

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



**Moderní trendy v bezdrátovém přenosu optického signálu  
pro datovou komunikaci**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

Autor práce: František Vencel

© 2020 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

František Vencel

Zemědělské inženýrství

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

**Moderní trendy v bezdrátovém přenosu optického signálu pro datovou komunikaci**

Název anglicky

**Modern trends in wireless transmission of optical signals for data communication**

---

### Cíle práce

Primárním cílem práce je analyzovat, posoudit a definovat doporučení pro technologii přenosu dat pomocí optického paprsku bez použití optického vlákna – FSO. V druhé části budou diskutovány současné moderní trendy a předpokládaný vývoj v této oblasti. Posouzeny budou vhodné případy nasazení včetně cenového vyjádření.

### Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Fyzikální principy technologie
4. Parametry a limity
5. Možnosti nasazení
6. Bezpečnost
7. Doporučení a ceny
8. Předpokládaný vývoj

**Doporučený rozsah práce**

30 až 40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

**Klíčová slova**

datová komunikace, TCP/IP, FSO

---

**Doporučené zdroje informací**

"IEEE 802.15 WPAN Task Group 7 (TG7) Visible Light Communication". IEEE 802 local and metro area network standards committee. 2009. Retrieved June 28, 2011.

Jing Xue, Alok Garg, Berkehan CiGcioglu, Jianyun Hu, Shang Wang, Ioannis Savidis, Manish Jain, Rebecca Berman, Peng Liu, Michael Huang, Hui Wu, Eby G. Friedman, Gary W. Wicks, Duncan Moore (June 2010). "An Intra-Chip Free-Space Optical Interconnect". the 37th International Symposium on Computer Architecture. Retrieved June 30, 2011.

Lee, I.E.; Sim, M.L.; Kung, F.W.L.; "Performance enhancement of outdoor visible-light communication system using selective combining receiver," Optoelectronics, IET , vol. 3, no. 1, pp. 30–39, February 2009.

PragueBest s.r.o. "Free Space optics (FSO) with capacity 10 Gigabits Full Duplex – EC System". www.ecsystem.cz. Retrieved 14 March 2018.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2019/2020 LS – TF

**Vedoucí práce**

Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2019

**doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 17. 03. 2020

---

## **Čestné prohlášení**

*„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Moderní trendy v bezdrátovém přenosu optického signálu pro datovou komunikaci vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“*

V Praze dne .....

.....

František Vencel

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Zdeňku Votrubovi, Ph.D., za poskytnutí odborných rad, pomoc a investovaný čas pro konzultace k této bakalářské práci. Dále bych rád poděkovat své rodině za úžasné zázemí, neotřelé zážitky a možnosti sebezvoje v průběhu celého svého studia. Závěrečné poděkování patří přátelům za podporu a užitečné rady.

# **Moderní trendy v bezdrátovém přenosu optického signálu pro datovou komunikaci**

## **Abstrakt**

Práce se zabývá problematikou přenosu optického paprsku bez použití optického vlákna. Zaměřena je na funkčnost optických bezdrátových spojů, jejich historii, topologii sítě, zdroje záření a rozdělení. Dále se zde probírá problematika atmosférických účinků a faktorů, které mají negativní vliv na tyto optické spoje. Na tuto část navazuje analýza fyzikálních principů přenosu skrz volný prostor, parametry a limity této technologie, a přehled komerčně vyráběných optických pojítek, které jsou k nalezení na trhu. V závěru práce je analyzována moderní technologie Li-Fi, která by v budoucnu mohla nahradit Wi-Fi. Tato práce mimo jiné demonstruje nevyužitý potenciál technologie přenosu pomocí optického paprsku a prostor pro budoucí využití v mnoha oborech.

**Klíčová slova:** datová komunikace, FSO, Li-Fi, optický paprsek, bezdrátová komunikace

# **Modern trends in wireless transmission of optical signals for data communication**

## **Abstract**

The work deals with the issue of optical beam transmission without the use of optical fiber. It focuses on the functionality of optical wireless links, their history, network topology, radiation sources and distribution. Furthermore, the issue of atmospheric effects and factors that have a negative effect on these optical links is discussed. This part is followed by an analysis of physical principles of transmission through free space, parameters and limits of this technology, and an overview of commercially produced optical links that are available on the market. At the end of the thesis is analyzed modern Li-Fi technology, which could replace Wi-Fi in the future. This work demonstrates, among other things, the untapped potential of optical beam transmission technology and space for future use in many fields.

**Keywords:** data communication, FSO, Li-Fi, optical beam, wireless communication

# Obsah

<b>1 Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Cíl práce a metodika.....</b>	<b>2</b>
2.1 Cíl práce .....	2
2.2 Metodika .....	2
<b>3 Optické bezdrátové spoje .....</b>	<b>3</b>
3.1 Historie.....	3
3.2 Princip.....	4
3.3 Základní podsystémy .....	5
3.4 Základní rozdělení .....	6
3.4.1 Rozdělení podle prostředí a způsobu použití.....	6
3.4.2 Rozdělení podle způsobu provozu.....	8
3.5 Zdroje záření .....	8
3.5.1 LED .....	8
3.5.2 Laser .....	9
3.5.3 Nebezpečí poškození zraku .....	9
3.6 Fotodetektory .....	10
3.6.1 PIN fotodetektory .....	10
3.6.2 Lavinové fotodetektory (APD).....	10
3.7 Topologie optických bezdrátových sítí.....	10
3.8 Výhody a nevýhody OBS .....	11
<b>4 Atmosférické účinky na OBS.....</b>	<b>13</b>
4.1 Lambertův–Beerův zákon (Beer’s Law).....	13
4.2 Atmosférické jevy .....	13
4.2.1 Absorpce .....	13
4.2.2 Rozptyl .....	14
4.2.3 Atmosférická Turbulence .....	17
4.3 Atmosférické faktory .....	19
4.3.1 Mlha.....	19
4.3.2 Déšť .....	19
4.3.3 Smog.....	19
4.3.4 Sníh.....	20
<b>5 Fyzikální princip technologie.....</b>	<b>22</b>
5.1 Volba vlnové délky v komunikačním systému OBS .....	22
5.2 Modulace a detekce .....	22
5.2.1 Modulace signálu.....	23
5.2.2 Systém přímé detekce .....	23
5.3 Výkonová bilance .....	24



<b>6</b>	<b>Parametry a limity .....</b>	<b>26</b>
6.1	Dosah a přenosové rychlosti .....	26
6.2	Bezpečnost .....	28
6.2.1	Kryptografie.....	28
6.2.2	Úroveň bezpečnosti .....	28
6.2.3	Zabezpečovací vrstvy .....	29
6.2.4	Bezpečnostní funkce OBS .....	30
6.2.5	Odposlech paprsku .....	30
<b>7</b>	<b>Komerční produkty OBS .....</b>	<b>31</b>
7.1	Výrobci hlavic a dostupnost .....	31
7.2	Funkce optických pojítek .....	32
7.2.1	Autotracking .....	32
7.2.2	Dvoukanálová technologie .....	32
7.2.3	Aerodynamické stínění .....	33
7.3	Cena a Instalace .....	33
<b>8</b>	<b>Moderní technologie .....</b>	<b>34</b>
8.1	VLC .....	34
8.2	Li-Fi .....	34
8.2.1	Vznik .....	34
8.2.2	Princip.....	35
8.2.3	Architektura Li-Fi.....	36
8.2.4	Možnosti využití .....	36
8.2.5	Výhody a nevýhody .....	37
8.2.6	Li-Fi vs. Wi-Fi.....	38
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>39</b>
<b>10</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>40</b>

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Princip Bellova photophonu (Zdroj:[2])</i> .....	3
<i>Obrázek 2: Princip spojení dvou sítí (Zdroj: [9])</i> .....	4
<i>Obrázek 3: Konstrukce optické hlavice (Zdroj: [17])</i> .....	5
<i>Obrázek 4: Blokový diagram OBS (Zdroj: [15])</i> .....	6
<i>Obrázek 5: Optické spoje mezi družicemi a planetou Země (Zdroj: [5])</i> .....	8
<i>Obrázek 6: Porovnání spektra laseru a LED (Zdroj: [9])</i> .....	9
<i>Obrázek 7: Topologie OBS – a) bod-bod, b) kruh, c) síť, d) hvězda (Zdroj: [vlastní])</i> .....	11
<i>Obrázek 8: Okno přenosu optického signálu za jasných podmínek (Zdroj: [12])</i> .....	14
<i>Obrázek 9: Princip Rayleighova rozptylu (Zdroj: [vlastní])</i> .....	16
<i>Obrázek 10: Princip Mieva rozptylu (Zdroj: [vlastní])</i> .....	16
<i>Obrázek 11: Atmosféra s turbulentními víry (Zdroj: [15] – upraveno dle autora)</i> .....	17
<i>Obrázek 12: Útlum v důsledku scintilace (Zdroj: [14])</i> .....	18
<i>Obrázek 13: Princip scintilace (Zdroj: [15])</i> .....	18
<i>Obrázek 14: Vlevo–interní modulace, vpravo–externí modulace (Zdroj: [15])</i> .....	23
<i>Obrázek 15: Schéma principu přenosu signálu (Zdroj: [17])</i> .....	24
<i>Obrázek 16: Výkonový úrovnový diagram (Zdroj: [4])</i> .....	25
<i>Obrázek 17: Dosahované přenosové rychlosti firmy CESNET (Zdroj: [3])</i> .....	27
<i>Obrázek 18: Kategorie OWC dle dosahu (Zdroj: [vlastní])</i> .....	27
<i>Obrázek 19: Hlavice SONAbeam 150-E+ (Zdroje: [26])</i> .....	32
<i>Obrázek 20: Li-Fi systém přes fotovoltaický článek (Zdroj: [22])</i> .....	35
<i>Obrázek 21: Princip fungování Li-Fi (Zdroj: [19])</i> .....	36

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Rozptyl a poloměr částic pro vlnovou délku 1550 nm (Zdroj: [15])</i> .....	15
<i>Tabulka 2: Mezinárodní tabulka viditelnosti (Zdroj: [14] – upraveno dle autora)</i> .....	21
<i>Tabulka 3: Příklady optických hlavic na trhu (Zdroj: [vlastní] – podle firemních zdrojů)</i> .....	31
<i>Tabulka 4: Rozdíl mezi Wi-Fi a Li-Fi (Zdroj: [20, 21] – upraveno dle autora)</i> .....	38

## Seznam použitých zkratek

FSO	Free Space Optics
M-FSO	Mobile Free Space Optics
OBS	Optický bezdrátový spoj
LED	Light-Emitting Diode
PIN	n-tyt, intrinsic semiconductor, n-tyt
SNR	Signal to Noise Ratio
APD	Avalanche photodiode
OWC	Optical Wireless Communication
VLC	Visible Light Communications
Li-Fi	Light Fidelity
Wi-Fi	Wireless Fidelity
RF	Radio frequency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
IrDA	Infrared Data Association
ISO	International Organization for Standardization
TCP/IP	<u>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</u>
CSP	Critical Security Parameters
IR	Infrared
LoS	Line of Sight
WBAN	Wireless Body Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAM	Wireless Metropolitan Area Network

## Seznam vzorců

Lambertův–Beerův zákon (4.1) .....	13
Koeficient útlumu (4.2) .....	13
Absorpce (4.3) .....	14
Rozptyl (4.4) .....	15
Rayleighův rozptyl (4.5) .....	15
Mieův rozptyl (4.6) .....	16
Modulace signálu (5.1) .....	23
SNR (5.2) .....	23
Citlivost detektoru (5.3) .....	23
Komunikační rovnice (5.4) .....	24
Celkový útlum (5.5) .....	24
Útlum šíření (5.6) .....	24

# 1 Úvod

Předložená práce zpracovává problematiku přenosu datové informace pomocí optického paprsku bez použití optického kabelu. Jedná se především o technologii FSO a další moderní technologie v této oblasti optických bezdrátových spojů. Pro toto téma jsem se rozhodl na základě dvou kritérií. Prvním kritériem je fakt, že jsem se v osobní praxi setkal s přenosem prostřednictvím vláknové optiky. To zahrnuje osobní zkušenosti s budováním optických tras v kolektorech Praha, pokládáním neboli zafukováním optických vláken, vařením optických spojů, proměřováním optických tras apod. Přenos prostřednictvím optického vlákna je velmi blízký bezdrátovému optickému přenosu, a to na základě mnoha aspektů. Obě technologie používají podobný typ signálu, kterým je světelný paprsek. Je zde možnost dosáhnout vysokých přenosových rychlostí (až 10 Gb/s) a v neposlední řadě kritérium, které rozhoduje o síle a dosahu paprsku (útlum). Rozdílnost těchto technologií je zejména v druhu přenosového média, které využívají. Zatímco přenosovým médiem v případě vláknové optiky je vlákno s různých materiálů a s různými vlastnostmi, u optického bezdrátového spoje je to volný prostor, na který působí různé přírodní vlivy. Druhým kritériem je, dle mého názoru, vysoký potenciál využití této technologie v mnoha oborech v budoucnu. Stávající nově se rozvíjející trendy a technologie podporují tento způsob komunikace, a jejich dosud nevyužitá aplikace by mohla být v budoucnu reálně využitelná.

Bakalářská práce je zpracována formou rešerše, které je dosaženo z uvedených zdrojů. Práce se zabývá teorií optického bezdrátového přenosu (OBS) – historie vzniku, obecný princip fungování, dosah paprsku a fyzikální principy. Dále je v práci rozebrána problematika negativního vlivu počasí na přenos optického paprsku a aktuální komerčně vyráběné hlavice uvedené na trhu. Druhá část práce je věnovaná moderním technologiím z oblasti vysokorychlostních optických bezdrátových komunikací.

## **2 Cíl práce a metodika**

### **2.1 Cíl práce**

Hlavním cílem této bakalářské práce je analyzovat princip fungování optického bezdrátového spoje volným prostorem (FSO). Záměrem bylo popsat jednotlivé atmosférické účinky ovlivňující tuto technologii a fyzikální princip fungování zadané problematiky. Dalším cílem je analyzovat parametry, kterými se tato technologie může pyšnit a uvést komerčně vyráběné produkty včetně jejich zajímavých vlastností a cenového vyjádření. V druhé části práce je možnost vyzdvihnout moderní trendy v této oblasti. Hlavní zaměření bude na systém VLC, na který navazuje technologie Li-Fi. Tato technologie bude analyzována se zaměřením na výhody a možné využití v budoucí infrastruktuře.

### **2.2 Metodika**

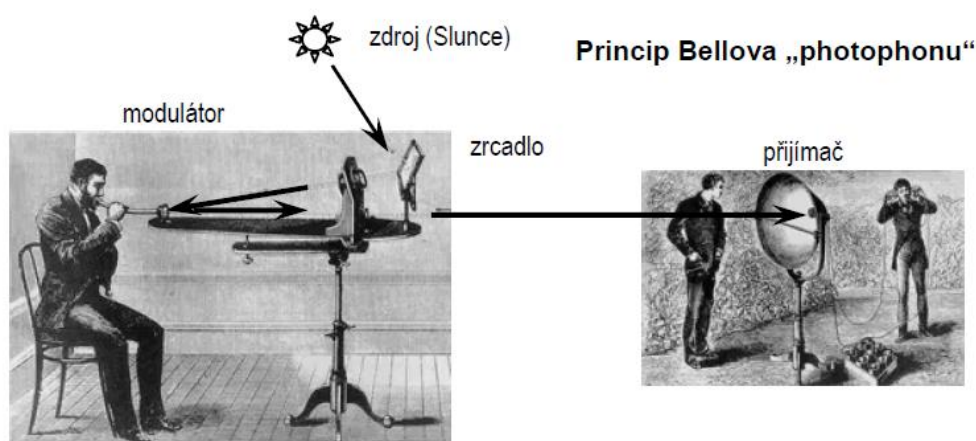
Na základě zpracování a analýzy dostupné tuzemské a zahraniční literatury byla stanovena metodika pro zpracování této práce. Podle této metodiky byl proveden fyzikální rozbor použitých metod, jejich variant s dopadem do konkrétních komerčních aplikací. Závěrečná část práce se zaměřuje na perspektivy vývoje této technologie a dalších moderních technologií v oblasti optické bezdrátové komunikace. Praktická část práce nemohla být vzhledem k současným podmínkám naměřena.

## 3 Optické bezdrátové spoje

### 3.1 Historie

Optický přenos informace se využívá od dob starověku. Homer ve svém díle Iliada zmiňuje použití optických signálů k přenosu zpráv o Řeckém obležení Troje přibližně 1200 př.n.l. Mezi vrcholky hor se rozsvítily požární majáky, aby se zpráva přenesla na velké vzdálenosti. Ačkoliv tento systém komunikace je schopen pouze přenést jednu informaci, byl to zdaleka nejrychlejší způsob přenosu informace o důležitých událostech. [1]

Historicky první zařízení, které pracovalo na základě přenosu informace pomocí optického svazku tak, jak je známe dnes bylo patentováno A. G. Bellem a spolupracovníkem Ch. S. Tainterem v roce 1880. Bell považoval „photophon“ za svůj největší vynález, větší vynález než telefon. Zdrojem světla u photoponu je slunce, které svítilo na systém zrcadel. Jedno zrcadlo mělo funkci modulátoru. Modulační zrcadlo bylo vychylováno lidským hlasem a způsobovalo změny optické intenzity na přijímači. Změny optického signálu byly v přijímači přeměněny na elektrický proud a pomocí sluchátek zpět na lidský hlas. Proces přenosu je znázorněn na obrázku 1. Princip Bellova photoponu nemohl zajistit dostatečnou kvalitu komunikace, a proto jej nahradila radiová komunikace předvedená Marconim v roce 1895, která měla rychlejší rozvoj. Pokrok v technologii optických bezdrátových spojů byl možný až po úspěšných objevech v oblastech laserové technologie, laserových diod a optických vláken. [2]



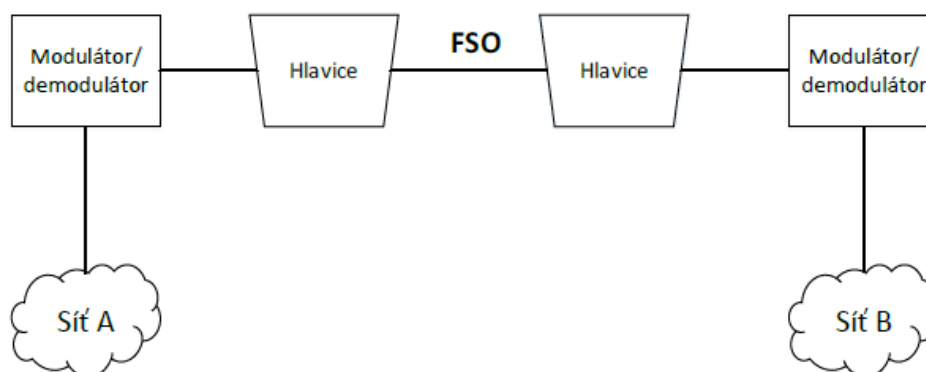
Obrázek 1: Princip Bellova photoponu (Zdroj:[2])

## 3.2 Princip

Pod pojmem optický bezdrátový spoj (OBS), v angličtině Free Space Optics (FSO) se rozumí spoj, ve kterém probíhá komunikace pomocí optických vln šířících se volným prostorem. Je to moderní technologie využívající světelný (např. laserový) bezdrátový paprsek k přenosu dat, obrazu i zvuku ve vysokých přenosových rychlostech, které se dají srovnat s rychlostmi vláknové optiky. Tato technologie se využívá v případech, kdy není možná komunikace pomocí optického vlákna. Pokládání optických vláken je několikanásobně dražší a časově náročnější. [3]

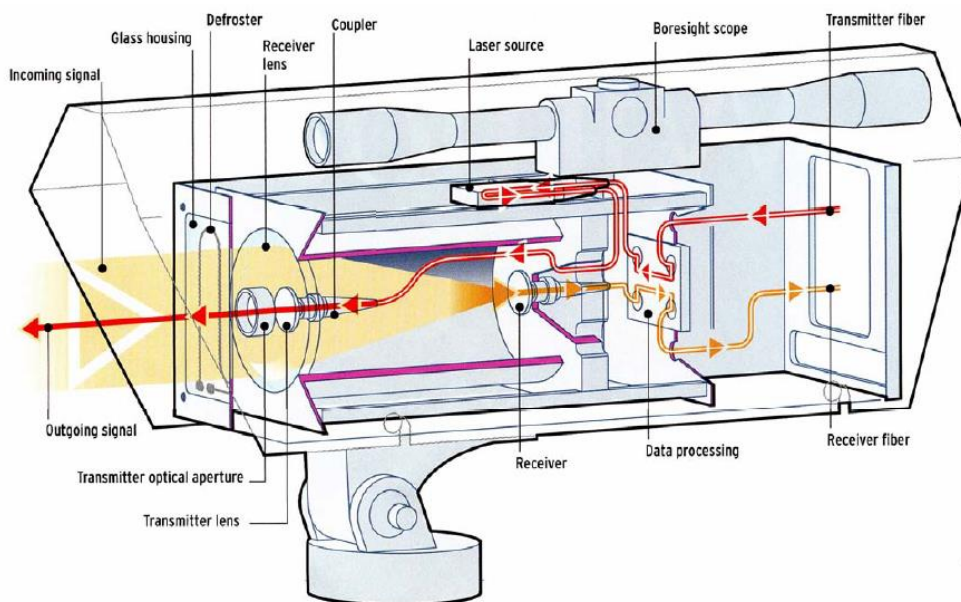
Jako přenosové medium se používá úzký světelný paprsek s velikostí v řádu miliradiánů. To poukazuje na velmi vysokou směrovost vysílaného signálu. Pro představu, jak uvedl Brázda [4] slovy: „optický svazek s divergencí 5 mrad se ve vzdálenosti 100 m rozprostře do kruhu o průměru 50 cm.“ [4]

Soustavu hlavice tvoří vysílač, přijímač, optická čočka, dalekohled a datové rozhraní. Celou konstrukci optické hlavice můžeme vidět na obrázku 3. Paprsek u vysílače i přijímače prochází čočkou, která ho usměrní. Čočka do značné míry ovlivňuje i dosah signálu. Vysílač vyše pomocí laserové diody úzký paprsek, na kterém jsou modulátorem namodulovaná data. Na druhé straně trasy je přijímač, který paprsek díky optoelektronickému prvku přijme a data zpracuje (demoduluje). Zjednodušený princip spojení dvou sítí můžeme vidět na obrázku 2. Signál se přenáší v infračerveném pásmu o vlnové délce 830–1550 nm. Světlo viditelné lidským okem se pohybuje v pásmu 400–750 nm, z toho vyplývá, že paprsek optického bezdrátového spoje je neviditelný. [4, 5]



Obrázek 2: Princip spojení dvou sítí (Zdroj: [9])





Obrázek 3: Konstrukce optické hlavičky (Zdroj: [17])

### 3.3 Základní podsystémy

Komunikace OBS stejně jako jiné komunikační technologie využívají tři základní podsystémy:

- Vysílač
- Kanál
- Přijímač

Blokový diagram OBS můžeme vidět na obrázku 4.

#### Vysílač (Transmitter)

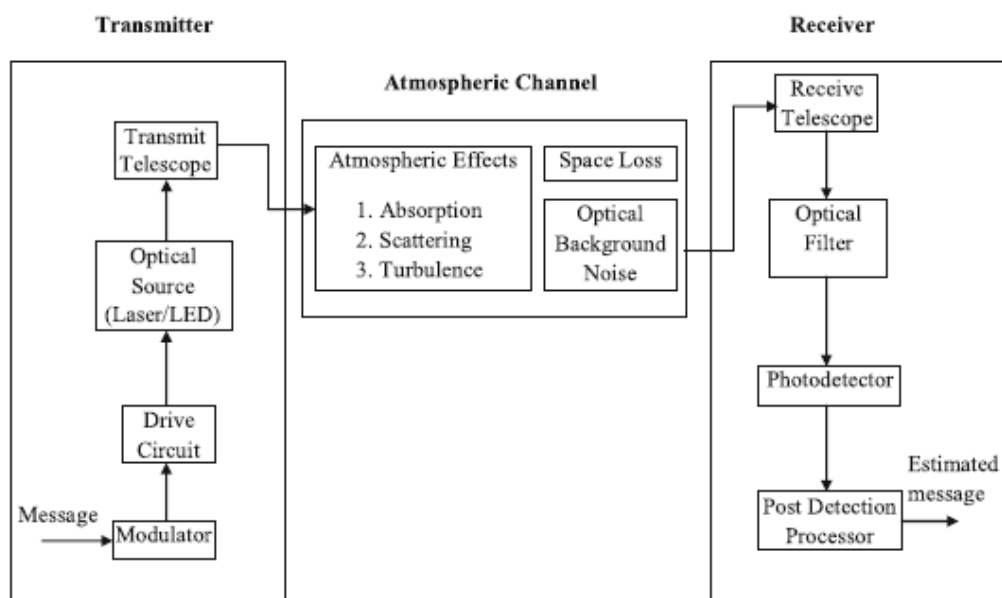
Jeho primární funkcí je modulovat signál na optický nosič, který se poté šíří atmosférou k přijímači. Základními součástmi vysílače je modulátor, obvod ovladače pro optický zdroj a dalekohled, který řídí optické vyzařování k přijímači. Nejpoužívanější modulací je modulace intenzity, ve které jsou zdrojová data modulována na intenzitu optického nosiče. Toho lze dosáhnout změnou proudu optického zdroje přímo se signálem zprávy, který má být vyslán. Další možnost je pomocí externího modulátoru.

#### Kanál (Channel)

Jelikož kanál OBS má jako své komunikační prostředí atmosféru, je ovlivňován nepředvídatelnými faktory prostředí \*podrobně zpracováno v kapitole 4.3. Tyto faktory způsobují útlum a zhoršení přijatého signálu. Kanál je jedním z omezujících faktorů výkonu OBS.

## Přijímač (Receiver)

Jeho primární cíl je obnovit vysílaná data z dopadajícího optického paprsku. Skládá se z přijímacího dalekohledu, optického filtru, fotodetektoru a demodulátoru. Přijímací dalekohled usměrňuje a zaostřuje příchozí optický signál přes optický filtr, který snižuje úroveň záření pozadí na fotodetektor. Ten převádí dopadající optický signál na elektrický signál. [15]



Obrázek 4: Blokový diagram OBS (Zdroj: [15])

## 3.4 Základní rozdělení

OBS se mohou dělit podle mnoha kritérií, např:

- podle prostředí a způsobu použití
- podle délky nosné vlny
- podle způsobu provozu
- podle přenosové rychlosti

### 3.4.1 Rozdělení podle prostředí a způsobu použití

Optické bezdrátové spoje se dělí na vnitřní (indoor) a vnější (outdoor).

#### Vnitřní spoje

Základní myšlenkou je rozdělení budovy na buňky a navázat spoj mezi rozdělenými buňkami. Pro spoj typu bod-bod (point to point) je hlavním problémem přenos optické informace k různě umístěným přijímačům. Tento druh přenosu rozdělujeme dvěma metodami, a to na metodu

difúzní a metodu kvazidifúzní. Difúzní metoda funguje na principu odrazu optického záření od stěn místnosti a následného doručení do umístěného přijímače. Kvazidifúzní metoda funguje na principu nasměrování vysílači na jedno místo a díky odrazu vzniká pasivní spojení s přijímačem. [6]

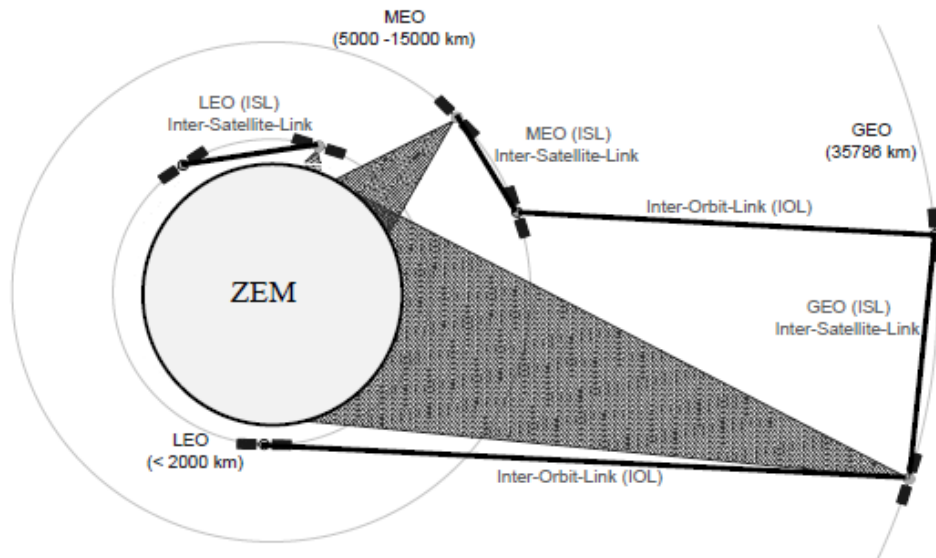
## **Vnější spoje**

Vnější spoje se dále rozdělují na atmosférické a satelitní. Atmosférické spoje mohou být ve formě stacionárního nebo mobilního. Přenos pomocí OBS se převážně využívá ve stacionární podobě.

**Stacionární optické bezdrátové spoje**, anglicky (FSO) – jsou „klasické“ optické bezdrátové spoje využívající se pro přenos na povrchu země.

**Mobilní optické bezdrátové spoje**, anglicky (M-FSO) – je OBS, u kterého se vzájemná poloha komunikačních stanic mění. M-FSO musí zvládnout komunikaci mezi vzájemně pohybujícími se stanicemi, a to i při vysokých rychlostech. Pozemské stanice mohou být umístěny na prostředcích pohybujících se po hladině vody či na nerovném terénu. Tato technologie využívá ke komunikaci i vzdušné a kosmické stanice, a proto má oproti FSO vysoké požadavky na přesnost vzájemného zamíření a sledování jednotlivých stanic. Prospěšnost a reálnost M-FSO se potvrdila z experimentů v rámci projektu CAPANINA a projektu MOND, do kterých se zapojili i evropské instituce. [2]

**Satelitní optické bezdrátové spoje** – se rozdělují na satelity pracující v blízkém kosmu (používají satelity Země) a satelity pracující ve vzdáleném kosmu (používají satelity Měsíce, Marsu apod.). [7] Malé rozměry, malá hmotnost a malá spotřeba elektrické energie spolu se schopností vysokého zabezpečení přenosu a vysoké rychlosti přenosu činí optický spoj ideální pro využití v kosmickém prostoru. Komunikační stanice mohou být nesené satelitem Země na některé z oběžných drah. Družice na geostacionární oběžné dráze GEO (Geostationar Earth Orbit) obíhá Zemi ve výšce 36 000 km nad rovníkem s dobou oběhu 24 hodin. Družice na střední oběžné dráze MEO (Medium Earth Orbit) obíhá Zemi cca. 5× denně ve výšce mezi 1200–35 000 km. Družice na nízké oběžné dráze LEO (Low Earth Orbit) obíhají Zemi ve výškách 200–1200 km s dobou oběhu mezi 80 až 130 minutami. Optické spoje mezi družicemi v závislosti na oběžných drahách a planetou Zemí můžeme vidět na obrázku 5. [2]



Obrázek 5: Optické spoje mezi družicemi a planetou Země (Zdroj: [5])

### 3.4.2 Rozdělení podle způsobu provozu

OBS pracují ve dvou různých provozech, a to v duplexním nebo simplexním.

- **Duplexní přenos** (oboustranný přenos) – na obou stranách je vysílač a přijímač (přenos najednou), nejčastější, použití např. ethernet
- **Simplexní přenos** (jednostranný přenos) – na jedné straně je vysílač a na druhé straně je přijímač, použití tam, kde není potřeba přenos oběma směry [4]

## 3.5 Zdroje záření

V moderní technologii FSO se používají pro přenos optickým svazkem různé zdroje světla. V současné době jsou primárními zdroji světla lasery a LED diody fungující na polovodičové bázi. Rozdíly mezi těmito dvěma zdroji jsou výkon, rychlost modulování dat a vlnová délka. Použití přesně daného přenosového zdroje se určuje podle vybraného systému. [8]

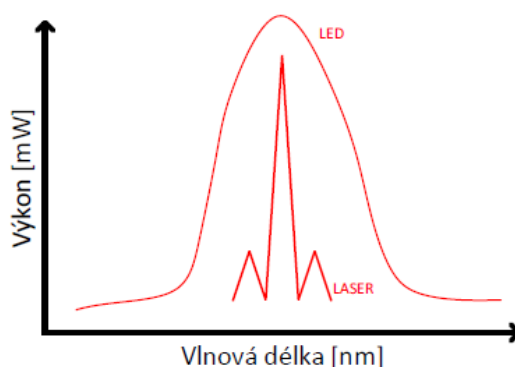
### 3.5.1 LED

LED (elektroluminiscenční dioda), v angličtině Light-Emitting Diode je elektronická polovodičová součástka fungující na principu P-N přechodu. Prochází-li přechodem P-N světelné diody elektrický proud v propustném směru, přechod emituje (vyzařuje) světlo s úzkým spektrem neboli o určité vlnové délce. Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení používaného polovodiče. LED diody se vyrábějí s různými pásmy vyzařování od ultrafialových, přes různé barvy viditelného záření, až po infračervené pásmo.

Mezi výhody LED patří dlouhá životnost, malá provozní teplota a jejich možná práce s malými hodnotami napětí a proudu. [8]

### 3.5.2 Laser

Laser (zesilování světla stimulovanou emisí záření), v angličtině Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, je optický zdroj elektromagnetického záření. Laserové diody jsou technologií, která se inspirovala ze základů výroby LED. Světlo je z laseru vyzařováno v podobě úzkého svazku, je koherentní a monochromatické. Laser je zdroj optického světla emitující fotony v paprsek. Pro správné pracování laserové diody musí v propustném směru protékat větší proud než prahový, který protéká v LED. Pokud tato podmínka nebude splněna, bude se chovat jako LED. Využití laseru je velice široké, zejména v oblastech telekomunikace, průmyslu, medicíny, kosmetice, výzkumu a podobně. [1] Porovnání spektra Laseru a LED můžeme vidět na obrázku 6.



Obrázek 6: Porovnání spektra laseru a LED (Zdroj: [9])

### 3.5.3 Nebezpečí poškození zraku

LED diody ve viditelném i neviditelném spektru jsou již vyráběny s příkonem až 1 W. Infračervené záření může poškodit povrch lidského oka, avšak nemůže poškodit sítnici. Laserové diody jsou nejnebezpečnější na vlnové délce 650 nm. Pro výkonné optické spoje se proto používají vlnové délky 850 nm a 1300 nm, které jsou pro oko více bezpečné, avšak neviditelné. U laserového záření hrozí nevratné poškození zraku, v horším případě úplná ztráta zraku. Ta nastane při poškození slepé skvrny na sítnici oka. [3]

## 3.6 Fotodetektory

Jiným názvem označované jako fotodiody jsou polovodičové zařízení, které přeměňují dopadající záření na elektrický proud. Pokud mají dopadající fotony dostatečnou energii, generují volné páry elektron-díra. Náboje se v obou stranách polovodiče hromadí a tím vznikne rozdíl potenciálů (fotoelektrické napětí). Levné fotodiody mohou být konstruovány z křemíku pro optické pásmo 780–950 nm. Existují dva aktuálně používané příklady zahrnující PIN a APD fotodetektor.[1]

### 3.6.1 PIN fotodetektory

Jsou to nejvíce používané detektory v systémech OBS. Fotodiody PIN je konstruována umístěním velkého vnitřního polovodičového materiálu mezi vrstvy P a N. Jakmile je umístěna ve zpětném předpětí, elektrické pole prochází přes většinu vnitřní oblasti. Dopadající světlo je absorbováno ve vnitřní oblasti a následně vytváří volné nosiče. Díky vysokému elektrickému poli jsou tyto nosiče náboje přesunuty z oblasti P do oblasti N. Tento způsob řeší problém s pomalou dobou náběhu. [1]

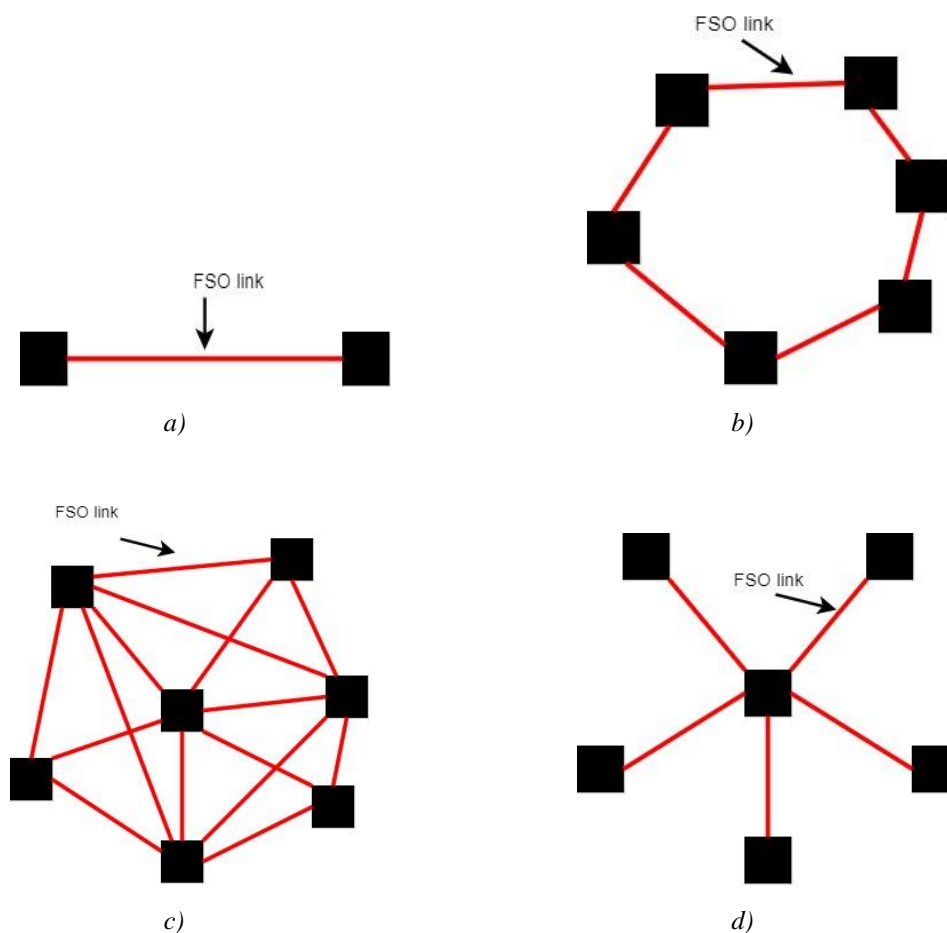
### 3.6.2 Lavinové fotodetektory (APD)

Základní konstrukce je velmi podobná konstrukci fotodiody PIN. Rozdíl je v tom, že pro každý foton, který je absorbován vnitřní vrstvou, může být vygenerováno více než jeden pár elektron-díra. V této oblasti je vytvořeno silné elektrické pole. Toto pole urychluje generované nosiče, které sražením s krystalickou mřížkou generují další nosiče. Nově generovaný pár je rovněž urychlen elektrickým polem a tento proces se opakuje jako takzvaný lavinový efekt. Nevýhodou tohoto schématu je to, že lavinový efekt generuje nadměrný šum kvůli proudu, který v zařízení proudí. [1]

## 3.7 Topologie optických bezdrátových sítí

Stejně jako jiné sítě mohou sítě OBS předpokládat různé konfigurace v závislosti na potřebách koncového uživatele. Existují proto čtyři běžné topologie: bod-bod (point to point), hvězda (star), síť (mesh) a kruh (ring). V topologii bod-bod může OBS podporovat rychlosti mezi 155 Mb/s až 10 Gb/s, a to ve vzdálenosti 2 až 4 km v pozemní aplikaci. V satelitní podobě se jedná o tisíce kilometrů, \*jak je zpracováno v kapitole 3.4.1. Tato architektura se využívá při připojení koncového uživatele jako tzv. „poslední míle“ s možností potenciálního růstu poskytujícího providera. Konfigurace hvězda zahrnuje více spojení pocházejících z jednoho uzlu a může podporovat stejné rychlosti jako bod-bod ve vzdálenosti 1 až 2 km. Toto řešení je

velmi známé a používá se nejčastěji. Topologie síť může podporovat rychlost až 622 Mb/s ve vzdálenostech 200 až 450 m. Je vhodné do městských oblastí s hustým osídlením, avšak je velice finančně náročné. Všechny tyto topologie je možné kombinovat. Kruh je běžná topologie používaná poskytovateli metropolitních služeb. Páteř je vysokorychlostního kruhového charakteru a je založena na optických vláknech nebo na bázi OBS. Všechny topologie mají své výhody i nevýhody, avšak nejužitečnější je topologie síť, která může přenášet data do uzlů z několika směrů a tím eliminuje výpadek způsobený přerušení jedné z páteří. Strukturu těchto čtyř topologií můžeme vidět na obrázku 7. [10]



Obrázek 7: Topologie OBS – a) bod-bod, b) kruh, c) síť, d) hvězda (Zdroj: [vlastní])

### 3.8 Výhody a nevýhody OBS

#### Výhody OBS:

- licence – nelicencované spoje (radiová komunikace je licencovaná)
- OBS může být součástí optických kabelových sítí (optical fibers)
- vysoká přenosová rychlost

- jednoduchá instalace, přenositelnost
- malá bitová chybovost
- možnost plně duplexního provozu (full duplex)
- vysoká odolnost proti elektromagnetickému rušení
- vysoká bezpečnost přenášených dat
- žádné vzájemné rušení

#### **Nevýhody OBS:**

- citlivost na vlivy prostředí (mlha, sníh, déšť, smog)
- signál může být snížen, utlumen
- větrné turbulence
- přímí sluneční svit (může ovlivňovat vysílač i přijímač)
- vysoká cena zařízení
- malý pracovní dosah (zpravidla do 5 km)
- nebezpečí poškození zraku
- nutnost přímé viditelnosti (občasné přerušení signálu – přelety ptáků) [3,5]



## 4 Atmosférické účinky na OBS

Technologie OBS ve stacionární podobě je závislá na šíření laserového paprsku troposférou. Troposféra je vrstva, ve které se vyskytuje mnoho jevů počasí. Ty se vzájemně ovlivňují a také ovlivňují kvalitu šířícího se optického signálu. Troposféra je obecně vysoce dynamickým a nestabilním prostředím a skládá se z plynů, par, vzdušného prachu, znečišťujících látek a dalších částic, které se neustále pohybují pod slunečním světlem. Všechny molekuly a částice v troposféře integrují se světlem a způsobují absorpci, rozptyl, útlum mlhy, útlum deště, útlum sněhu a další účinky, které ovlivňují optický signál OBS. V této části jsou probrány nejdůležitější troposférické jevy mající vliv na komunikaci OBS. [11]

### 4.1 Lambertův–Beerův zákon (Beer's Law)

Popisuje útlum světla procházejícího atmosférou díky absorpci a rozptylu. Obecně platí, že koeficient přenosu  $T$  laserového záření v atmosféře je realizován jako funkce v závislosti na vzdálenosti  $z$  takto:

$$T(z) = \frac{I_z}{I_0} = e^{-\gamma(\lambda)z} \quad (4.1)$$

kde,  $I_z/I_0$  je poměr detekované intenzity  $I_z$  v místě  $z$  a počáteční intenzity  $I_0$ . Závislost  $\gamma(\lambda)$  je koeficientem útlumu, který je funkcí vlnové délky. Koeficient útlumu je součet čtyř jednotlivých parametrů – koeficientů absorpce molekul a aerosolů  $\alpha_m$  a  $\alpha_a$ , a koeficient rozptylu molekul a aerosolů  $\beta_m$  a  $\beta_a$  z nichž jsou všechny funkcí vlnové délky. Koeficient útlumu je realizován vztahem:

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (4.2)$$

Tento vztah ukazuje, že celkový útlum představovaný koeficientem útlumu  $\gamma$  je výsledkem procesů rozptylu a absorpce. [12]

### 4.2 Atmosférické jevy

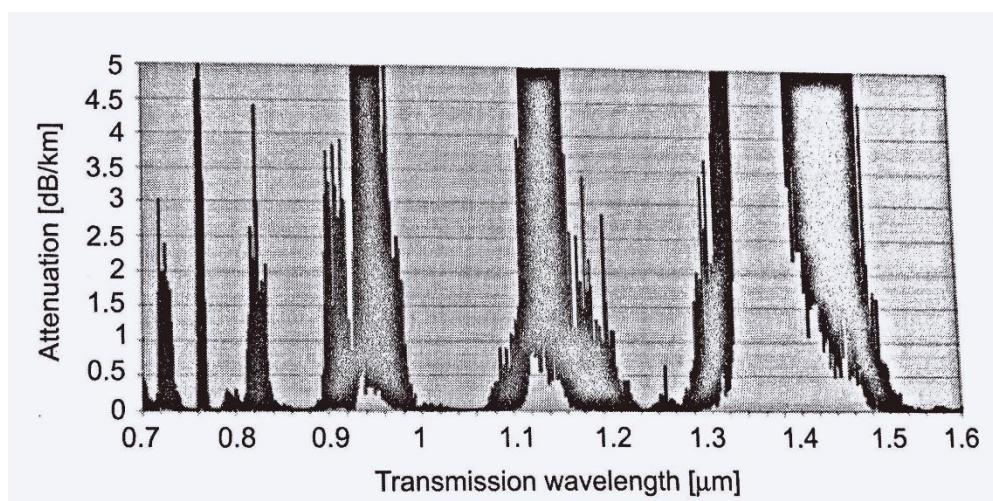
#### 4.2.1 Absorpce

Tento jev nastává v situaci, kdy dojde ke kolizi mezi šířícími se fotony světla a molekulami v atmosférickém prostředí. Hojnost absorbujících částic určuje, jak silně bude optický signál

zeslaben. Částice lze rozdělit do dvou tříd – molekulární a aerosolové absorbéry. Molekulární absorpce je způsobena interakcí laserového paprsku s molekulami plynu jako např.:  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  atd. Částice jsou charakterizovány indexem lomu. Imaginární část  $n_{im}$  indexu lomu se vztahuje k absorpčnímu koeficientu podle vzorce:

$$\alpha_m = \frac{4\pi n_{im}}{\lambda} = \sigma_{abs} N \quad (4.3)$$

kde,  $\sigma_{abs}$  je absorpční průřez a  $N$  je koncentrace absorbujících částic. Absorpční koeficient je funkcí absorpční síly daného typu částic a je závislý na vlnové délce. Tento přenos v atmosféře vede k tomu, že jeho přenosové vlastnosti mají průhledná nebo neprůhledná okna. Vznikají tak okna s nízkými ztrátami přenosu soustředěná na vlnové délky 850 nm, 1300 nm a 1500 nm. [12] Okno přenosu optického signálu za jasných podmínek můžeme vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Okno přenosu optického signálu za jasných podmínek (Zdroj: [12])

Aerosoly jsou suspendované kapalně nebo pevně částice přítomné v atmosféře. Kapalně aerosoly jsou přítomny ve formě mlhy, oparu atd., naopak prach, částice mořské soli, pouštní prach a sopečné zbytky jsou aerosoly pevné. Velikost těchto částic se může pohybovat od 0,01  $\mu\text{m}$  až do 10,0  $\mu\text{m}$ . [12]

#### 4.2.2 Rozptyl

Rozptyl světla může drasticky snížit výkonnost systému OBS. Rozptyl nastává v situaci, kdy se světlo srazí s částicemi aerosolů a je odkloněno do libovolného směru. Při rozptylu nedochází k žádné ztrátě energie, neboť dochází ke směrovému rozdělení energie do jiných úhlů. To může

výrazně snížit intenzitu paprsku na delší vzdálenosti ve směru šíření. Jeden ze způsobů klasifikace tohoto jevu je dán vztahem:

$$\Omega = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (4.4)$$

kde,  $\lambda$  je vlnová délka a  $r$  je poloměr částice různých aerosolů, které se mohou objevit v průběhu přenosu. Rozptyl lze rozdělit podle fyzické velikosti. Pro  $\Omega \ll 1$  je rozptyl označován jako Rayleighův s velmi malým koeficientem. Když je  $\Omega \approx 1$ , jedná se o Mieův rozptyl, a pokud je  $\Omega \gg 1$ , takový rozptyl je označen jako neselektivní (geometrický). [12] To je jeden z důvodů, proč se používají vlnové délky v rozsahu infračerveného spektra. Mlhové částice mají velmi malý poloměr oproti částicím dešťovým a sněhovým, a tudíž představují větší překážku světelnému paprsku. Rozptyly a poloměr částic je zobrazen v tabulce 1. [9]

Typ částice	Poloměr [ $\mu\text{m}$ ]	Velikost parametru $\Omega$	Typ rozptylu
Vzdušné molekuly	0,0001	0,000405	Rayleighův
Lehká mlha	0,01–1	0,0405–4,05	Rayleighův–Mieův
Mlha	1–20	4,05–81,07	Mieův–Neselektivní
Děšť	100–10 000	405–40 500	Neselektivní
Sníh	1000–5000	4050–20 300	Neselektivní
Kroupy	5000–50 000	20 300–203 000	Neselektivní

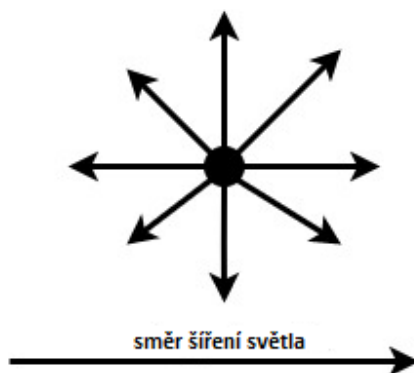
Tabulka 1: Rozptyl a poloměr částic pro vlnovou délku 1550 nm (Zdroj: [15])

### Rayleighův rozptyl

Tento rozptyl nastane, když jsou částice v atmosféře menší než vlnová délka světla, které jimi prochází. Následkem Rayleighova rozptylu se kratší vlnové délky (modré) rozptylují více než delší vlnové délky (červené). V důsledku toho je během dne obloha modrá, protože to, co vidíme je rozptýlené světlo částicemi a molekulami atmosféry. Při pohledu na slunce vidíme nezkrácené světlo, a proto je jeho barva červeno žlutá. [11] Rayleighův typický vzorec pro průřez rozptylu je definován vztahem:

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5}{3} \left( \frac{n^2-1}{n^2+2} \right)^2 \frac{(2r)^6}{\lambda^4} \quad (4.5)$$

kde,  $n$  je index lomu a závislost  $\lambda^{-4}$  ve vztahu znamená, že kratší vlnové délky jsou v atmosféře rozptýlené mnohem více než delší vlnové délky. Proto systémy OBS pracují ve větších vlnových délkách infračerveného spektra a tím se zanedbává dopad Rayleighova rozptylu, který můžeme vidět na obrázku 9. [12]



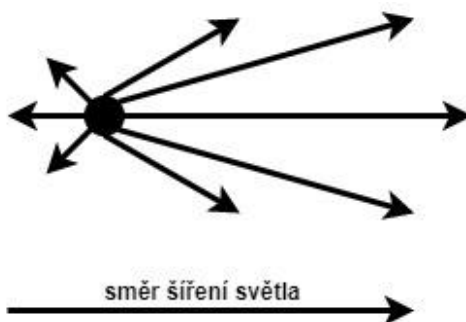
Obrázek 9: Princip Rayleighova rozptylu (Zdroj: [vlastní])

### Mieův rozptyl

Mieův rozptyl nastane, když je poloměr částic v atmosféře přibližně stejně veliký jako vlnová délka procházejícího světla. Za Mieův rozptyl jsou zodpovědné převážně částice prachu, kouře, mlhy a páry. V důsledku toho se tento rozptyl vyskytuje převážně v dolní troposféře, kde je vyšší koncentrace těchto částic. [11] Empirický vzorec pro výpočet útlumové konstanty v důsledku Mieova rozptylu je dán vztah:

$$\gamma = \frac{3,91}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (4.6)$$

kde,  $\gamma$  je koeficient atmosférického útlumu,  $V$  odpovídá viditelnosti v km,  $\lambda$  je vlnová délka přenosu v nm a  $q$  je velikost rozptylových částic, která je závislá na  $V$  dle definované tabulky (např.  $q = 1,6$  pro vysokou viditelnost ( $V > 50$  km)). [12] Mieův rozptyl je vidět na obrázku 10.



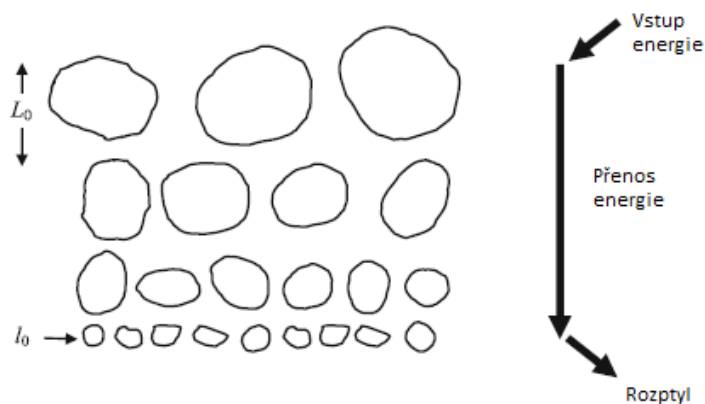
Obrázek 10: Princip Mieva rozptylu (Zdroj: [vlastní])

## Geometrický (neselektivní) rozptyl

K tomuto rozptylu dochází, když jsou částice v atmosféře o mnoho řádů větší než vlnová délka procházejícího světla. V takovém případě závisí rozptyl a útlum světla na hustotě částic na krychlový centimetr nebo metr. Částice zodpovědné za tento rozptyl jsou například písek, prach, sníh a kroupy, které se mohou během silných větrů šířit ve vzduchu. \*Přibližné poloměry různých molekul a částic můžeme vidět v tabulce 1. [11]

### 4.2.3 Atmosférická Turbulence

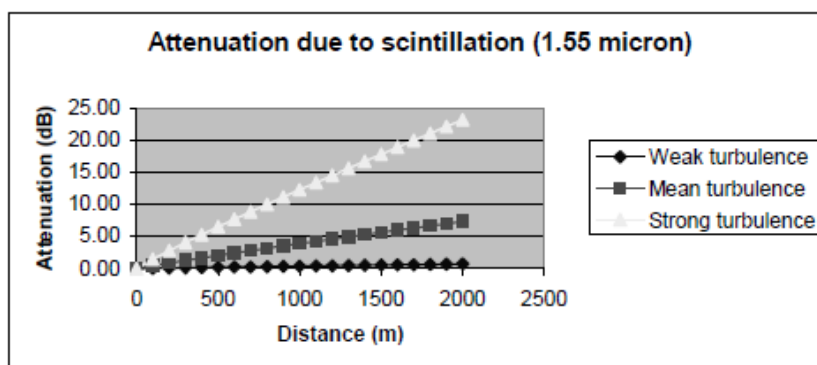
Turbulence je náhodný jev, ke kterému dochází v atmosféře v důsledku změny indexu lomu vzduchu v závislosti na teplotě. Ohřátý vzduch stoupající ze zemského povrchu vytváří teplotní změny mezi vzduchovými víry. To způsobuje změnu indexu lomu a následné odklonění paprsku světla do různých směrů. Jelikož vzduchové buňky nejsou stabilní, bude změna indexu lomu vytvářet náhodný pohyb. Míru turbulence můžeme vypočítat koeficientem indexu lomu  $C_n^2$ . Ten se mění v závislosti na denní době a výšce od země. Největší  $C_n^2$  je zpravidla blízko u země a s narůstající výškou jeho hodnota klesá. Jelikož vzduch potřebuje čas na zahřátí, turbulence je zpravidla největší uprostřed odpoledne ( $C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$ ) a nejslabší hodinu po západu nebo východu slunce ( $C_n^2 = 10^{-17} m^{-2/3}$ ). [12] Kinetická energie z velkých vírů, charakterizovaná parametrem vnější velikosti  $L_0$ , se přenáší na víry zmenšující se velikosti charakterizované vnitřní mírou  $l_0$ . Velikost  $L_0$  a  $l_0$  se typicky udává v milimetrech. Vztah energie a turbulentních vírů můžeme vidět na obrázku 11. Jeden z nejdůležitějších omezujících faktorů, který působí na komunikační spojení OBS a je způsobený účinky turbulence je scintilace. [13]



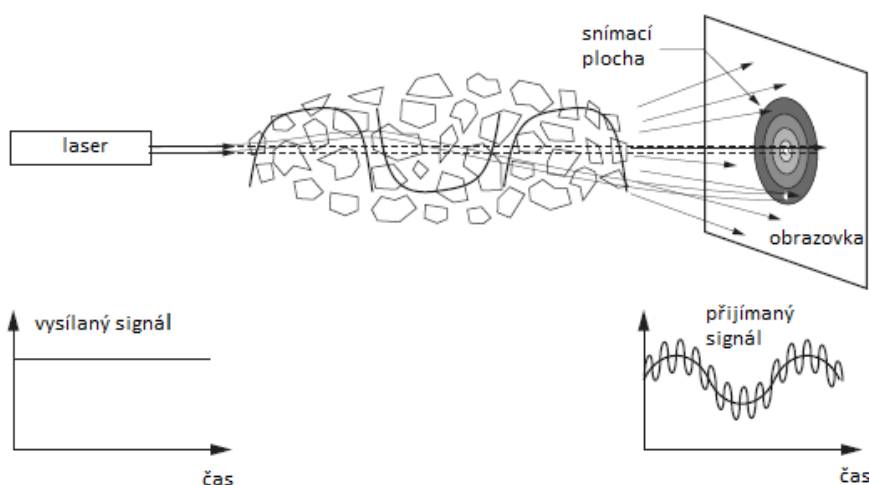
Obrázek 11: Atmosféra s turbulentními víry (Zdroj: [15] – upraveno dle autora)

## Atmosférická scintilace

Scintilace je jev, který nastane při kolísání signálu v důsledku tepelné turbulence nebo jej můžeme definovat jako změnu intenzity světla v čase a prostoru. Tento jev nalezneme v ose přijímače, kdy se signál náhodně rozostří nebo zaostří na fotodetektor. Tyto signály fázově posunuté vůči sobě dorazí současně k přijímači, a to způsobí, že amplituda přijímaného signálu může kolísat až o 30 dB. Frekvenční změna se obvykle pohybuje mezi 0,01–200 Hz. Vztah mezi útlumem a vzdáleností v důsledku scintilace vidíme na obrázku 12. Atmosféra je směsí plynů, molekul a částic, které nepřetržitě získávají nebo ztrácejí energii. Některé buňky jsou zahřívány více než jiné, a jiné jsou zase více chlazeny. Tím dochází ke kontrakci a pohybu vzduchových buněk do různých směrů. Konečným výsledkem je tepelná turbulence ve vzduchových buňkách charakterizována nehomogenním a dynamicky se měnícím indexem lomu, vzduchovou konzistencí a hustotou. [11, 12] Princip scintilace je vyobrazen na obrázku 13.



Obrázek 12: Útlum v důsledku scintilace (Zdroj: [14])



Obrázek 13: Princip scintilace (Zdroj: [15])

## 4.3 Atmosférické faktory

V této části jsou probrány atmosférické faktory (vlivy počasí) a aerosoly, které způsobují absorpci a rozptyl a tím mají negativní vliv na OBS.

### 4.3.1 Mlha

Největší problém pro technologii zaměřenou na optický bezdrátový přenos je mlha. V meteorologických podmínkách se mlha označuje jako stav počasí, kdy je dohlednost nižší než 1 km. Mlha se vytvoří za předpokladu, když se vodní pára v přízemní vrstvě o vysoké koncentraci (téměř 100% vlhkosti) kondenzuje do malých kapiček vody o průměru několik mikronů. [16] Rozdělení velikosti částic se liší pro různé stupně mlhy, jak je uvedeno v tabulce 1. Z toho důvodu může mlha měnit vlastnosti světla anebo úplně bránit průchodu světla kombinací absorpce, rozptylu a odrazu. Mlhy mohou být velmi silné s hodnotami útlumu více než 350 dB/km, ale i mírné, které mohou infračervený signál na kratší vzdálenost také silně zeslabit. Mlhy se vytváří v různých podnebních jinak, a proto existuje mnoho mechanismů, které tvoří mlhu jako například mrazivá mlha, ledová mlha, protektivní mlha atd. [12]

### 4.3.2 Déšť

Déšť je nejčastějším jevem počasí v mírném podnebí. Útlum deště v optických pásmech je závislý na velikosti a hustotě kapek a je výrazně menší než útlum mlhy, protože dešťové kapky jsou mnohem větší než vlnová délka typických světelných zdrojů OBS. Velikost dešťových kapek se pohybuje od stovek  $\mu\text{m}$  do poloměru až 4 mm. Tyto velikosti rozmezí jsou v různých publikacích od různých autorů uváděny diametrálně rozdílně. Větší kapky jsou nestabilní a mají tendenci se rozpadat. [16] Při silném dešti způsobuje absorpční ztráta vody útlum asi 10 dB/km, což je výrazně méně než ztráta rozptylu mlhy. Typická hodnota útlumu signálu deštěm je, pro představu při srážkách 2,5 cm/h, 6 dB/km. Déšť také může vytvořit vodní vrstvu na okenním skle. To v případě vysílače/přijímače umístěného za sklem může odklonit část laserového paprsku mířícího k přijímači. [12]

### 4.3.3 Smog

Smog je kombinací kouře a mlhy. Ve skutečnosti se jedná o znečištěné ovzduší, které vytvářejí továrny v důsledku spalování uhlí emitující velké množství oxidu uhličitého a kouře. V současné době byl smog ve vyspělých zemích značně snížen v důsledku aktu o čistém vzduchu. Emise z průmyslu a dopravních vozidel interaguje s vlhkostí a dalšími molekulami v atmosféře a vlivem slunečních paprsků tvoří sekundární chemické znečištění. Tento proces

se nazývá fotochemický smog. Látky, které mají škodlivý vliv na živé organismy jsou aldehydy, oxidy dusíku a další těkavé organické sloučeniny. [11]

#### **4.3.4 Sníh**

Sníh je tvořen ledovými krystaly, které mají nepravidelný tvar a různou velikost. Velikost sněhové částice je obvykle mezi částicemi mlhy a deště, jak můžeme vidět v níž uvedené tabulce 1. Jelikož je velikost sněhových vloček ve srovnání s provozní vlnovou délkou větší, pro systémy OBS nepředstavuje rozptyl velký problém. Obecně je útlum způsobený sněhem větší než deštěm a menší než mlhou. Slabé sněžení můžeme zařadit mezi lehký déšť a mírnou mlhu s potenciálním útlumem přibližně 3 až 30 dB/km. Silné sněžení může způsobit nahromadění sněhu a ledu v okenních tabulích nebo na optických hlavících. V takovém případě pak může blokovat celý laserový paprsek. [12]

Následující tabulka 2 uvádí mezinárodní kód viditelnosti ukazující útlum (dB/km) pro různé klimatické podmínky:

- Počasí – od velmi jasna až po hustou mlhu
- Srážky – od mrholení až po bouřku
- Viditelnost – od 50 km po 50 m



Mezinárodní tabulka viditelnosti					
Atmosférické jevy	Složky počasí [mm/h]		Viditelnost [m]	Útlum [dB/km]	
Velmi hustá mlha			50	315	
Hustá mlha			200	75	
Středně hustá mlha			500	28,9	
Řídká mlha	Sníh	Bouře	100	770	18,3
Velmi řídká mlha				1000	13,8
		Silný déšť	25	1900	6,9
Lehký opar				2000	6,6
		Středně silný déšť	12,5	2800	4,6
Velmi jasný opar				4000	3,1
		Lehký déšť	2,5	5900	2
				10 000	1,1
Jasno		Mrholení	0,25	18 100	0,6
				20 000	0,54
Velmi jasno			23 000	0,47	
			50 000	0,19	

Tabulka 2: Mezinárodní tabulka viditelnosti (Zdroj: [14] – upraveno dle autora)

## 5 Fyzikální princip technologie

### 5.1 Volba vlnové délky v komunikačním systému OBS

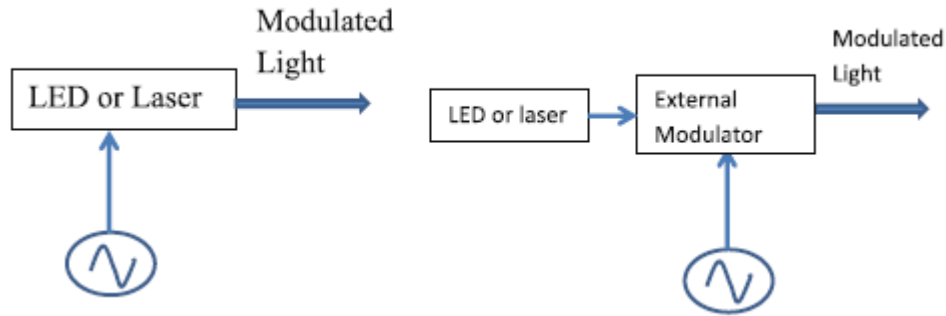
Výběr vlnové délky je důležitý parametr, který ovlivňuje výkon propojení a detekční citlivost systému. Jelikož dosah vysílače je nepřímo úměrný provozní vlnové délce, je výhodnější pracovat v nižších vlnových délkách. Vyšší vlnové délky však poskytují lepší kvalitu spojení a nižší zeslabení signálu vyvolané směřováním. Volba vlnové délky závisí na atmosférických jevech a útlumu. Mezinárodní komise pro osvětlení klasifikovala optické záření do tří kategorií:

- IR–A (vlnová délka 700–1400 nm)
- IR–B (vlnová délka 1400–3000 nm)
- IR–C (vlnová délka 3000–1 mm)

Skoro všechny komerčně dostupné systémy OBS využívají rozsah vlnových délek IR–A nebo IR–B. Tyto rozsahy se používají, protože se na stejných vlnových délkách komunikuje pomocí optických vláken a komponenty pracující v tomto rozsahu jsou běžně dostupné na trhu. Rozsah IR–C se využívá ve vojenství na naváděné rakety a k tepelnému zobrazování okolí. [15]

### 5.2 Modulace a detekce

V této části jsou probírána různá detekční a modulační schémata použitá v systému OBS. Optická modulace může být provedena dvěma způsoby, a to interně nebo externě, jak můžeme vidět na obrázku 14. V interním modulátoru se charakteristiky zdroje přímo mění spolu s informačním signálem a tím se vytvoří modulovaný optický signál. Intenzitu modulace lze realizovat změnou proudu. V případě externí modulace je využito externích zařízení pro změnění vlastnosti nosiče podle modulačního signálu. Tyto systémy jsou schopny využít plný výkon zdroje, avšak omezují modulační rozsah a vyžadují vysoký proud. Obecně lze modulační schémata rozdělit do dvou kategorií: modulace intenzity v základním pásmu a subnosná modulace intenzity. V rámci detekce signálu se může využívat také mnoho metod, avšak nejběžnější metodou používanou pro pozemní detekci optického signálu je detekce přímá. [15]



Obrázek 14: Vlevo–interní modulace, vpravo–externí modulace (Zdroj: [15])

### 5.2.1 Modulace signálu

Ve vysílači je zdroj signálu, který je nad prahovou hodnotou pro lineární převod mezi vstupním proudem  $x(t)$  a výstupní optickou energií  $P_t(t)$ . Elektrooptická proměna na vysílači může být definována jako:  $P_t(t) = mx(t)$ , kde  $m$  je optický zisk záření v jednotkách  $W/A$ . Stejně tak je na přijímací straně lineární optoelektrická přeměna přijímaného signálu optické energie  $P_r(t)$  na elektrický fotoproud  $y(t)$  definovaný modelem:  $y(t) = \mathfrak{R}P_r(t)$ , kde  $\mathfrak{R}$  je citlivost detektoru v  $W/A$ . Přijatý signál v přijímači je definován jako:

$$P_r(t) = \alpha_0(\lambda, t)P_t(t) \quad (5.1)$$

kde,  $\alpha_0$  závisí na délce spojení charakteristické použitým kanálem a optikou. [12]

### 5.2.2 Systém přímé detekce

V metodě přímé detekce je přijímaný optický signál veden přes optický filtr, aby se omezilo záření na pozadí. Poté signál dopadne na fotodetektor, který ho přemění na výstupní elektrický signál úměrný intenzitě přijímaného optického signálu. Poměr signál–šum, označený značkou SNR přijímače může být získán použitím šumových modelů pro konkrétní detektor jako je PIN nebo APD. Poměr SNR pro PIN fotodetektor je dán rovnicí:

$$SNR = \frac{(R_0 P_R)^2}{2qB(R_0 P_R + R_0 P_B + I_d) + 4K_B T B / R_L} \quad (5.2)$$

kde,  $R_0$  je citlivost detektoru, a je dána:

$$R_0 = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (5.3)$$

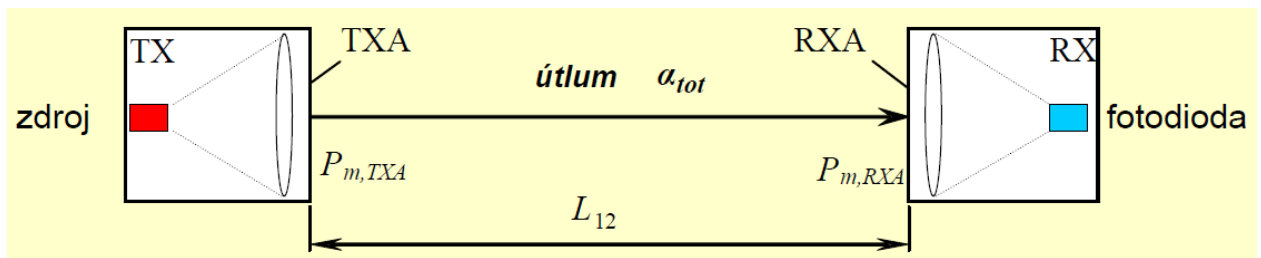
Ve výše zobrazené rovnici (5.3) je  $\eta$  kvantová účinnost detektoru,  $q = 1.602 * 10^{-19}$  J je elektrický náboj,  $h = 6.623 * 10^{-34}$  J je Planctova konstanta a  $\nu$  je provozní frekvence. Parametry u rovnice (5.2) jsou –  $B$  představující šířku pásma přijímače,  $I_d$  je temný proud,  $K_B$  je Boltzmannova konstanta,  $T$  je absolutní teplota,  $R_L$  je ekvivalentní zátěžový proud,  $P_R$  je přijatý výkon a  $P_B$  je výkon hluku v pozadí. [15]

### 5.3 Výkonová bilance

Základní komunikační rovnice pro optické bezdrátové systémy má tvar:

$$P_{m,RXA} = P_{m,TXA} - \alpha_{tot} \quad (5.4)$$

kde,  $P_{m,RXA}$  je střední výkon přijatý na vstupu přijímače RXA,  $P_{m,TXA}$  je střední výkon výstupního vysílače TXA a  $\alpha_{tot}$  je celkový útlum prostředí mezi vysílačem a přijímačem v dB. Princip můžeme vidět na obrázku 15. [4]



Obrázek 15: Schéma principu přenosu signálu (Zdroj: [17])

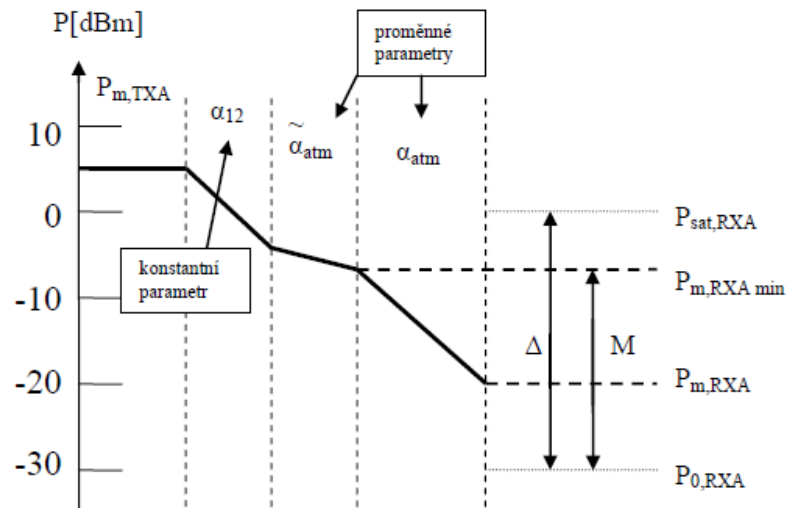
Celkový útlum  $\alpha_{tot}$  se skládá z více útlumových složek a je definován rovnicí:

$$\alpha_{tot} = \alpha_{12} + \tilde{\alpha}_{atm} + \alpha_{atm} \quad (5.5)$$

kde,  $\alpha_{12}$  je útlum šíření,  $\tilde{\alpha}_{atm}$  je útlum průchodem „čistou“ atmosférou a  $\alpha_{atm}$  je útlum způsobený atmosférickými jevy. Výkonový úrovněvý diagram je zobrazen na obrázku 16. [4] Útlum šíření  $\alpha_{12}$  můžeme vyjádřit vztahem:

$$\alpha_{12} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{12}} \right| \quad (5.6)$$

kde,  $L_0$  je vzdálenost mezi výstupním vysílačem TXA a teoretickým bodem S, od kterého zdroj vysílá záření. Vzdálenost mezi TXA a RXA se označuje jako  $L_{12}$  a je vidět na obrázku 15. [17]



Obrázek 16: Výkonový úroňový diagram (Zdroj: [4])

Ve výkonovém diagramu jsou vyobrazeny další složky a to  $P_{RXA}$  a  $P_{m,RXA min}$ , které značí střední hodnotu přijatého výkonu pro „čistou“ atmosféru. Saturační  $P_{sat,RXA}$  a citlivostní  $P_{0,RXA}$  práh přijímače jejichž rozdíl se dynamicky mění rozsahem přijímače  $\Delta$ . Pokud na spoji nastane útlum takový, který zapříčiní klesnutí signálu na přijímači pod citlivost prahu, pak nastane výpadek komunikace. Linková rezerva  $M$  značí rozdíl mezi střední hodnotou „čisté“ atmosféry a prahem citlivosti. [4]

## 6 Parametry a limity

### 6.1 Dosah a přenosové rychlosti

Varianty optické bezdrátové komunikace, anglicky OWC (Optical wireless communications) mohou být využity v různých komunikačních oblastech od optických propojení v integrovaných obvodech, přes pozemní spojení až po satelitní komunikaci. Na obrázku 18. můžeme vidět rozdělení do kategorií dle dosahu. Existují dvě hlavní aplikační oblasti OWC, a to širokopásmová síť na dlouhé vzdálenosti a kancelářské spojení. Nejmodernější systémy OWC mohou podporovat ethernet 10 Gb/s, což se rovná rychlosti dosahované v technologii optických vláken a je výrazně vyšší než 60 GHz vysokofrekvenční bezdrátové systémy. Optickou bezdrátovou komunikaci můžeme rozdělit dle dosahu na:

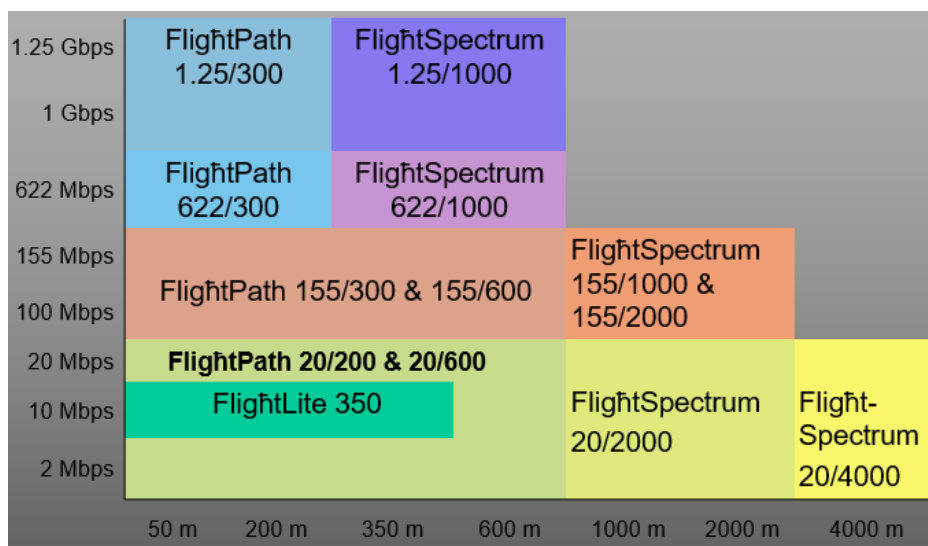
**OWC s velmi krátkým dosahem** – Hlavním představitelem jsou integrované obvody pro superpočítače a výkonná datová centra. Vzdálenost propojení je velikosti  $\approx$ mm. Po prvním porovnání výkonu a rychlosti mezi optickým a elektrickým propojením se zjistilo, že optické propojení s vynikajícími vlastnostmi jako jsou vysoká šíře pásma, nízká latence a nízká spotřeba energie bohatě nahradí kovová propojení.

**OWC s krátkým dosahem** – Typickou bezdrátovou aplikací s krátkým dosahem řádově v desítkách centimetrů je síť těla (WBAN), která zahrnuje přenosná zařízení a senzory pro vyhledání fyzických a biochemických informací jednotlivce. WBAN se využívá ve zdravotnictví. Další aplikací je bezdrátová osobní síť (WPAN), která zahrnuje připojení osobních pracovních zařízení jako je telefon, notebook, tiskárna atd. Je to OWC přenos ve formě infračervené LED komunikace (IrDA) umožňující přenos až 1 Gb/s.

**OWC se středním dosahem** – Ve střední oblasti v řádu metrů je typickou bezdrátovou sítí lokální síť WLAN. Dnešní WLAN neboli Wi-Fi je založena na radiové frekvenci. To se však mění vznikem VLC, jinak označované jako Li-Fi. Tato technologie využívá všudypřítomnost osvětlovací infrastruktury založené na LED. \*Více informací k této technologii je v kapitole 8.2.

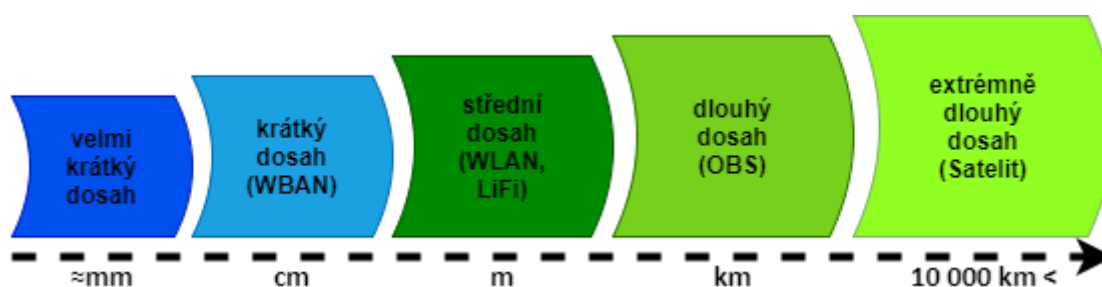
**OWC s dlouhým dosahem** – Bezdrátové technologie s dlouhým dosahem v rámci kilometrů jsou třeba OBS, 4G a 5G sítě založené z velké části na technologiích milimetrových vln. Komunikace OBS má ve srovnání se svými vysokofrekvenčními protějšky velmi vysokou optickou šířku pásma, což umožňuje vysoké datové rychlosti. Systémy OBS lze použít pro řadu

komunikačních realizací jako je rozšíření metropolitních sítí (WMAN) nebo připojení WLAN k jiné WLAN v podnikových a vysokoškolských prostorech. Základní rozdělení v komerčním použití dle dosahované přenosové rychlosti v závislosti na vzdálenosti můžeme vidět na obrázku 17. [16]



Obrázek 17: Dosahované přenosové rychlosti firmy CESNET (Zdroj: [3])

**OWC s extrémně dlouhým dosahem** – Tento dosah je určen pro letecký a kosmický provoz. Existuje celá řada realizace OBS v oblasti kosmických komunikací včetně vesmírných spojů a leteckých spojů \*podrobně zpracováno v kapitole 3.4.1. V roce 2013 byla předvedena laserová komunikace NASA Lunar, která využívala OBS pro spojení mezi Měsícem a Zemí. Nabízena přenosovou rychlost 622 Mb/s při vzdálenosti 384 600 km. [16]



Obrázek 18: Kategorie OWC dle dosahu (Zdroj: [vlastní])

## 6.2 Bezpečnost

Přestože jsou optické technologie složitější než jejich předchůdci, přitahují mnoho útočníků kvůli obrovskému množství informací, které přenáší. Aby byla zajištěna bezpečnost a integrita dat, jakož i uživatelské soukromí, byly vyvinuty velmi složité a sofistikované algoritmy. Ochrana informací a dat je realizována v aplikační vrstvě, na rozhraní vrstev referenčního modelu jako je ISO a TCP/IP a na transportní vrstvě. [11]

### 6.2.1 Kryptografie

Tento proces transformuje data (nebo obyčejný text) na nesrozumitelná a nezjistitelná data nebo zašifruje text pro všechny uživatele. Pouze oprávněný příjemce má zvláštní znalosti převést šifru zpět do původní podoby. Kryptografie provádí několik důležitých služeb informační bezpečnosti jako je autentizace zdroje, autentizace cíle, autorizace a integrita dat. Proces měnění podoby původních dat na nesrozumitelná data se nazývá kódování nebo šifrování. Opačný proces je dekódování či dešifrování. Za účelem vytvoření šifrovaného textu potřebuje odesílatel šifrovací klíč. Způsob, kterým je šifrovací klíč převáděn a odsouhlasen odesílatelem i příjemcem je proces vytvoření klíče. Pokud byl klíč dohodnut, může být zaregistrován v archivu správy klíčů. Pokud je podezření, že je klíč napaden, je odvolán a dojde k restartu vytvoření klíče. Existuje mnoho metod kryptografie, šifrování a také druhů klíčů. Mezi atraktivní metody patří kryptografie veřejného klíče, která používá dvojici šifrovaných klíčů, z nichž je jeden veřejný a druhý soukromý. [11]

### 6.2.2 Úroveň bezpečnosti

Kryptografický modul obsahuje šifrovací podjednotky, veřejné a soukromé klíče, paměť a registry. Modul má datové vstupně-výstupní porty a údržbový port. Ty mohou být ovlivněny elektromagnetickým rušením nebo kolísáním výkonu. Třetí osoba tak může využít slabosti modulu k neoprávněnému přístupu do registru klíčů. Správa zabezpečení definuje dle FIPS 1402 čtyři úrovně zabezpečení a to:

**SL-1** – Specifikuje základní požadavky na kryptografický modul. Jedním z nich je deska pro šifrování osobních počítačů.

**SL-2** – Chrání před neoprávněným fyzickým přístupem.



**SL-3** – Snaha zabránit útočnickovi získat přístup k CSP v kryptografickém modulu. Vyžaduje mechanismy fyzické bezpečnosti. Tato úroveň vyžaduje fyzicky oddělené vstupně-výstupní porty pro šifrovaný text.

**SL-4** – Poskytuje úplnou fyzickou bezpečnost kolem kryptografického modulu. Detekuje jakýkoliv pokus proniknutí do modulu a odcizení kryptografických klíčů. [11]

### **6.2.3 Zabezpečovací vrstvy**

Moderní komunikační sítě se nezaměřují pouze na bezpečnost datových zpráv uživatelů, ale jsou rozsáhlé v rámci celé sítě. Data vstupují do počítačových uzlů, kde jsou zajištěna pomocí zpráv o řízení sítě. Z důvodů možnosti zachycení komunikace třetí stranou se data šifrují. Šifrování dat je jedním z mnoha druhů zabezpečené komunikace, která se nachází na informační vrstvě. Předpokládá se, že útočník může zaútočit na uzel komunikační sítě a tam odposlouchávat nebo kopírovat zašifrovaná data. Pokud by se dostal k šifrovacímu klíči, mohl by data rozšifrovat, změnit a zase zašifrovat. Z tohoto důvodu se vyžaduje monitorování a odhalování škodlivých zásahů přímo na fyzické vrstvě sítě. Další zabezpečovací vrstvou je zabezpečení na vrstvě MAC/sít'. Tato vrstva předpokládá, že útočník nemá zájem o odposlech, ale o způsobení škody zničením zpráv ve směrovačích, změněním cílové adresy atd.

#### **Informační vrstva**

První úroveň zabezpečení v informační vrstvě je zašifrování dat. To probíhá u zdroje, dešifrování dat u příjemce. Účinnost kryptografické metody závisí na rychlosti převodu šifrovaného textu a délce klíče. Čím delší je klíč, tím delší je dešifrování, ale také těžší výpočet klíče třetí stranou.

#### **MAC/sít'ová vrstva**

Řízení přístupu k MAC je založen na výpočtech a odpovídá za zabezpečení přístupu k síti (autorizaci). Vrstva MAC obecně vypočítává nejlepší cestu v síti tím, že přesměrovává, opakuje nebo zahazuje pakety. Tato vrstva zaručuje správnou činnost sítě a pokud nefunguje správně, může způsobit přetížení uzlů nebo celé sítě. Zabezpečení uzlů je zajištěno firewally a dynamicky se měnícími přístupovými hesly.

#### **Spojovací vrstva**

Spojovací vrstva zahrnuje komunikační spojení z vysílače do přijímače včetně přenosového média. V komunikačních sítích jsou dva druhy média, řízené a neřízené. Do řízených patří

kroucená dvojlinka, koaxiální kabel atd. a do neřízeních patří elektromagnetické vlny nebo optický paprsek šířící se volným prostorem. Zatímco elektromagnetické vlny jsou zranitelné vůči odposlouchávání, optický paprsek je bezpečný, protože paprsek je velmi úzký a pro lidské oko neviditelný. Při narušení paprsku se spojení přeruší a síť zahlásí chybu spojení. [11]

#### **6.2.4 Bezpečnostní funkce OBS**

Technologie optické komunikace vyžadují zabezpečení na všech úrovních. Zabezpečení můžeme rozdělit na dva druhy, a to na fyzické a síťové. Zpravidla jsou OBS vysílače a přijímače instalovány na střechy budov a tím jsou veřejnosti nepřístupné. Propojovací kabely jsou chráněny trubkami a elektronika pouzdry se senzory, které detekují neautorizované narušení nebo manipulaci, a to vede k vyvolání poplachu. Protože síť OBS je soukromé médium, lze pro každou zvlášť použít soukromý šifrovací protokol s individuálními šifrovacími klíči. [11]

#### **6.2.5 Odposlech paprsku**

Přestože je paprsek úzký a neviditelný, existují způsoby, jak ho odposlechnout. Pokud prochází paprsek poblíž jiné budovy a vzdálenost je jen několik metrů, může útočník odklonit část energie paprsku průhlednou deskou a takto odkloněný paprsek prolomit, aniž by došlo k přerušení spojení. [11]

## 7 Komerční produkty OBS

### 7.1 Výrobci hlavic a dostupnost

V současné době je v celosvětovém měřítku na trhu mnoho různých výrobců optických hlavic. Předními výrobci jsou firmy z USA, Kanady a Německa. Bohužel se za poslední roky jejich řady viditelně ztenčily a dá se očekávat další úbytek. Příklad současných produktů na trhu můžeme vidět v tabulce 3. Dřívější dostupnost 98 % je dnes nedostačující. Telekomunikační operátoři požadují dostupnost spoje 99,999 %. Proto v dnešní době většina provozovatelů nemá o tuto technologii velký zájem. Důvodem je jejich obava z toho, že bezdrátový optický spoj nedokáže splňovat právě tyto požadavky na dostupnost, která vyjadřuje maximální výpadek v délce pěti minut za rok. V reálu se takto vysoká spolehlivost vyžaduje u páteřní přenosové sítě. Pro potřeby přístupu na internet se vyžaduje spolehlivost 99,9 %, což vyjadřuje výpadek v délce devíti hodin za rok. [18] Jedním z předních představitelů technologie OBS je firma SONAbeam, která se zaměřuje na optické hlavice mnoha druhů.

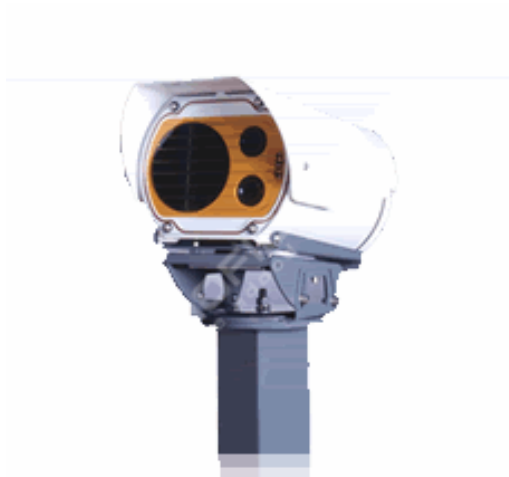
Výrobce	Označení	Typ	Max. přenosová rychlost [Mb/s]	Max. dosah [km]	Vlnová délka [nm]
CBL	AirLaser	IP1000plus	1250	0,1–0,8	850
SONAbeam	SONAbeam	1250-E+	1250	2–4,5	1550
EC SYSTEM	EL	10G	10 000	1,5	1550
MRV Comm.	TerraScope	2000/G	1250	0,95–2	830–860
JV-Labs	iRedStar	1Gbps	1000	0,7	850

Tabulka 3: Příklady optických hlavic na trhu (Zdroj: [vlastní] – podle firemních zdrojů)

Všechny hlavice uvedené v tabulce 3. pracují v provozu plně duplexním (full duplex). Existuje mnoho dalších modelů od jednotlivých výrobců s různými vnitřními funkcemi, vlastnostmi a možnostmi nastavení. Jednotlivé modely hlavic uvedené v tabulce 3. mají pro představu jednu z následujících vlastností:

- Hlavice CBL AirLaser IP1000plus nabízí přístup přes webový prohlížeč pro management obou terminálů, kde administrátor může vidět veškeré nastavení. [25]
- SONAbeam 1250-E+ je hlavice s maximální spotřebou 40 wattů. Můžeme ji vidět na obrázku 19. [26]
- EC SYSTEM EL-10G má systém Autotracking (označení a míření). [27]

- MRV Comm. TerraScope 2000/G má interní vytápění a odolnost proti vlivu počasí IP66. [28]
- Hlavice JV-Labs iRedStar 1Gbps má stojí 100 000 Kč. [29]



Obrázek 19: Hlavice SONAbeam 150-E+ (Zdroje: [26])

## 7.2 Funkce optických pojítek

Jak již bylo řečeno, jednotlivé optické hlavice mají podle druhu modelu a způsobu využití různé vnitřní funkce a vlastnosti. V následující části budou probrány vlastnosti jako je například autotracking, dvoukanálová technologie a aerodynamické stínění.

### 7.2.1 Autotracking

Autotracking neboli automatické sledování je funkce, ve které je vysílaný paprsek automaticky zarovnán k protilehlému přijímači v případě výkyvu budov či věží. Automatické sledovače obsahují mechanismus, který detekuje polohu paprsku na přijímací straně a počítačem řídí a udržuje paprsek na přijímacím detektoru. Mnoho sledovacích systémů používá k dosažení tohoto úkolu paprsek, který je oddělený od paprsku nesoucího data. K rozlišení paprsku dat a paprsku sledování lze použít dvě různé vlnové délky. Stabilizace sledování dosahuje přesnosti až 0,005 mrad.[30]

### 7.2.2 Dvoukanálová technologie

Dvoukanálová technologie (Double channel technology) je funkce, která zajišťuje automatické přepnutí na rezervní kanál a zase zpět. Princip spočívá ve využití kombinace dvou nezávislých přenosových technologií jako je například optický laserový paprsek a vysokofrekvenční (RF) spojení pracující na 2,4 GHz. Jako primární zdroj spojení je využita technologie OBS a

sekundární bezdrátové spojení RF. OBS trpí atmosférickými ztrátami zejména během extrémních vlivech počasí jako je mlha, scintilace a srážky. Při těchto událostech může udržovat kritickou síťovou konektivitu právě sekundární zdroj a tím udržuje dostupnost až 99,999 %. Čas přepnutí mezi zdroji je 0,5 s. [31]

### **7.2.3 Aerodynamické stínění**

Tato funkce slouží ke chránění optické hlavy před přehřátím, zabraňuje ucpávání přijímací a vysílací hlavy sněhem. Slouží jako účinná bariéra před znečištěním smogem nebo prachem. [32]

## **7.3 Cena a Instalace**

Cena i rychlost instalace optických bezdrátových spojů je ve srovnání s vláknovou optikou velice výhodná. Doba instalace OBS je v řádu maximálně dní, protože nevyžaduje pokládku optických kabelů a s tím potřebná povolení. Dále nevyžaduje počáteční instalaci infrastruktury. Z pohledu provozovatele sítě, zakázka s instalací FSO neznamena nebezpečí zmrazení pořizovacích nákladů. Optické bezdrátové připojení lze poskytovat prakticky na požádání. Cena jednotlivých optických pojítek se pohybuje v rozmezí od stovek tisíc až po miliony korun v závislosti na využití. [18]

## 8 Moderní technologie

### 8.1 VLC

Systemy OWC pracující ve viditelném pásmu 390–750 nm se běžně označují jako komunikace ve viditelném světle, v angličtině VLC (visible light communications). Široká možnost použití viditelných LED diod pro účely osvětlení, vnitřní lokalizace a datové komunikace s energeticky efektivním přístupem je možnou potencionální revolucí světla v budoucnu. Technologie VLC pro datovou komunikaci lze použít v celé řadě aplikací jako je bezdrátový přístupový bod, bezdrátová lokální síť (WLAN) a bezdrátová osobní síť (WPAN). [16] VLC systémy většinou pracují v simplexním provozu. V tomto provozu pracují z toho důvodu, neboť světlo funguje jako vysílač, nikoli jako přijímač. Přijímače jsou nesvitivá zařízení různého typu. Obousměrné komunikace lze dosáhnout pomocí komunikace viditelným světlem pro datové stahování (Downlink) a infračervenou komunikací pro datové nahrávání (Uplink). Tento typ systému se nazývá Li-Fi. [19]

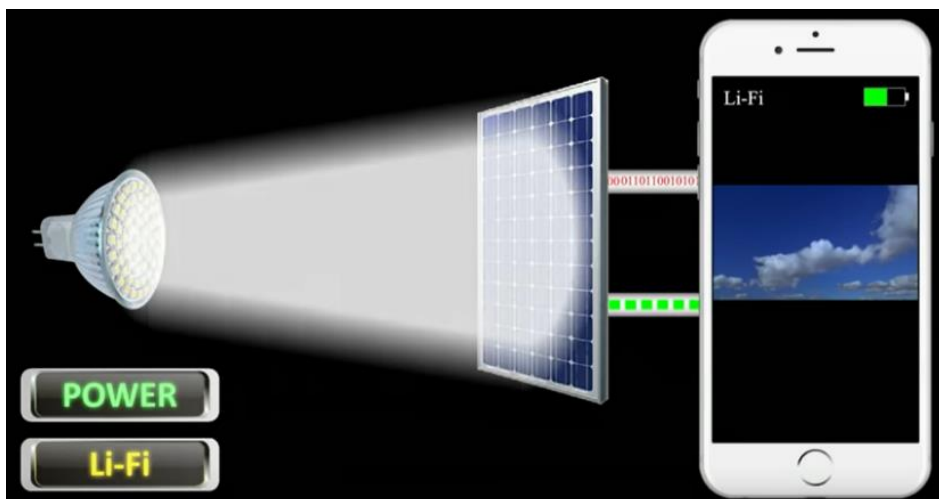
### 8.2 Li-Fi

Technologie Li-Fi, v angličtině Light Fidelity, zprostředkovává přenos dat prostřednictvím viditelného světelného spektra. Využívá viditelnou část elektromagnetického spektra, které bylo nevyužito. Zdrojem světla je LED žárovka, která bliká s takovou frekvencí, jejíž rychlost lidské oko nepostřehne. Tato svítivost se dá upravovat a její nízké hodnoty, které vnímáme jako tmu jsou pro nepřerušené vysílání klíčové. Systém Li-Fi dále vyřešil problémy s elektromagnetickým rušením, spotřebou energie a zabezpečením komunikace. [20]

#### 8.2.1 Vznik

Jako zakladatel Li-Fi je označován německý fyzik, profesor Harald Haas z Edinburské university. Vymyslel termín Li-Fi a je spoluzakladatelem firmy pureLiFi. V červenci 2011 na konferenci TED Global v Edinburghu předvedl první prototyp veřejnosti. Použil stolní lampu s LED žárovkou k přenosu videa kvetoucí květiny, která byla promítána na obrazovku. Při přednesu periodicky zakrýval světlo lampy rukou, aby ukázal, že lampa byla skutečně zdrojem dat přehrávaného videa. Dále poukázal na čtyři nedostačující problémy rádiových vln, kterými jsou kapacita, účinnost, dostupnost a bezpečnost.[21] V roce 2015 na konferenci TED předvedl profesor Haas Li-Fi systém, ve kterém vysílal video přes standartně vyráběnou LED žárovku na fotovoltaický článek spojený s notebookem, který fungoval jako přijímač. Poprvé tak

demonstroval možnost nabíjet zařízení při stálém přenosu dat ve vysoké rychlosti, a to vše prostřednictvím světla. Tento proces můžeme vidět na obrázku 20. Na přednášce také předvedl chování spoje při mlze, kterou simuloval kapesníkem. Při této simulaci byl vidět pokles přijaté energie na fotovoltaickém článku, avšak video stále vysílalo. [22]

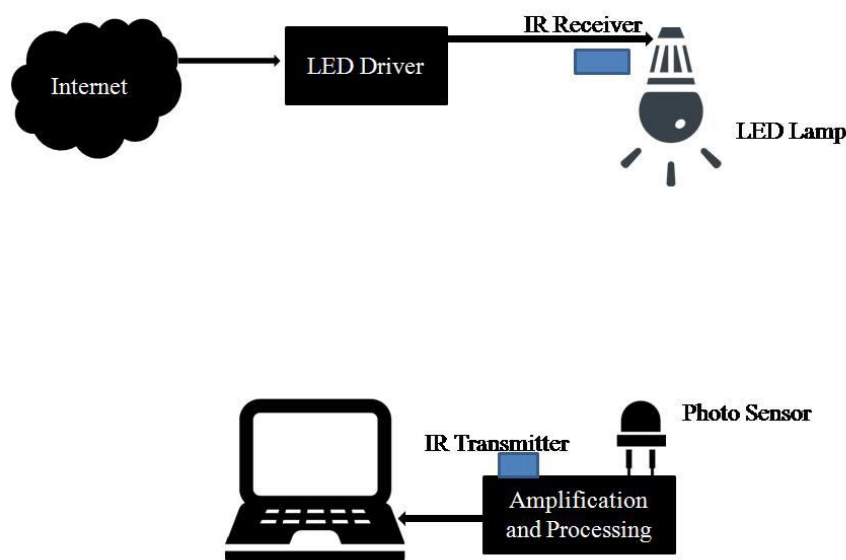


Obrázek 20: Li-Fi systém přes fotovoltaický článek (Zdroj: [22])

### 8.2.2 Princip

Základním prvkem Li-Fi systému je svítidlo, jehož součástí je připojení k internetu, LED ovladač, IR přijímač a LED žárovka. Takové svítidlo se nazývá přístupový bod Li-Fi (Li-Fi Access Point). Na druhé straně přenosu jsou prvky jako je foto senzor (foto detektor), IR vysílač, rozšiřující a procesorová jednotka a jakékoliv připojené zařízení jako je počítač, notebook nebo telefon. [19]

Fungování Li-Fi je velmi jednoduché. Z páteřního internetu se pomocí LED ovladače převádí data na fotonický signál. LED žárovku lze zapínat a vypínat velmi rychle, jelikož provozní rychlost je menší než  $1\mu\text{s}$ , což způsobuje, že světelný zdroj je nepřetržitě zapnutý. Tato neviditelná aktivita umožňuje přenos dat pomocí binárního kódu, kdy zapnutí je binární 1 a vypnutí je binární 0. LED žárovka tak vysílá světelné pulzy nul a jedniček, přičemž na druhé straně umístěný foto senzor signál přijme a následně dekóduje, čímž je převede z fotonického signálu na elektrický signál. Zpětná komunikace probíhá pomocí IR vysílače u koncového zařízení a IR přijímače na světelné sestavě. [20, 21] Princip fungování Li-Fi můžeme vidět na obrázku 21.



Obrázek 21: Princip fungování Li-Fi (Zdroj: [19])

### 8.2.3 Architektura Li-Fi

Jelikož Li-Fi používá šíření „přímé viditelnosti“, v angličtině Line of Sight (LoS), není možné s touto technologií nahradit stávající síťovou infrastrukturu. Proto je zapotřebí inteligentní návrh komunikační infrastruktury pro tuto technologii. Existují dvě úrovně komunikace. V první úrovni se ke komunikaci používá Li-Fi a ve druhé se používá stávající veřejná infrastruktura. Komunikace v rámci domů či budov se provádí prostřednictvím Li-Fi a externí komunikace je udržována prostřednictvím stávající infrastruktury jako je kabelová síť. Připojení jednotlivých zařízení jako jsou telefony, počítače a další k přístupovému bodu Li-Fi je realizováno topologií bod-bod. [23]

### 8.2.4 Možnosti využití

Tento systém je stále ještě na svém začátku. Nicméně existují oblasti, kde se zdá být tato technologie dokonale použitelná. Těmito oblastmi jsou:

**Lékařská a zdravotní péče** – Z důvodu obav z radiace, operační místnosti neumožňují Wi-Fi připojení, a i když v některých nemocnicích připojení je, rušení z počítačů a mobilních telefonů může blokovat signály z lékařských přístrojů. Li-Fi tyto problémy řeší. Světla jsou nedílnou součástí operačních sálů, a proto lze Li-Fi, která nevyzařuje elektromagnetické rušení dokonale použít. [21]



**Letecké společnosti** – V letadlech je často zakázáno používání mobilních telefonů a Wi-Fi připojení, protože tato komunikace je prováděna na základě rádiových vln, a to může mít negativní vliv na přístroje letadla. Jelikož jsou letadla vybavena mnoha světly, lze využít Li-Fi systém. [20]

**Elektrárny a nebezpečná prostředí** – Elektrárny vyžadují rychlé a vzájemné propojení pro monitorování intenzity sítě a poptávky. Wi-Fi není vhodná pro citlivé oblasti jako jsou petrochemické závody a elektrárny. Proto lze místo Wi-Fi použít Li-Fi a tím dosáhnou bezpečného připojení. [21]

**Provoz** – Li-Fi lze použít pro komunikaci mezi LED světly automobilů, čímž by se mohlo zabránit dopravním nehodám. Dopravní signály a značky také přecházejí na LED. Díky tomu by bylo možné tento systém použít pro efektivní komunikaci mezi auty a dopravními signály. To by vedlo ke zvýšení řízení provozu a větší bezpečnosti. [21]

**Pouliční lampy** – po celém světě jsou rozmístěny miliony pouličních lamp. Každá z těchto lamp by mohla být přístupovým bodem do internetu. [20]

**Podvodní průzkum** – Dálkově ovládaná podvodní vozítka fungují dobře, s výjimkou, kdy dráty nejsou dostatečně dlouhé nebo když se zaseknou. Pokud by místo drátů bylo použito světlo, měli by vozítka volnější pohyb a mohly by spolu komunikovat, zpracovávat data a hlásit nálezy zpět na povrch. [21]

## 8.2.5 Výhody a nevýhody

### Výhody Li-Fi:

- Kapacita (obrovské světelné spektrum)
- Účinnost (nízké náklady)
- Dostupnost (neškodnost)
- Velká rychlost přenosu
- LED jsou energeticky úsporné
- Bezpečnost komunikace (neprochází stěnami)
- Minimální rušení okolním světlem

### Nevýhody Li-Fi:

- Potřeba přímé viditelnosti
- S rostoucí vzdáleností intenzita světla klesá

- Světla musí být stále zaplá
- Při slabém osvětlení bude rychlost pomalejší [25]

### 8.2.6 Li-Fi vs. Wi-Fi

Li-Fi lze považovat za Wi-Fi na bázi světla. To znamená, že používá světlo místo rádiových vln k přenosu informace. Bezdrátová komunikace Wi-Fi používá své přístupové body a další zařízení pro vysílání signálu, avšak technologie Li-Fi využívá jako vysílače LED žárovky, které mohou osvětlit místnost a zároveň přenášet a přijímat data. Wi-Fi je skvělé řešení pro všeobecné bezdrátové pokrytí budov. Li-Fi je zase ideální pro bezdrátové pokrytí s vysokou hustotou v omezeném prostoru a odstranění problému s rádiovým rušením. V následující tabulce 4 můžeme vidět porovnání důležitých vlastností těchto dvou technologií. [20]

Číslo	Parametr	Bezdrátová technologie	
		Li-Fi (Light Fidelity)	Wi-Fi (Wireless Fidelity)
1	Typ spojení	Světlo	Elektromagnetické pole
2	Rozsah spektra	$4 \times 10^{14} \sim 8 \times 10^{14}$ (10 000x větší)	$4 \times 10^{10}$
3	Rychlost přenosu	>1 Gb/s	150 Mb/s
4	Bezpečnost	Velmi dobrá	Dobrá
5	Cena	Levnější	Dražší
6	Topologie	Bod-bod	Bod-bod
7	Operační frekvence	Stovky THz	2.4 GHz, 5 GHz
8	Latence	V řádu mikrosekund	V řádu milisekund
9	Spolehlivost	Střední	Střední

Tabulka 4: Rozdíl mezi Wi-Fi a Li-Fi (Zdroj: [20, 21] – upraveno dle autora)

## 9 Závěr

Uvedená bakalářská práce se zaměřuje na problematiku přenosu datové komunikace pomocí optického paprsku bez použití optického vlákna. Jelikož optický paprsek má jako své přenosové médium volný prostor, v práci byla analyzována problematika negativních atmosférických účinku ve volném prostoru a fyzikální principy fungování této bezdrátové technologie. Jedním z největších předností OBS jsou přenosové rychlosti. Vysoké přenosové rychlosti poukazují na fakt, že těmito bezdrátovými spoji prochází obrovské množství dat. Z toho důvodu byla tato vlastnost v kapitole „Parametry a limity“ zpracována, a v rámci toho bylo poukázáno na bezpečnost této komunikace. K možnému rozšíření této technologie je potřeba pevný trh a větší využití poskytovateli internetu. Proto se práce zaměřuje na aktuální optická pojitka uvedená na trhu a vyzdvižení zajímavých vlastností, kterými tyto pojitka disponují. Všechny technologie se vyvíjejí neuvěřitelnou rychlostí a bezdrátová optická komunikace není výjimkou. Moderní technologie v této oblasti mají obrovský potenciál, a proto se poslední část práce zaměřuje na jednu z nich. Je jím technologie Li-Fi, která by v budoucnu mohla nahradit již ne zcela ideální rádiovou komunikaci zvanou Wi-Fi. Uvedený systém Li-Fi má, dle mého názoru, veliký potenciál v budoucím rozvoji a využití.

Hlavním cílem práce bylo analyzovat, posoudit a definovat přenos informace pomocí optického paprsku bez použití optického kabelu. Výstup informací obsažených v této bakalářské práci je v souladu s požadavky hlavního cíle. Druhá část práce odpovídá sekundárnímu cíli v rámci zadání, kterým je zaměření na moderní trendy v této oblasti a možnost budoucího nasazení.

Dnešní doba je neuvěřitelně uspěchaná. Celý svět je na internetu a sociálních sítích a je jen otázkou času, kdy vysokorychlostní komunikace a jejich nejmodernější technologie bude třeba realizovat. Tím by se mohla změnit celá stávající struktura komunikačních sítí.

## 10 Seznam použitých zdrojů

1. HRANILOVIC, Steve. *Wireless optical communication system* [online]. Boston: Springer Science + Business Media, 2005 [cit. 2019-11-23]. ISBN 0-387-22785-7.
2. WILFERT, Otakar a Zdeněk KOLKA. *Optické (laserové) bezdrátové spoje* [online]. Ústav radioelektroniky, VUT v Brně [cit. 2019-12-1]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/web\\_pages/projekty/clanky/Wilfert\\_Kolka\\_opticke\\_spoje.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Wilfert_Kolka_opticke_spoje.pdf)
3. BURIAN, Jiří, Jaroslav HRB a Vladimír MYSLÍK. *Optická pojítka (Free Space Optics)* [online prezentace]. CESNET [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&src=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwi\\_jwom49bzoAhUXE8AKHXryCnwQFjABegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fphotonics.cesnet.cz%2F\\_media%2Fpublications%2Ffree-space-optic%2F2004%2Fczf-opticke\\_komunikace.ppt&usg=AOvVaw3-eVuwaiG5zV7GxT1HAuEf](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&src=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwi_jwom49bzoAhUXE8AKHXryCnwQFjABegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fphotonics.cesnet.cz%2F_media%2Fpublications%2Ffree-space-optic%2F2004%2Fczf-opticke_komunikace.ppt&usg=AOvVaw3-eVuwaiG5zV7GxT1HAuEf)
4. BRÁZDA, Vladimír. *Šíření optického signálu v atmosféře*. Pardubice, 2011. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky. Vedoucí práce Ondřej Fišer.
5. HRNÍČKOVÁ, Pavla. *Vliv deště na útlum signálu bezkabelového optického spoje*. Pardubice, 2011. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky. Vedoucí práce Ondřej Fišer.
6. HRBÁČKOVÁ, Petra. *Optický spoj pro vnitřní bezkabelovou síť*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Otakar Wilfert.
7. WILFERT, Otakar., et al., *Optický bezkabelový spoj pro speciální aplikaci* [online prezentace]. Ústav Radioelektroniky, Brno, 2017 [cit. 2019-12-10].
8. FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: Miloslav Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
9. STROMSKÝ, Lukáš. *Návrh a simulace bezvláknového optického spoje s použitím vlnového multiplexu*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky. Vedoucí práce Aleš Vanderka.
10. SADIKU, M., S. MUSA a Sudarshan R. NELATURY. *Free Space Optical Communications: An Overview* [online]. European Scientific Journal, 2016 [cit. 2020-01-11]. Dostupné z: <http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/7182/6915>

11. KARTALOPOULOS, Stamatios, et. al., ed. *Free space optical networks for ultra-broad band services*. 2. New Jersey: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-64775-2.
12. CHADHA, Devi. *Terrestrial Wireless Optical Communication*. USA: McGraw-Hill, 2013. ISBN 978-0-07-181875-9.
13. ARNON, Shlomi a et. al., ed. *Advanced Optical Wireless Communication Systems*. Edinburgh, UK: Cambridge university press, 2012. ISBN 978-0-521-19787-8.
14. BOUCHET, Olivier a et. al., FAVENNEC, Pierre-Noel, ed. *Free-Space Optics Propagation and Communication* [online]. Wiley, 2004 [cit. 2020-01-28]. ISBN 978-1-905209-02-6.
15. KAUSHAL, Hemani, V. Jain a Subrat KAR. *Free Space Optical Communication* [online]. New Delhi: Springer, 2017 [cit. 2020-02-13]. ISBN 978-81-322-3689-4.
16. UYSAL, Murat, Carlo CAPSONI a et. al., ed. *Optical Wireless Communications An Emerging Technology*. Svýcarsko: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-30200-3.
17. WILFERT, Otakar. *Nové metody optických komunikací ve volném prostoru* [online]. VUT v Brně, 2006 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/web\\_pages/projekty/clanky/optic\\_kom.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf)
18. Nasazení optických bezdrátových sítí: FSO a poskytovatelé služby. *Server o českém internetu* [online]. [cit. 2020-02-16]. ISSN 1213-0702. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/nasazeni-optickyh-bezdratovych-siti/>
19. SALVI, Sanket a Vasantha GEETHA. *From Light to Li-Fi: Research Challenges in Modulation, MIMO, Deployment Strategies and Handover* [online]. 2020 [cit. 2020-03-05]. ISBN 978-1-7281-2087. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/339472291\\_Light\\_to\\_LiFi](https://www.researchgate.net/publication/339472291_Light_to_LiFi)
20. DHEYAA, Sadeer. *LIFI technology* [online prezentace]. Sulaimani, 2018 [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/328107043\\_introduction\\_to\\_Lifi\\_or\\_light\\_fidelity](https://www.researchgate.net/publication/328107043_introduction_to_Lifi_or_light_fidelity)
21. SARKAR, Anurag, Shalabh AGAWAL a Asoke NATH. *Li-Fi Technology: Data Transmission through Visible Light* [online]. 2015 [cit. 2020-03-11]. ISSN 2321-7782. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/279530585\\_Li-Fi\\_Technology\\_Data\\_Transmission\\_through\\_Visible\\_Light](https://www.researchgate.net/publication/279530585_Li-Fi_Technology_Data_Transmission_through_Visible_Light)
22. HAAS, Harald. Forget Wi-Fi. Meet the new Li-Fi Internet | Harald Haas. In: *Youtube.com* [online]. 2015 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=iHWIZsIBj3Q>

23. GUPTA, Abhishek a Swayanshu PRAGNYA. *The Future Technology LiFi* [online]. Bhubaneswar, Odisha, India, 2016 [cit. 2020-02-28]. ISSN 2321-0613. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/323552097\\_The\\_Future\\_Technology\\_LiFi](https://www.researchgate.net/publication/323552097_The_Future_Technology_LiFi)
24. SHAHZAD, Hassan a Saeed KAMRAN. *Li-Fi Technology: Data Transmission through Visible Light* [online]. World Academy of Science, Engineering and Technology., 2017 [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <https://publications.waset.org/10007943/pdf>
25. COMMUNICATION BY LIGHT. *AirLaser IP1000plus* [online]. Münster [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.cbl.de/en/products/airlaser-ip1000-plus-en/>
26. SONA OPTICAL WIRELESS. *SONAbeam® 1250-E+* [online]. Canada [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <http://www.fsona.com/product.php?sec=1250ep>
27. EC SYSTEM INTERNATIONAL. *EL-10G* [online]. Praha [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: [http://www.ecsystem.cz/ec\\_system/download/ec-system-opticke-pojitko-10-gigabit-el-10g.pdf](http://www.ecsystem.cz/ec_system/download/ec-system-opticke-pojitko-10-gigabit-el-10g.pdf)
28. MRV COMMUNICATIONS. *Laserová pojítka* [online]. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://www.diestra.cz/index.php/laserova-pojitka.html>
29. JV-LABS EU. *IRedStar 1Gbps autotracking* [online]. Praha [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: [http://jv-shop.eu/index.php?route=product/product&path=20&product\\_id=107](http://jv-shop.eu/index.php?route=product/product&path=20&product_id=107)
30. WILLEBRAND, Heinz a Baksheesh GHUMAN. *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks* [online]. Indiana, USA: Sams, 2002 [cit. 2020-03-12]. ISBN 0-672-33248-x. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=iSk7r67xyboC&pg=PA36&lpg=PA36&dq=FSO+auto+tracking&source=bl&ots=oxhz63J72o&sig=ACfU3U04NnMJvLOlBE4D0wxxcwFo9v\\_fww&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwis1\\_yhiLvoAhWWSBUIHbxpAb4Q6AEwAXoECAoQAQ#v=snippet&q=FSO%20auto%20tracking&f=false](https://books.google.cz/books?id=iSk7r67xyboC&pg=PA36&lpg=PA36&dq=FSO+auto+tracking&source=bl&ots=oxhz63J72o&sig=ACfU3U04NnMJvLOlBE4D0wxxcwFo9v_fww&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwis1_yhiLvoAhWWSBUIHbxpAb4Q6AEwAXoECAoQAQ#v=snippet&q=FSO%20auto%20tracking&f=false)
31. SHARMA a KALER. *Designing of high-speed inter-building connectivity by free space optical link with radio frequency backup* [online]. 2012 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/260673815\\_Designing\\_of\\_high-speed\\_inter-building\\_connectivity\\_by\\_free\\_space\\_optical\\_link\\_with\\_radio\\_frequency\\_backup](https://www.researchgate.net/publication/260673815_Designing_of_high-speed_inter-building_connectivity_by_free_space_optical_link_with_radio_frequency_backup)
32. EUROCONTRACTS. *Free space optics FSO 10 Gbps full duplex* [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <http://www.eurosro.cz/en/products/free-space-optics/fso-10-gbps-full-duplex>