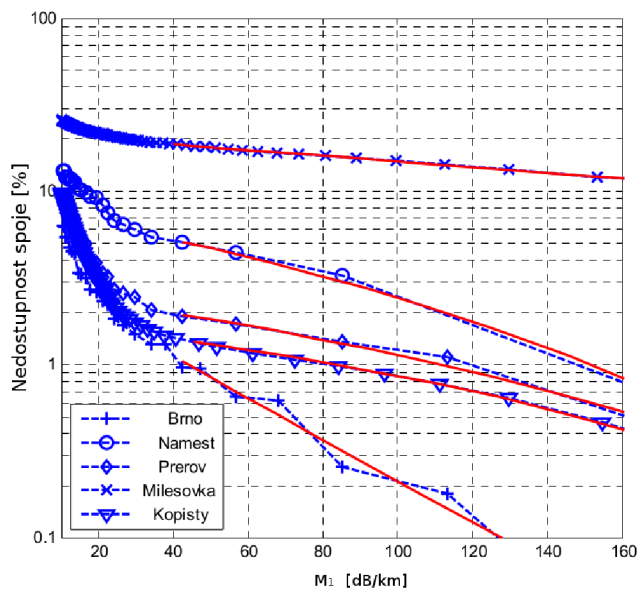


Obr. 5.12: Změny výkonové bilance spoje při změně vzdálenosti

Pokud je nyní známá velikost normované linkové rezervy  $M_1$ , je dle statistických údajů možné určit dostupnost spoje pro určité místo. Křivky vycházející ze statistických meteorologických údajů jsou uvedeny níže a lze podle nich definovat procentuální dostupnost spoje v roce pomocí převodu uvedeného na obrázku 5.5



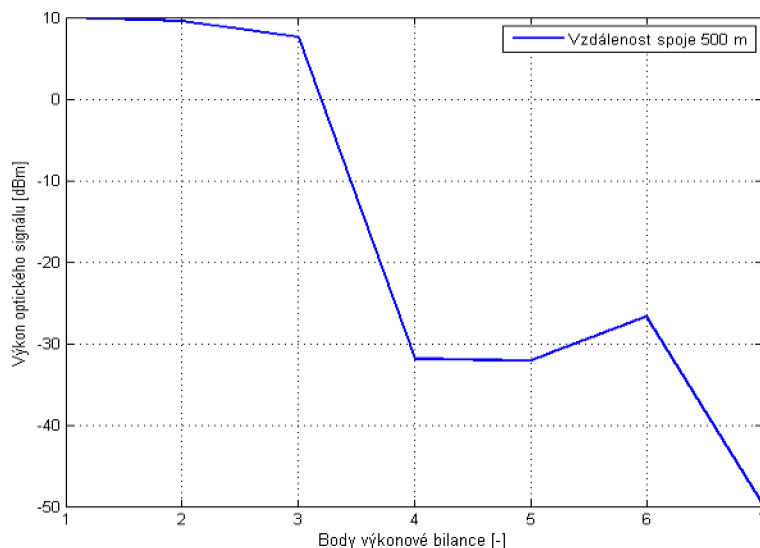
Obr. 5.13: Způsob převodu linkové rezervy na dostupnost spoje [28].



Obr. 5.14: Procentuální dostupnost spoje v závislosti na rezervě spoje M [28].

### 5.5.1 Praktické využití modelu energetické bilance

Pomocí vytvořených modelů a charakteristik, popisujících vlivy atmosferických a fyzikálních jevů lze nyní sestavit příkladnou energetickou bilanci, popisující změny signálu při zvolení námi vybraných parametrů a optických součástí. Výsledná výkonová bilanci OBS s popisem při zvolení délky spoje 500 m je zobrazena na obrázku 5.5.1



Obr. 5.15: Výkonová bilanci OBS pro vzdálenost 500 m



Jednotlivé úseky této energetické výkonové bilance:

1  $\iff$  2 : útlum na přechodu LED  $\rightarrow$  vysílací apertura

2  $\iff$  3 : útlum způsobený přechodem přes optické čočky

3  $\iff$  4 : geometrický útlum spoje

4  $\iff$  5 : meteorologický útlum čisté atmosféry

5  $\iff$  6 : geometrický zisk přijímače

6  $\iff$  7 : dynamický meteorologický útlum (rezerva spoje M)

Z grafu lze vyčíslit velikost rezervy spoje  $M$ , kterou znormujeme a následně pomocí ní odečteme dostupnost spoje pro zadanou délku. Tyto hodnoty jsou uvedeny níže

Velikost rezervy :  $M = 23,09$  dB

Normovaná velikost rezervy :  $M_1 = 46,18$  dB

Přibližná odečtená dostupnost spoje pro Brno :  $P_{dos} = 99,2$  %

## 5.6 Bezpečnost spoje

Při návrhu OBS je nutné uvážit také bezpečnost spoje. Tím rozumíme zamezení poškození živé tkáně z níž nejcitlivější na vyzářený optický paprsek je oko. Běžně užívané zařízení nejsou extrémně nebezpečné, avšak při nesprávné manipulaci může dojít ke zranění. Proto se při návrhu OBS zařadí zdroj optického záření do příslušné normované bezpečnostní kategorie (třídy). Základní kategorie jsou shrnuty v následující tabulce

Tab. 5.7: Rozdělení bezpečnostních tříd [7]

Bezpečnostní třída	Definice
Třída 1	Bezpečné při běžně předvídatelných podmínkách provozu.
Třída 2	Bezpečné při přímém pohledu do optického svazku při mrkání očí (pouze pro viditelné záření $\lambda = 400 - 700$ nm.)
Třída 3A	Bezpečné při přímém pohledu do optického svazku ovšem nebezpečné při použití zesilovacích optických prvků (např. dalekohledu).
Třída 3B	Nebezpečné pro všechny možnosti přímého kontaktu paprsku s okem. Lze pozorovat pouze rozptýlené odrazy optického svazku, nebo použít ochranné brýle.

Zdroj použitý v našem zařízení je nekoherentní LED dioda s výkonem kolem 10 mW. Typy těchto zdrojů jsou nejčastěji řazeny do třídy 3A.

## 6 ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsme se zabývali teoretickými základy optoelektroniky, které je nutno uvažovat při návrhu OBS, přičemž jsme se nejvíce zaměřovali na jevy ovlivňující přenos signálu tímto spojem. V práci byl popsán způsob konstrukce optického zařízení, navazujícího na elektronickou část OBS. Obecně jsme navrhli možnost popisu trasy signálu pomocí energetické bilance spoje, na kterou byli aplikovány modely jevů přenosového prostředí. Jednotlivé jevy byly uvažovány i pro přenos ve venkovním atmosferickém prostředí pro komplexnější využití optického spoje. Jelikož by mělo být zařízení uzpůsobeno pro přenos ethernetového signálu, byly zde popsány jednotlivé části kódování a modulací využívající se pro přenos dat v tomto systému. Pro přenos jsme zvolily standardizovanou rychlost 100 Mb/s, která je v současné době komerčně využívána. Závěrem této práce je metoda sloužící k ohodnocení OBS, jeho dostupnosti a možnému využití, k níž je znázorněn příklad simulované výstupní energetické bilance spoje spolu s určením dostupnosti spoje pro lokalitu Brna. Výsledky simulací bohužel nebylo možné ověřit na dostupném zařízení. Toto ověření spolu s možností rozšíření projektu je možné řešit například v navazující diplomové práci.

## LITERATURA

- [1] Česká republika. *Vyhláška o plánu přidělení kmitočtových pásem*. In: Sbírka zákonů č. 105 / 2010. 2010. [cit. 2012-11-25]. Dostupné z URL: <[http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova\\_tabulka/vyhlaska\\_105-2010\\_sb038-10.pdf](http://www.ctu.cz/cs/download/kmitoctova_tabulka/vyhlaska_105-2010_sb038-10.pdf)>.
- [2] MAJUMDAR, Arun K a Jennifer Crider RICKLIN. *Free-space laser communications: principles and advances*. New York, NY: Springer, c2008, x, 417 p. ISBN 9780387286778.
- [3] NĚMEC, F. *Optické pojítko RONJA*. [online]. 2008, [cit. 25. 11. 2012]. Dostupné z URL: <[chrudim.info/ronja](http://chrudim.info/ronja)>.
- [4] *Scientists hit wireless speeds of 2.56Tbps using light vortex beams*. [online]. 2012 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: URL: <<http://www.techspot.com/news/49155-scientists-hit-wireless-speeds-of-256tbps-using-light-vortex-beams.html>>.
- [5] A. Einstein, *Ann. Physik* 17. (1905),132. boldis
- [6] SALEH, Bahaa E. *Fundamentals of photonics*. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007, xix, 1177 s. ISBN 978-0-471-35832-9.
- [7] HRANILOVIC, By Steve. *Wireless Optical Communication Systems*. [online]. Boston, MA: Springer Science Business Media, Inc, 2005. ISBN 03-872-2785-7.
- [8] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika I* . 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1993, 135 s. ISBN 80-214-0551-1.
- [9] LOCK, James A. a Gérard GOUESBET. Rigorous justification of the localized approximation to the beam-shape coefficients in generalized Lorenz-Mie theory. I. On-axis beams. *Journal of the Optical Society of America A* [online]. 1994, vol. 11, issue 9, s. 2503- [cit. 2013-05-28]. DOI: 10.1364/JOSAA.11.002503. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josaa-11-9-2503>
- [10] *Parhelium: Rayleighův a Mieův rozptyl*. [online]. 2007, č. 3, s. 18 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z URL: <[ukazy.astro.cz/gal/Parhelium200703.pdf](http://ukazy.astro.cz/gal/Parhelium200703.pdf)>.
- [11] *Modelování turbulentní atmosféry a snižování fluktuací přijímaného signálu vícesvazkovým provozem*. [online]. 2002, č. 67 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: URL: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02067/index.html>>.

- [12] HRANILOVIC, By Steve. *Fiber Optics Without Fiber*. [online]. 2003, spring [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <<http://www.mems.ece.ufl.edu/courses/spring2003/wireless.pdf> >.
- [13] FJFI ČVUT, *Úloha č. 6 -Zdroje optického záření a jejich vlastnosti..* [online]. 2010, s. 8 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z URL: <[optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_06.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_06.pdf) >.
- [14] *Encyklopedie fyziky: Emise a absorpce světla*. [online]. 2008 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: URL: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla> >.
- [15] *Báječný svět počítačových sítí: Stomegabitový ethernet*. 2007 [cit. 2012-11-10], č. 1, s. 4.
- [16] E, Spurgeon Charles. *Ethernet*. 2000, 497 s. ISBN 15-659-2660-9.
- [17] FJFI ČVUT, *Ethernet*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-11-25]. Dostupné z URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Ethernet> >.
- [18] Peebles, Jr., Peyton Z. *Digital Communication Systems*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987, xvi, 432 s. ISBN 01-321-1962-5.
- [19] CHU, Pong P. *FPGA prototyping by Verilog examples: Xilinx Spartan -3 version*. Hoboken: John Wiley, 2008, xxvii, 488 s. ISBN 978-0-470-18532-2.
- [20] BIOLEK, D. *Řešení obvodů s transimpedančními operačními zesilovači pomocí grafů signálových toků*. VA Brno, 1994. s. 6. Dostupné z URL: <[http://user.unob.cz/biolek/veda/articles/EDS94\\_1.pdf](http://user.unob.cz/biolek/veda/articles/EDS94_1.pdf) >.
- [21] Clark, R. N. *Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in Manual of Remote Sensing*. Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3- 58, 1999.
- [22] WILFERT, Otakar *Optické bezkabelové spoje* . Brno, 2004. 84s., 8 s. příloh. Habilitační práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Ústavu radioelektroniky.
- [23] DORDOVÁ, L. *Metoda stanovení charakteristik atmosférického přenosového prostředí v optické oblasti spektra*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 137 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

- [24] PALAIS, Joseph C. *Fiber optic communications*. 5th ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall, c2005, xiii, 441 p. ISBN 01-300-8510-3.
- [25] M. S. Awan, L. C. Horwath, S. S. Muhammad, E. Leitgeb, F. Nadeem, and M. S. Khan. *Characterization of fog and snow attenuations for free- space optical propagation*. Journal of Communications, vol. 4, pp. 533- 545, 2009.
- [26] Ajaybeer Kaur , Dr. M. L Singh. *International Journal of Computer Science: Comparing the Effect of Fog and Snow Induced Attenuation on Free Space Optics (FSO) and RF Links*[online]. 2012 [cit. 2013-05-25]. ISSN 0976-8491. Dostupné z: <http://www.ijcst.com/vol31/3/ajaybeer.pdf>
- [27] VÁGNER, P. *Vysokofrekvenční technika*. Skripta FEKT VUT, 2013.
- [28] WILFERT, O.; KOLKA, Z.; BIOLKOVÁ, V. *Estimation of FSO link availability in central European localities*. In *Proceedings of Optics and Photonics 2006*. San Diego: SPIE, 2006. s. 1 ( s.)ISBN: 0-8194-6382-5.
- [29] GHASSEMLOOY, Z, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB*. Boca Raton: CRC Press, 2012, xlii, 517 s. ISBN 978-1-4398-5188-3.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

## Seznam zkratek

APP	Atmosferické Přenosové Prostředí
AV ČR	Akademie věd České republiky
BER	Bit Error Rate
CDR	Clock Data Recovery
CRC	Cyclic redundancy check
EM	Elektro Magnetické
FD	Fotodioda
FPGA	Field Programmable Gate Array
HDL	Hardware description language
IR	Infračervené záření
IrDA	Infrared Data Association
LD	Laser Diode
LA	Limiting Amplifier
LED	Light Emitting Diode
MAC	Media Access Control
MLT	Multi Level Transmit
NRZ	Non Return to Zero
OBS	Optický Bez kabelový Spoj
OOK	On-Off Keying
PECL	Positive Emitter Coupled Logic
PHY	Physical layer, Někdy takto označován samotný čip pro komunikaci s touto vrstvou

PPM	Pulzně Polohová Modulace
POS	Přijímací Optická Soustava
PP	Optický průzor přijímače
PV	Optický průzor vysílače
RONJA	Reasonable Optical Near Joint Access
Rx	Receiver
SFD	Start Frame Delimiter
SLED	Superliminiscenční dioda
SNR	Poměr signálu k šumu
TIA	Transimpedance amplifiery
Tx	Transmitter
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UTP	Unshielded Twisted Pair
VHDL	VHSIC hardware description language
VOS	Vysílací Optická Soustava

## Seznam symbolů

$A_{FD}$	Aktivní plocha fotodiody
$A_{spod}$	Velikost skvrny přijímané v ohniskové rovině
$B$	Tloušťka aktivní oblasti
$B_m$	Šířka pásma přenosu
$C$	Kapacita zachycené energie
$c$	Rychlost světla ve vakuu
$C_1$	Parametr Kruseho modelu
$D_F$	Průměr čočky

$D_{\text{POS}}$	Průměr přijímací optické soustavy
$D_{\text{S}}$	Pomocný průměr čočky
$D_{\text{VOS}}$	Průměr vysílací optické soustavy
$e$	elementární elektrický náboj
$E_{\text{g}}$	Energie potřebná k přechodu přes zakázané pásmo
$E_{\text{photon}}$	Energie fotonu
$erf$	Chybová rovnice
$h$	Planckova konstanta
$I_{\text{D}}$	Proud temného šumu
$I$	Optická intenzita
$I_{\text{p}}$	Průměrný generovaný fotoproud
$i_{\text{s}}$	Proud výstřelového šumu
$J$	Proudová hustota
$k$	Bolzmannova konstanta
$L_0$	Maximální rozměr turbulentní cely
$L_{\text{o}}$	Vzdálenost ohniska čočky
$L_{\text{VP}}$	Vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
$M$	Rezerva spoje
$M_1$	Normovaná rezerva spoje
$NEP$	Výkon ekvivalentní šumu
$NEP_1$	Výkon ekvivalentní šumu udávaný výrobcem
$P_{\text{Nin}}$	Výkon šumu na vstupu zesilovače
$P_{\text{DOS}}$	Procentuální dostupnost spoje
$P_{\text{LD}}$	Výstupní optický výkon LED
$P_{\text{min}}$	Minimální detekovatelný výkon přijímače



$P_{N-AMP}$	Výkon šumu přidaný zesilovačem
$P_{N-OUT}$	Výkon šumu na výstupu zesilovače
$P_p$	Vyzářený výkon
$P_{vol}$	Výstupní výkon
$P_{VOS}$	Výkon dopadající na aperturu vysílací optické soustavy
$R$	Responzivita (spektrální citlivost)
$R_{FD}$	Odpor fotodiody
$r_p$	Poloměr částice atmosféry
$S_U$	Napěťová citlivost
$T_0$	Termodynamická teplota
$V$	Meteorologická viditelnost
$v$	Rychlost
$v_T$	rychlost nosičů náboje
$w$	Tloušťka implicitní vrstvy
$\alpha$	Koeficient útlumu
$\alpha_{abs}$	Člen absorpce na molekulách
$\alpha_{atm}$	Celkový atmosferický útlum
$\alpha_{atmS}$	Normovaný útlum čistou atmosférou
$\alpha_{geom}$	Celkový geometrický útlum
$\alpha_{geom1}$	Geometrický útlum spoje
$\alpha_{fluk}$	Člen odpovídající útlumu vlivem fluktuací
$\alpha_{v,LD}$	Účinnost vysílací vazby
$\alpha_{r,m}$	Člen odpovídající rozptylu na molekulách
$\alpha_{st}$	Útlum čistou atmosférou
$\alpha_{TX/RX}$	Útlum přechodu zdroje na aperturu

$\alpha_{r,\check{c}}$	Člen odpovídající rozptylu na částicích
$\alpha_{rain}$	Útlum v závislosti na dešťových srážkách
$\alpha_{snow}$	Útlum v závislosti na sněhových srážkách
$\alpha_{tot}$	Celkový útlum spoje
$\alpha_{v,FD}$	Účinnost přijímací optické soustavy
$\alpha_{VP}$	Útlum šířením
$\alpha_z$	Útlum nedokonalostmi spoje
$\gamma$	Zesílení přijímací optické soustavy
$\delta$	Parametr Krusova modelu
$\delta_{LED}$	Doba přechodu LED
$\delta_P$	Dynamika přijímače
$\delta_Z$	Tloušťka vrstvy
$\delta u_s$	Odchylka šumového napětí
$\epsilon$	Permitivita prostředí
$\lambda$	Vlnová délka
$\eta_i$	vnitřní kvantová účinnost
$\tau$	Doba spínání
$\tau_n$	Délka životnosti elektronu
$\phi_{1/2}$	Vyzařovací úhel v bodě polovičního výkonu zdroje
$\phi_{VS}$	Úhlová šířka vysílaného svazku
$\rho$	Rezerva spoje
$\omega$	Úhlová frekvence