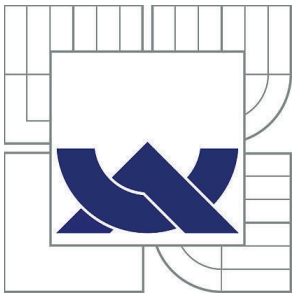
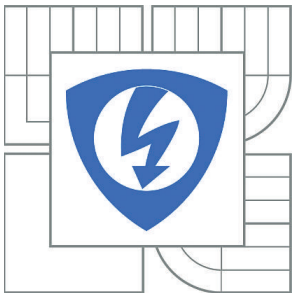


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH VNITŘNÍHO OPTICKÉHO SPOJE

INDOOR OPTICAL WIRELESS LINK DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

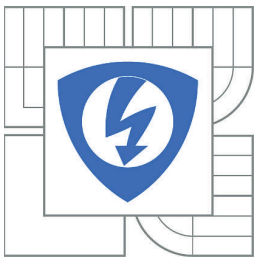
AUTOR PRÁCE — Bc. LEOŠ KAŇA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. LUCIE DORDOVÁ, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student:	Bc. Leoš Kaňa	***ID:***	78068
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Návrh vnitřního optického spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se obecně s optickými bezkabelovými spoji, jejich komponenty a jevy, které budou ovlivňovat jejich funkčnost. Zaměřte se na vnitřní (indoor) optické spoje. Navrhněte jednoduchý vnitřní optický spoj s intenzitní modulací ON/OFF. Zvolte vhodné optické komponenty. Realizujte jednoduchý vnitřní optický spoj a ověřte jeho funkčnost. Zpracujte technickou dokumentaci k danému vnitřnímu spoji.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE, 1998.

[2] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley, 1991.

[3] SMITH, F. G., KING, T. A., WILKINS, D. Optics and Photonics. New York: John Wiley, 2007.

Termín zadání:	7.2.2011	***Termín odevzdání:***	20.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Lucie Dordová, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Optická bezdrátová komunikační technologie se za posledních několik let dostala do popředí zájmu předních světových výzkumných laboratoří. Doména bod-bodových spojů realizovaných prostřednictvím laserů s úzkým vyzařovacím svazkem a citlivých detektorů je dnes běžně využívanou. Je tedy přirozené, že se snaha o využití světla jako nosného média obrací poslední dobou do oblastí kde je požadováno plošné pokrytí signálem. Tedy jako alternativa všesměrových wi-fi sítí pracujících s rádiovými vlnami. Jako jeden ze směrů tohoto vývoje lze označit in-door optické bezdrátové spoje. S rostoucím využíváním LED diod v oblastech všedního života, roste i snaha jejich technologický vývoj posledních let co nejlépe zúročit. Výsledkem tohoto snažení je myšlenka in-door optického spoje plnícího zároveň funkci umělého osvětlení. Spoj by měl tedy splňovat nejen hygienické normy z hlediska osvětlovací techniky, ale zároveň by parametry použitých součástek měly být takové, aby spoj mohl pracovat na dostatečně vysokých frekvencích, používaných pro modulaci nosného signálu signálem datovým. Takovýto spoj, by pak byl schopen dosahovat přenosových rychlostí v řádech stovek megabitů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optická komunikace, rádio-reléové spoje, OBS - optické bezdrátové spoje, optický kabel, APP – atmosférické přenosové prostředí, SNR – odstup signál od šumu, BER – úroveň bitové chybovosti, LED – elektroluminiscenční dioda, infrastrukturní sítě, bezdrátová komunikace, šířka kanálu.

ABSTRACT

In last years phenomena of wireless communication technologies became a primary interest of big development laboratories whole world. Domain of point to point links which are realized by laser technology with narrow beam divergence and very sensitive photo-detectors is ordinarily used these days. This trend of using light waves as carrier medium turned interests of scientist to the sphere of wide area networks which is domain of wi-fi radio technologies. One of new trends in this sphere is also in-door free space optics. With expansion which leads to using LED's in everyday applications and with technological progress of last years, also grows tendency of most effective utilization of LED systems. The result of this effort is thought which considerate LED as source of artificial lighting and source of carrier medium for modulated signal. This kind of device must fulfill hygienic standards for illumination and also must be able to work with high frequency by which is signal modulated. These systems can provide links with sufficient capacity in order of hundred megabits.

KEYWORDS

Optical communications, radio-relay links, FSO – free space optics, optical wire, ATE – atmospheric transmission environment, SNR – signal to noise ratio, BER – bit error ratio, LED – light emitting diode, wireless communications, illumination.

KAŇA, L. *Návrh vnitřního optického spoje.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 128 s. 16 příl. Vedoucí semestrální práce Ing. Lucie Dordová, Ph.D.

Prohlášení

Jako autor diplomové práce na téma "Návrh vnitřního optického spoje" dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne 20. května 2011 .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Lucii Dordové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 20. května 2011 .....

podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků **vi**

Seznam tabulek **ix**

Úvod **1**

1 Rozdělení optických bezdrátových spojů **3**

1.1 Dělení z hlediska prostředí a vnějších vlivů ... 3

1.1.1 Satelitní optické bezdrátové spoje ... 3

1.1.2 Mobilní bezdrátové optické spoje ... 5

1.1.3 Atmosférické bezdrátové spoje ... 6

1.1.4 IN-DOOR optické bezdrátové spoje ... 9

1.2 Skladba bezdrátového optického spoje ... 9

1.2.1 Vysílací soustava ... 10

1.2.2 Přijímací soustava ... 11

1.2.3 Další součásti optického spoje ... 12

1.3 Základy teorie optických spojů ... 13

1.3.1 Vlastnosti optického záření ... 13

1.3.2 Optický svazek ... 14

1.3.3 Parametry optického záření ... 15

2 Přenosové prostředí **19**

2.1 Atmosférické přenosové prostředí pro OUT-DOOR spoj ... 19

2.1.1 Modelování vlivu atmosférického přenosového prostředí na kvalitu přenosu ... 19

2.1.2 Atmosférické vlivy působící na optický bezdrátový spoj ... 23

2.1.3 Mechanické vlivy ... 25

2.1.4 Pevné překážky ... 27

2.1.5 Útlum a absorpce na hydrometeorech a aerosolech ... 28

2.1.6 Útlum a absorpce na molekulách a rozptyl na molekulách ... 36

2.1.7 Rozptyl na hydrometeorech, aerosolech a molekulách ... 37

2.1.8 Turbulentní vlivy a vlivy změn teplot ... 41

2.1.9 Vliv slunečního svitu ... 45

2.1.10 Vliv prachových částic ... 46
2.1.11 Vliv odrazivosti prostředí ... 46

3 In-Door optické spoje 56

3.1 Koncepce spoje ... 56
3.1.1 Základní požadavky z hlediska osvětlení ... 57
3.1.2 Vysílač down-link (LED) ... 61
3.1.3 Přijímač Down-link (LED) ... 63
3.1.4 Shrnutí důležitých parametrů spoje a prostředků pro jeho ohodnocení.. ... 65
3.1.5 Vysílač Up-link (IR) ... 68
3.1.6 Přijímač Up-link (IR) ... 69
3.1.7 Modulace ... 70
3.1.8 Synchronizace ... 71
3.1.9 Přenos informace ... 71
3.2 Testovací spoj ... 72
3.2.1 Down-link vysílač (VIS) stanovení parametrů a výběr součástek ... 73
3.2.2 Down-link přijímač (VIS) ... 77
3.2.3 Vysílač a přijímač v IR oblasti ... 81

4 Praktická měření 83

4.1 Měření ... 83
4.1.1 Maximální dosažitelná frekvence ... 83
4.1.2 Přijímaný vs. vysílaný signál ... 87
4.1.3 Fázový posuv detekovaného signálu a vliv nepřímého šíření ... 89
4.1.4 Výkonová úroveň zpracovaného signálu ... 93
4.1.5 Sériový přenos ... 95
4.2 Shrnutí ... 96

5 Závěr 98

Literatura 100

Seznam příloh 103

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Grafické vyobrazení oběžných drah Země spolu s družicemi a optickými spoji [1]. 4

Obr. 1.2: Schématická ukázka inter-satelitního optického spoje projektu SILEX. [9] 5

Obr. 1.3: Vrstvy atmosféry a znázornění OBS umístěného na zemském povrchu [7]. 6

Obr. 1.5: Hlavice firmy RONJA využívající jako zdroj signálu LED diodu. Pracuje v plně duplexním režimu. [2] 9

Obr. 1.6: Detailní nákres hlavice pro optické bezkabelové spoje s popisem jednotlivých částí. [4] 10

Obr. 1.7: Spektrum elektromagnetického vlnění jak z hlediska vlnové délky tak z hlediska frekvence. [3] 13

Obr. 1.8: Graficky vyznačené výše diskutované parametry svazku jako úhel divergence, položířka svazku aj. [31] 18

Obr. 2.2: Graf závislosti optické intenzity *I* na průchodu prostředím o tloušťce *z* při parametrickém koeficientu extinkce. [5] 21

Obr. 2.5: Názorná ukázka montáže hlavice OBS. a) na stožárek, b) na trojnožku. [6] .. 25

Obr. 2.6: Mapa průměrných srážkových úhrnů na území České Republiky. [8] 29

Obr. 2.7: Vliv míry padajících dešťových srážek na útlum prostupujícího svazku.[19] 34

Obr. 2.8: Vliv míry padajících sněhových srážek na útlum svazku. Pro mokrý a suchý sníh. [19] 34

Obr. 2.9: Závislost ztát (v mlze) na meteorologické viditelnosti s využitím Kimova a Kurseho modelu. [20] 36

Obr. 2.10: Vliv částic určitých velikostí na záření o vlnové délce *λ=785 a 1550 nm* a příslušný typ rozptylu, jež se na nich uplatní. [18] 38

Obr. 2.11: Propustnost atmosféry při zanedbání nepříznivých vlivů (déšť atp.) za podmínek kdy měříme na úrovni mořské hladiny při trase dlouhé 1km a šíři spektrální čáry 1,5nm. [5] 39

Obr. 2.12: Extinkční účinnost spočtená pro index refrakce n = 1,29 + i0,05 pomocí programu MiePlot při λ=850nm, prostředí šíření byl zvolen vzduch o teplotě 23°C s n = 1,0002669 a rušivým elementem byly částečky vody s rostoucím parametrem velikosti x. 40

Obr. 2.13: Kaskádní teorie turbulencí a přenos energie mezi nimi podle Kolmogorova a jevy na svazek působící. [27] 41

Obr. 2.14: Naznačení vlivu refrakce na buňkách (L_0) na svazek optického signálu procházejícího APP. [21] 42

Obr. 2.15: Naznačení vlivu fluktuace přijaté energie při průchodu turbulentním

prostředím s lokálními nehomogenitami o l_0. [21] 43

Obr. 2.16: Účinky scintilací a refrakce na výkon přijímaného svazku. [21] 43

Obr. 2.17: Vliv intenzity turbulencí Cn^2 na scintilační útlum svazku na vzdálenost 1km a při λ=850nm. [20] 44

Obr. 2.19: Ukázka formátu simulovaného prostředí, kde B_1 představuje stěny budovy a B_N představuje objekty v místnosti a). Na obr. b) je naznačena poloha vysílač/přijímač spolu se směrovými vektory. [21] 48

Obr. 2.20: Impulsní odezva pro kanál a) s přímou cestou šíření, b) bez přímé cesty šíření. Při D_{ij}=0,8 a rozměrech místnosti 4x4 m^2. [21] 49

Obr. 2.21: Histogramy zisků kanálu (dB) v závislosti na vzdálenosti vysílač-přijímač. Pro místnost 4x4 m^2 a kanál s i bez přímé cesty. [21] 50

Obr. 2.22: Závislost zisku kanálu na vzdálenosti *Dij* pro různě velké místnosti. [21] ... 51

Obr. 2.23 Histogramy střední hodnoty rozptylu zpoždění v místnosti o výměru 4x4 m^2 .....pro různé vzdáleností D_{ij}. [21] 53

Obr. 2.24: Model kanceláře o rozměrech 4x4 m^2 včetně nábytku. [21] 54

Obr. 2.25: Histogramy zisků kanálů a střední hodnoty rozptylu pro místnost 4x4 m^2, konstantní vzdálenost D_{ij}=2m a s přítomností nábytku v místnosti. [21] 55

Obr. 3.1: Graf závislosti citlivosti lidského oka na vlnové délce. [7]..... 60

Obr. 3.2: Šíření svazku přímou (LOS) D_{LOS} a odraženou D_1, D_2 (Diffuse) cestou. 61

Obr. 3.3: Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování a) žárovky b) Slunce. Šedě je vyznačena VIS část spektra. [39]..... 69

Obr. 3.4: a) Princip ON-OFF modulátoru. b) Princip ON-OFF modulace..... 70

Obr. 3.5: Ukázka nosného signálu modulovaného ON-OFF modulací. 71

Obr. 3.6: a) Spektrální sensitivita BPW21 [40]. Spektrální resp. C30822 [48]..... 78

Obr. 3.7: Ukázka linkového kódu Manchaster. [7]..... 80

Obr. 3.8: a) graf závislosti intenzity záření na vlnové délce [49], b) graf závislosti normalizovaného fotoproudu na vlnové délce.[44] 81

Obr. 4.1: f=10kHz, d=1m, DC=50%. 84

Obr. 4.2: f=10kHz, d=1m, DC=50%. 84

Obr. 4.3: f=10kHz, d=2m, DC=50%. 85

Obr. 4.4: f=30kHz, d=1,5m, DC=50%. 85

Obr. 4.5: f=50kHz, d=0,5m, DC=30%. 86

Obr. 4.6: f=80kHz, d=0,5m, DC=20%. 86

Obr. 4.7: Časová reprezentace signálu generovaného do systému a signálu na hradlu (gain) tranzistoru. 87

Obr. 4.8: Časová reprezentace signálu generovaného do systému a signálu přiváděného na LED. 88

Obr. 4.9: Časová reprezentace signálu generovaného do systému a na výstupu OZ na straně přijímače. 88
Obr. 4.10: Časová reprezentace signálu generovaného do systému a signálu na výstupu komparátoru v přijímacím modulu. 89
Obr. 4.11: Nepřímé šíření pro $\alpha=45^{o}$ a f=10kHz při d=1,5m. Odrazná plocha - polystyrén. 90
Obr. 4.12: Nepřímé šíření pro $\alpha=45^{o}$ a f=10kHz při d=1,5m. Odrazná plocha - bílý papír. 90
Obr. 4.13: Přímé šíření pro $\alpha=0^{o}$ a f=40kHz při d=1m. 91
Obr. 4.14: Přímé šíření pro $\alpha=0^{o}$ a f=80kHz při d=0,5m. Se střídou 35%. 91
Obr. 4.15: Výkonové spektrum signálu na výstupu přijímače pro f=10kHz. 93
Obr. 4.16: Výkonové spektrum signálu na výstupu přijímače pro f=20kHz. 94
Obr. 4.17: Výkonové spektrum signálu na výstupu přijímače pro f=50kHz. 94
Obr. 4.18: Výkonové spektrum signálu na výstupu přijímače pro f=80kHz. 95
Obr. 4.19: Popis pinů COM portu použitého pro sériovou komunikaci. 95
Obr. A.1.1: Zapojení řídící části vysílače VIS / přijímače IR. 104
Obr. A.1.2: Zapojení optické části vysílače VIS / přijímače IR. 105
Obr. A.1.3: Zapojení řízení a optické části IR vysílače / VIS přijímače. 106
Obr. A.1.4: Deska plošných spojů řídící části VIS Tx / IR Rx (Top). 107
Obr. A.1.5: Deska plošných spojů optická část VIS Tx / IR Rx (Top). 107
Obr. A.1.6: Deska plošných spojů řídící části VIS Rx / IR Tx - oboustranná (Top). 108
Obr. A.1.7: Deska plošných spojů optická část VIS Rx / IR Tx - oboustranná (Bottom). 108
Obr. A.1.8: DPS dělič kmitočtu (f, f/2, f/4) pomocí D-KO. 109
Obr. A.1.9: Schéma zapojení vysílače a přijímače v rámci modulu vysílajícího ve VIS. 110
Obr. C.1.1: Spektrum LED Luxeon Rebel s dominantí vlnovou délkou λ=450 resp. 540nm 114
Obr. D.1.1: Náčrt půdorysu místnosti č. 546. Není v měřítku. 115
Obr. E.1.1: Měření spoje pro přímou a nepřímou cestu šíření. 118
Obr. E.1.2: Moduly vysílače a přijímače. 118
Obr. E.1.3 Sériový přenos. N pozadí je na osciloskopu zastaven průběh detekovaný na výstupním BNC konektoru. 119
Obr. E.1.4: Přenos signálu na vzdálenost 1,7m. 119

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Rozdělení OBS podle vzdálenosti na jakou jsou provozovány. 7

Tab. 1.2: Rozdělení atmosférických optických spojů z hlediska kapacity. 8

Tab. 2.1 Tabelizované hodnoty V a $\gamma_{1,APP}$ pro uvedený stav atmosféry. [5] 23

Tab. 2.2 Zdroje a důsledky mechanického působení atmosférických jevů na hardware OBS. 26

Tab. 2.3 Řešení dopadů mechanických vlivů na OBS 27

Tab. 2.4: Odhad obsahu částic (aerosolů) vypuštěných nebo vznikajících v atmosféře. (Celkové množství činí ročně více než 10^6 metrických tun/rok (1971)). [15] 30

Tab. 2.5: Spádové časy částic (T_{100}) o průměru d pro dráhu 100m (k zemi). [15] 31

Tab. 2.6: a) atmosférické ztráty pro vlnové délky λ=785 a 1550nm podle vztahu 2.30 v závislosti na meteorologické viditelnosti. b) atmosférické ztráty pro vlnové délky λ=785 a 1550nm podle vztahu 2.27 v závislosti na meteorologické viditelnosti. [18] 37

Tab. 2.7: Parametr velikosti částic (parametr dimenze) ve vztahu k různým stavům atmosféry a přítomnosti jednotlivých částic. [18] 38

Tab. 2.8: Vliv strukturálního parametru indexu lomu C_n^2 na míru turbulencí v atmosféře. [15] 45

Tab.3.1: Parametry LED LXML-PWC1-0050 udávané výrobcem. Kompletní datasheet viz. [42] 75

Tab. 3.2: Vybrané parametry log. obvodu XOR pro T=25^{0}C. Kompletní parametry viz. [40]. 76

Tab. 3.3: Vybrané parametry optočlenu PC817B pro T=25^{0}C. Kompletní parametry viz. [40]. 76

Tab. 3.4: Vybrané parametry FD BPW21 výrobce Siemens, prodejce [40]. 77

Tab. 3.5: Vybrané parametry FD C30822E výrobce PerkinElmer. [48] 78

Tab. 3.6: Vybrané parametry HSDL-4220 výrobce HP. [49] 81

Tab. 3.7: Vybrané parametry HSDL-5420#011 výrobce HP. [49] 82

Tab. 4.1: Tabulka hodnot fázového posuvu přijatého vůči vysílanému signálu pro d=0,5m. 92

Tab. 4.2: Tabulka hodnot fázového posuvu přijatého vůči vysílanému signálu pro d=0,5m. 92

Tab. D.1.1: Parametry LED LW 3333 udávané výrobcem. Kompletní datasheet viz. [38] 116

Tab. D.1.2: Analýza odrazivosti ploch místnosti č. 546 adresa Purkyňova 118, Brno 612

ÚVOD

Bezdrátové optické spoje datují svůj počátek do dob dávno minulých. První úspěšný pokus o bezdrátovou komunikaci respektive o přenos informace prostřednictvím optického svazku jež svým charakterem odpovídal optickým bezdrátovým spojům, proběhl již v roce 1880 a princip byl patentován A. G. Bellem a Ch. S. Tainerem. Tehdejší princip se však dnešním technologiím blížil jen vzdáleně, nicméně základní myšlenka zůstala a tak máme v dnešní době k dispozici velice spolehlivý, poměrně levný vysokorychlostní nástroj pro přenos informací. V dnešní době však již nevyužíváme jako zdroj Slunce a jako modulátor soustavu zrcadel, ale velice sofistikované polovodičové součástky jakými jsou laserové diody, fotodiody, soustavy vysoce kvalitních přijímacích a vysílacích čoček, bloků zařizujících modulaci a demodulaci a mnoho dalšího čemuž se budu níže ve své práci dále věnovat.

Optické bezdrátové spoje (OBS) nalézají uplatnění v celé šíři spektra komunikačních metod. V dnešní době spolehlivě nahrazují ať již bezdrátové rádiové spoje tak metalické kabelové spoje a zdá se, že svými výhodami zdaleka převyšují nevýhody, s jakými se při jejich používání můžeme setkat a jak je popisuji ve své práci. Práce jako taková se opírá o technologii bezdrátového přenosu prostřednictvím světla o určité vlnové délce, využívaného jako přenosového média. Primárním cílem jsou In-Door OBS a jejich možnosti využití v oblasti infrastrukturních sítí, kde momentálně dominují technologie jako BlueTooth, Wi-Fi a podobně.

Pro správné pochopení OBS jako je závislosti šíření svazku na podmínkám panujících v přenosovém prostředí, správnou analýzu vlastních potřeb navrhovaného spoje a vlivů, jež OBS bezprostředně více či méně ovlivňují, je potřeba se blíže seznámit i s ostatními typy spojů, které je možno obecně shrnout jako Out-door. Zde pak konkrétně spoje atmosférické a satelitní a tyto dále dělené na stacionární a mobilní. Všechny tyto typy spojů a jejich základní vlastnosti, parametry a možnosti budou v této práci obecně zmíněny a diskutovány jako základ práce a výsledkem jejichž analýzy bude, navržený In-Door optický bezdrátový spoj.

Jestliže jsme spoje rozdělili do několika kategorií podle způsobu a místa užití, je potřeba si uvědomit, že v různých prostředích budou na spoj působit i různé vnější vlivy ať již z oblasti meteorologické jako jsou například turbulence (způsobující fluktuaci tedy útlum optického výkonu), deformace tvaru svazku a obecně v prostředích s nestálým indexem lomu jakým atmosféra bezesporu je a dále šumy, útlumy a rozptyly na molekulách plynů či částicích (aerosolech) a v nespolední řadě avšak ne z oblasti meteorologické je třeba zahrnout i možnost přerušení svazku pevným tělesem, které může být reprezentováno například ptákem u Outdoor spojů a u In-Door může jít o rušivý element v podobě člověka, který zastíní přijímací soustavu. Je potřeba si rovněž uvědomit, že na In-Door spoje sice zpravidla nepůsobí stejné okolní vlivy jako na spoje Out-Door (atmosférické) jako například déšť, mlhy či bouřky. Oproti tomu však i

kancelář ukrývá značný potenciál rušení, který může být reprezentován například turbulentním prouděním vzduch v oblasti oken, zahříváním určitých částí místnosti vlivem dopadajících slunečních paprsku či stoupáním par nad rychlovarnou konvicí a v neposlední řadě, jíž výše zmíněné přerušení svazku člověkem a vliv vícecestného šíření a odrazu od různě reflexivních povrchů. Je zde patrná jistá principielní podobnost vlivů na spoje působících v obou prostředích, v němž se svazek, nebo obecně světlo šíří, ale o těchto se budu blíže zmiňovat již ve své práci. Speciálním typem jsou pak Out-Door satelitní optické spoje pracující v blízkém či vzdáleném kosmu o kterých se pouze okrajově zmíním.

Již z principu šíření optických vln, je jasné, že největším problémem je náchylnost na narušení přímé viditelnosti, mezi vysílačem a přijímačem, pevným předmětem, ale zdaleka se nejedná o jediný negativní vliv na tyto typy bezdrátových spojů. Jednotlivé další vlivy jsou však do jisté míry závislé např. na vlnové délce zdroje záření a podobně. Celou problematikou šíření se práce zaobírá a v závěru budou prováděna měření pro praktické ověření jejich dopadu na spoj, jeho kvalitu a dostupnost.

Práce je tedy věnována praktickému návrhu In-Door OBS a to jak vysílače, tak přijímače podle specifických kritérií upřesňovaných v práci. Dále pak se věnuji analýze potřeb, podmínek a okolních vlivů majících větší či menší dopad na korektní funkčnost a použitelnost takto navrženého spoje a to především z hlediska šíření informace přenosovým médiem a vlivu přenosového prostředí. Výstupem práce je funkční modelový spoj na němž byla provedena testovací měření jak z hlediska přenosu obecného signálu tak přenosu reálné informace prostřednictvím sériové linky.

1 ROZDĚLENÍ OPTICKÝCH BEZDRÁTOVÝCH SPOJŮ

Jak jsem předeslal již v úvodu, bezdrátové optické spoje lze dělit do dvou základních kategorií a několika podkategorií, v oblastech kde dané spoje používáme. V této kapitole si toto dělení provedeme a zároveň si dané kategorie stručně charakterizujeme.

1.1 Dělení z hlediska prostředí a vnějších vlivů

Prvním takovým dělením je dělení z hlediska prostředí, ve kterém je OBS provozován a na to bezprostředně navazují okolní vlivy na spoj působící, kdy atmosférické a jiné vlivy a problémy, které je třeba v rámci optických spojů řešit jsou detailně rozebírány v kap. 2.

Spoje tedy dělíme:

- INDOOR - jde o spoje pracující v uzavřeném prostoru, zpravidla v rámci budov a velkých komplexů,
- OUTDOOR - tyto spoje pracují vně budov, tedy v otevřeném prostoru a tyto se dají dále dělit viz. níže.

OUTDOOR spoje můžeme z hlediska prostředí, v němž pracují, dále dělit na:

- spoje atmosférické,
- spoje satelitní (tyto se ještě dále dělí podle toho v jaké kosmické oblasti spoj funguje a to na spoje pracující v blízkém a vzdáleném kosmu).

Spoje atmosférické můžeme ještě dále dělit podle jejich flexibility na:

- spoje stacionární,
- spoje mobilní.

V práci se budu detailněji zaobírat spoji atmosférickými stacionárními a INDOOR spoji. Ostatní typy pouze nastíním, abychom získali komplexní přehled o bezdrátových optických spojích. Nejprve tedy nastíním oblast kosmických spojů a spojů atmosférických mobilních.

1.1.1 Satelitní optické bezdrátové spoje

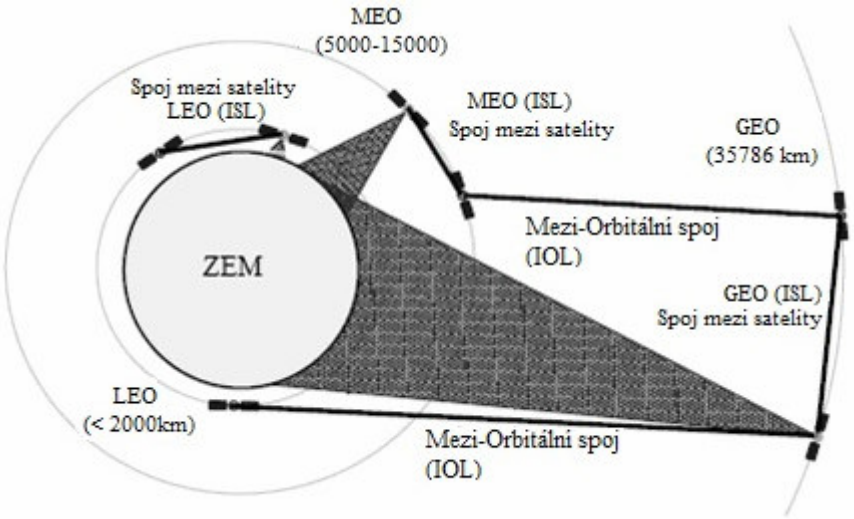
Zohledníme-li cenu, malé rozměry, minimální hmotnost a velice malou spotřebu energie terminálů respektive zařízení umístěných na palubě satelitů a podobně, vyjdou nám nutně spoje realizované pomocí světelné vlny (lightwave) jako nejlepší cesta k řešení komunikace v rámci kosmického prostoru. Navíc je zde ta výhoda, že kapacita takovéhoto spoje je schopna zabezpečit potřeby pro následující století i se současnými dostupnými technologiemi a znalostmi.

Takové zařízení (terminál) nesené satelitem je nutné rozlišit z hlediska dráhy po níž kolem země obíhají, viz. obr. 1.1, na družice:

- GEO (geostaciar earth orbit) - geostacionární, obíhající zemi ve výšce

36000km nad rovníkem s dobou oběhu 24hodin, kdy tyto se pozorovateli jeví, jak z názvu vyplývá jako stacionární (samozřejmě i u těchto dochází k mírným posuvům a změnám v poloze tyto však nejsou předmětem řešení této práce proto je zanedbejme),

- MEO (medium earth orbit) - střední oběžná dráha. Tyto družice obíhají ve výšce 1200 - 35000 km a zemi oběhnou 4-6x denně,
- LEO (low earth orbit) - nízká oběžná dráha. Družice na této dráze obíhají zemi ve výšce 200-1200km s dobou oběhu 80-130 minut.



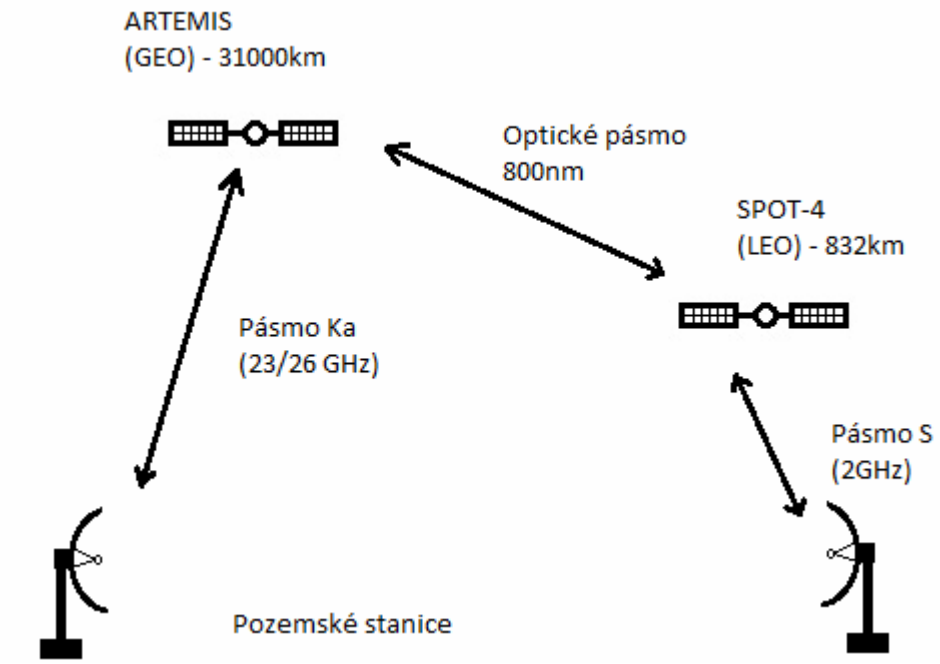
Obr. 1.1: Grafické vyobrazení oběžných drah Země spolu s družicemi a optickými spoji [1].

Při komunikaci prostřednictvím OBS v rámci kosmického prostoru, avšak nejen v něm, ale i při komunikaci družice na oběžné dráze spolu se zemí, hraje zásadní roli tzv. ATP (acquisition, tracking and pointing) systém, neboli systém zajišťující zachycení a sledování vzájemně se pohybujících stanic (např.: satelit-satelit nebo satelit-země atp.). Tento systém hraje zásadní roli v mobilních optických komunikacích, jimž je věnována kap. 1.1.2.

Dalšího pokroku bylo dosaženo spolu s nástupem technologií, jež umožnily práci optických senzorů a optických zdrojů na vlnové délce v oblasti IR (infrared) krátkovlnného záření, což vedlo jednak ke zdokonalení systému ATP, ale především ke zvýšení přenosových kapacit spojů až do oblasti gigabitových linek.

Jako příklad spoje družice - družice, bychom mohli uvést projekt instituce ESA (Europe Space Agency) nazvaný SILEX. [9] Jde o projekt, který zkoumá možnosti využití optického spoje jako alternativy ku spoji rádiovému. Názorná ukázka spoje je na obr. 1.2 kde optická komunikace mezi družicí ARTEMIS (GEO) a SPOT-4 (LEO) probíhá na vlnové délce $\lambda = 800nm$ a komunikace mezi družicí ARTEMIS a pozemní stanicí probíhá v rádiovém pásmu *Ka (23/26 GHz)* a komunikace mezi družicí SPOT-4 a pozemní stanicí probíhá v rádiovém pásmu *S (2GHz)*. Spoj byl poprvé otestován v

roce 2001, kdy po dobu 20minut probíhala komunikace s přenosovou rychlosti 20 Mbit/s s chybovostí dosahující 10^{-9} [10].



Obr. 1.2: Schématická ukázka inter-satelitního optického spoje projektu SILEX. [9]

1.1.2 Mobilní bezdrátové optické spoje

Jak již bylo okrajově zmíněno, OBS se v posledních letech začaly využívat i v oblasti mobilních spojů takzvaných M-FSOL (mobile-free space optical link). Jako hlavní myšlenka se uvažuje využití takovýchto spojů například v oblasti páteřních linek, komunikace mezi mobilními prostředky pohybujících se v terénu na vodě a podobně. Samozřejmě zde patří i komunikace mezi-satelity.

Pro mobilní OBS, představují největší problém systémy ATP popisovány výše. Z hlediska zaměření a sledování dvou vzájemně se pohybujících objektů jsou na systém ATP kladeny vysoké nároky. Jako jeden z prvních pokusů v oblasti M-FSO zaznamenal úspěch Evropský projekt CAPANIA, kde ve spolupráci s Německem byl vyvinut optický komunikační terminál využívající výškové hladiny HAP. Tento terminál (FELT - Freespace Experiment Laser Terminal) byl umístěn na dálkově ovládaný balón pohybující se ve stratosféře, konkrétně ve výšce 22km nad Švédským městem Kiruna. Po té byla navázána komunikace s přenosovou pozemskou stanicí TOGS (Transportable Optical Ground Station) kdy za použití vlnové délky $\lambda=1550nm$ a s vysílaným optickým výkonem 100mW (vysílací apertura $d=5cm$, přijímací apertura (TGOS) $d=40cm$), bylo dosaženo přenosu o rychlosti $1{,}25\ Gb/s$ a to s chybovostí menší než 10^{-9} [12].

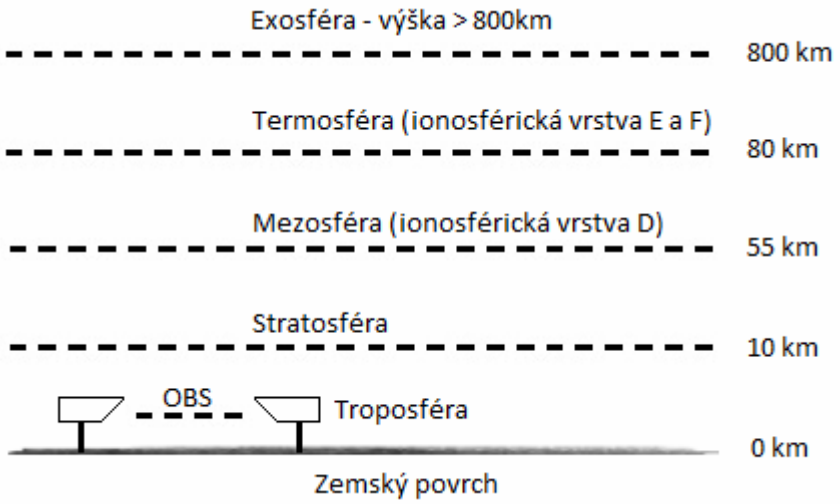
Poslední pokus z této oblasti tykající se možností komunikace mezi dynamickými a vzájemně se pohybujícími pozemními stanicemi, byl demonstrován v projektu MOND (Mobile Optical Near-Ground Demonstrator) jež měl za cíl demonstrovat možnost kompenzace velice silných vibrací a výškových změn způsobených pohybem vozidla v terénu. Optický svazek vycházel ze stacionární pozemní stanice a přijímán byl na

vozidle vybaveným systémem ATP a inerciálním navigačním senzorem řízeným systémem GPS. Pro kanál byla použita vlnová délka *λ=1550nm* a přenosová rychlost byla *1,5 Gb/s*. Mimo jiné bylo použito speciální kanálové kódování, které by mohlo být zajímavé i pro realizaci mé práce v oblasti IN-DOOR spojů, kde k přerušení může rovněž často docházet. Tento způsob opravy se nazývá ARQ (Automatic Repeat reQuest)..

1.1.3 Atmosférické bezdrátové spoje

V této kapitole budu psát o stacionárních atmosférických optických spojích. Jak vyplývá z názvu, jde o spoje imobilní tedy, jako první odpadá nutnost použití systému ATP. Spoj je při instalaci nasměrován například na základnovou stanici a dále s ním již není manipulováno. Popíši zde okrajově princip, fungování, výhody a nevýhody a pouze nastíním vnější vlivy na spoj působící. Blíže se problematikou vnějších vlivů zaobírá kap. 2.

Mluvíme tedy o OBS (optický bezdrátový spoj) označovaný často jako FSOL (free space optical link). Vzhledem k tomu, že jde o spoje atmosférické, viz obr. 1.3, na kterém je výškové rozdělení atmosférických vrstev spolu s naznačením spoje, šíří se tedy optický svazek (nosič signálu) skrze takzvané APP (atmosférické přenosové prostředí), o kterém se okrajově zmíním níže a které je detailně rozebráno v kap. 2. Toto APP je oblast kde se mimo jevů atmosférických vyskytují i překážky v podobě letadel, vysokých horských hřebenů, ptáků, oblak a mnoha jiných, které je třeba při návrhu spoje uvažovat.



Obr. 1.3: Vrstvy atmosféry a znázornění OBS umístěného na zemském povrchu [7].

Základem je tak jako v předchozích případech koncepce vysílač - přijímač. Tedy dvě hlavice, jež mezi sebou komunikují plně duplexním režimem prostřednictvím optického svazku. Kde ve vysílači bývají použity laserové diody (LD), lasery nebo infračervené elektroluminiscenční diody (IRED) a v přijímači zpravidla využíváme lavinové fotodiody (APD - awalanche photo diod) nebo fotodiody typu PIN. Dále pak pomocné obvody zabezpečující ochranu prvků a vzdálený dohled a rovněž mechanismus umožňující dosměrování a jiné upravování hlavic z hlediska směru záření.

Hlavice jsou rovněž plně duplexně (FD - Full Duplex) propojeny s počítačem, serverem, ústřednou nebo jiným zařízením určeným ke sběru a zpracování dat. Dalšími součástmi spoje jsou:

- kodér - zařízení pro kódování a dekódování signálu,
- router - neboli směrovač, který volí optimální cestu signálu,
- záložní spoj - zpravidla RR (rádio releový) spoj zajišťující náhradní provoz při poruše nebo při špatných provozních podmínkách.

Podle vzdálenosti na jakou je OSB provozován jsou spoje děleny viz. tab. 1.1. Maximální délka, na níž mohou být atmosférické OBS provozovány se pohybuje někde kolem 2-3km.

Jako zajímavost můžeme uvést, že jsou známy i pokusy kdy bylo dosaženo, s profesionálním zázemím, spoje na vzdálenost *400km* v rámci pouště a další z pokusů na vzdálenost *106km* s parametry viz. [6]

Tento údaj je nicméně značně ovlivněn mnoha faktory, které mohou mít na OBS značný vliv jako například:

- déšť,
- mlha,
- sníh,
- meteorologická viditelnost,
- znečištění a prachové částice,
- fluktuace optické intenzity
- rozptyl svazku
- sluneční svit

a mnoho dalších, o kterých pojednávám v kap. 2. Z výše popsaných negativních vlivů nám vyplývá, že pro například velice prašná prostředí nebo pro prostředí s častým výskytem mlh mohou být spoje provozovány pouze na krátké vzdálenosti. Samozřejmě i pro takovéto podmínky existují řešení. Například využití vyšších vysílacích výkonů - tzv. výkonová rezerva spoje, vysoké dynamiky přijímače, speciálním kódováním nebo využitím vícesvazkového šíření. Nezřídka se rovněž používá záloha optického spoje spojem mikrovlnným. Pakliže je potřeba vyřešit například přímou viditelnost mezi hlavicemi, využívá se takzvaného kaskádního uspořádání a pro zvýšení spolehlivosti takto realizovaných spojů se využívá tzv. mesh struktur (uspořádání komunikujících uzlů sítě, kde je každý z uzlů přímo propojen se všemi ostatními uzly v síti).

Tab. 1.1: Rozdělení OBS podle vzdálenosti na jakou jsou provozovány.

Dosah	Distance mezi vysílačem a přijímačem
Velmi krátký	0 - 10 m
Krátký	10 - 500 m
Střední	500 - 2000 m
Dlouhý	> 2000m

Kromě vzdálenosti na jakou jsou AOS provozovány, je dále dělíme podle přenosových kapacit. Dělení podle přenosové rychlosti je naznačeno v tab. 1.2. Uvedené rychlosti jsou běžně realizované pro tzv. poslední míli, ale vzhledem k tomu, že AOS se často používají, jako pojítka pro páteřní spoje jsou k dispozici i mnohem větší rychlosti. Jako příklad můžeme uvést spoje německé společnosti CBL jež běžně dosahují přenosových kapacit *1,25 Gbit/s* a to zdaleka není hraniční kapacita. Nebudu se zde však zaobírat kapacitami spojů nějak detailně ani rozebírat podmínky za jakých různí provozovatelé své vysokorychlostní spoje provozují.

Tab. 1.2: Rozdělení atmosférických optických spojů z hlediska kapacity.

Rychlost	Přenosová rychlost [Mbit/s]
Nízká	Méně než 10
Střední	10-100
Vysoká	Více než 100 (až Gbps)

V praxi se často optické spoje srovnávají s rádiovými, kterým tvoří největší konkurenci. Níže jsou pak uvedeny zásadní výhody a nevýhody OBS.

1. Svazek je vysoce směrový (miliradiány), což je velice výhodné z hlediska vysoké selektivity a tím snížení možnosti interference s jinými spoji, ale rovněž z hlediska vysoké bezpečnosti neboť vysílací charakteristika nemá postraní laloky a není tedy možné, aby signál někdo zachytával, aniž by přímo vstoupil do svazku a tento přerušil což je však snadno zjistitelné.
2. Vysoká přenosová rychlost dosahující kapacit až 10Gbit/s (dnes i více), což umožňuje využití v rámci všech přenosových sítí a navíc jsou transparentní a je proto možné je používat v rámci standardních protokolů a navazujících sítí jako jsou například Fast Ethernet, SDH/SONET a jiné.
3. Nejvýraznější výhodou je však pravděpodobně fakt, že pásmo optické vlny leží, mimo oblast spravovanou ČTU a tím odpadá nutnost zajišťování kmitočtových licencí a omezení v podobě regulovaného spektra. Rovněž instalace spoje se tak stává mnohem snažší.
4. A poslední citelnou výhodou je příznivá cena vzhledem ke kapacitám jaké spoje nabízí v porovnání s rádiovými skoky.

Nevýhody:

1. Potřeba přímé viditelnosti mezi vysílací a přijímací hlavicí.
2. Velká náchylnost hardwaru (hlavně optická soustava a lasery a laserové diody) na poškození.
3. Velká závislost spoje na atmosférických jevech. Viz. kap. 2.

První dvě nevýhody jsou poměrně snadno eliminovatelné, a sice zvýšenou opatrností při manipulaci a dobrým zajištěním při instalaci spoje a z hlediska nutnosti přímé viditelnosti, se poměrně s úspěchem využívá možnosti rozdělení trasy spoje na několik pod úseků, u nichž je přímá viditelnost zajištěná. Avšak atmosférické jevy jsou pro

optické spoje primárním problémem, se kterým se výzkumnicí potýkají již řadu let a který atmosférické spoje dělá na mnoha místech až nepoužitelné tato problematika je však natolik komplexní, že jsem se rozhodl jí věnovat celou jednu kapitolu.

1.1.4 IN-DOOR optické bezdrátové spoje

In-Door optické bezdrátové spoje (IDOBS) se v určitých formách s výhodou již řadu let využívají. Jako příklad lze uvést například IRDA komunikaci mezi PC a mobilním telefonem nebo prosté dálkové ovládání TV. Co je ovšem poměrně nová myšlenka, je využití bílého světla jako nosné pro přenášenou informaci schopného pokrýt signálem místnosti, haly apod. Myšlenka je zajímavá nejen jako alternativa pro dnes používané technologie založené na rádiovém přenosu jakými je např. Wi-Fi, ale zároveň máme k dispozici zdroj umělého osvětlení pro místnost ve které je spoj v provozu. Vzhledem k uvažované koncepci osvětlení/vysílač/přijímač dostáváme do rukou prostředek schopen bez větších obtíží zajistit plošné pokrytí dané oblasti a dosáhnout tak požadované dostupnosti spoje. Bohužel však, v souvislosti s tímto řešení narážíme na spoustu komplikací, z nichž některé snadno vyřešíme jiné, však již z principu fyzikálních zákonů řešit lze jen s velkými problémy.

Řešení těchto komplikací a jejich rozboru je věnována kap. 2 a samotnému In-Door spoji, jeho návrhu s ohledem nejen na přenosové, ale rovněž hygienické požadavky je podrobně věnována kap. 3.

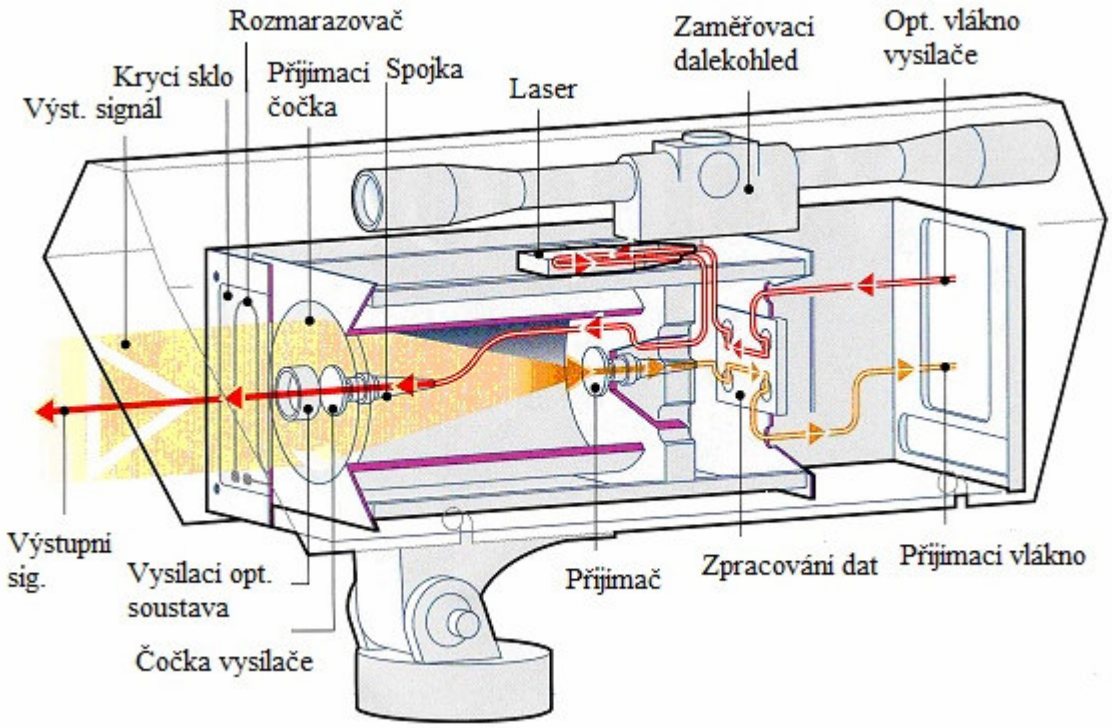
1.2 Skladba bezdrátového optického spoje

Jak jsem již několikrát zmínil, výše základem každého OBS je vysílací respektive přijímací hlavice. Na obr. 1.5 je ukázka hlavice optického spoje konkrétně spoje firmy RONJA využívající jako zdroj signálu LED diodu (viditelné červené světlo).

Obr. 1.5: Hlavice firmy RONJA využívající jako zdroj signálu LED diodu. Pracuje v plně duplexním režimu. [2]

OBS lze dělit i podle skladby a technologie jaké je využito v hlavicích. Některé hlavice se liší počtem vysílaných svazků, počtem využitých optických kanálu a samozřejmě mnoha dalšími. Především pak typem použitého zdroje záření. Na obr. 1.6

je detailní nákres optické hlavice na níž si přiblížíme technologii optického spoje. Jde o hlavici pro OUT-DOOR OBS nicméně principiálně je technologie podobná i u IN-DOOR spojů.



Obr. 1.6: Detailní nákres hlavice pro optické bezkabelové spoje s popisem jednotlivých částí. [4]

1.2.1 Vysílací soustava

Vysílací systém má za úkol pomocí vhodně uzpůsobené optické soustavy tvarovat svazek a zajistit jeho následnou modulaci. Na obr. 1.6 je cesta vysílaného paprsku vyznačena červeně a je patrné přes jaké části hlavice prochází. Mezi hlavní části, vzhledem k tomu že jde o vysílací část, patří zdroj v podobě například laserové diody, budič optického zdroje, systém pro zaměření, elektronická kontrola a ovládání mechanismu zaměřování a vysílací optická soustava. Níže jednotlivé bloky vysvětlím podrobněji teoreticky, prakticky se pak výběru jednotlivých vhodných částí a jejich rozboru budu věnovat v kapitole věnované analýze.

1. Opt. vlákno vysílače - jde o kabelové (zpravidla optovláknové) spojení zdroje dat vysílaných například ze serveru, přivedené dále například přes zesilovač nebo jiné elektronické obvody jako budící prvek dále na zdroj záření.
2. Laser - prvek, jež slouží jako zdroj záření. Mezi nejznámější používané patří laserové diody, LED diody a IRED diody. Vhodný zdroj volíme s ohledem na požadavky spoje z hlediska vlnové délky, eliminace viditelného záření, z hlediska vysílaného výkonu a mnoha dalších. Zpravidla bývá součástí pouzdra laserové diody i fotodioda využívaná k proudové

stabilizaci optického výkonu.

3. Vysílací optika - neboli vysílací optická soustava. Tato zajišťuje prostorové tvarování optického svazku, který vystupuje ze zdroje záření viz. výše. K tomuto se využívá například povrstvený plankonvexní dublet[(1)]. Vysílací optická soustava je kruhově symetrická což zároveň zajišťuje tvarování svazku.
4. Čočka vysílače - vysílací čočka. například Fresnelova čočka[(2)].
5. Coupler - jde o zařízení, odbočnici, sloužící k rozdělení nebo sloučení výkonu. V praxi to znamená možnost rozdělit vysílaný výkon do více paprsků nebo naopak sloučení záření z více zdrojů do jednoho uceleného paprsku.
6. Zaměřovací dalekohled - jde o dalekohled pevně spojený s celou vysílací soustavou a slouží zpravidla technikovi, jež instaluje spoj jako prvek k hrubému nasměrování spoje.
7. Krycí sklo - optický průzor. Slouží jako ochrana vysílací a přijímací soustavy proti nečistotám a vnějším vlivům. Musí být konstruován tak aby žádným způsobem neovlivnil svazek nadměrným útlumem nebo jeho deformací či odklonem.
8. Další elektronika jako například indikátor síly signálu, mechanismus pro elektronické směrování spoje a jiné.

(1) Provrstveným plankonvexním dubletem rozumíme spojení minimálně dvou základních čoček (např. plankonvexní, plankonkávní aj.) s většinou různým indexem refrakce, kdy jedna je vybrána aby kompenzovala vady či nedostatky druhé. Mezi vady čoček patří např. vada barevná, sférická, koma aj. ty budou detailně probírány v kapitole analýzy.

(2) Fresnelova čočka je plochá čočka, která vzniká rastrováním obvykle kulové nebo válcové čočky. Rovněž bude zmiňována v kapitole analýzy.

1.2.2 Přijímací soustava

Trasa přijímaného signálu je vyznačena žlutě na obr. 1.6. Oproti soustavě vysílací zde je signál zpracován. Po průchodu přijímací optickou soustavou signál dopadá na fotodiodu. Běžným používaným typem jsou například PIN fotodiody. Takto zachycený signál se dále převede na elektrickou energii k dalšímu zpracování. Níže jsou stručně popsány jednotlivé bloky, které budou stejně jako u VS podrobně analyzovány a diskutovány v dalších kapitolách.

1. Krycí sklo - stejný účel jako v případě VOS. Tedy ochrana proti nečistotám a vnějším vlivům.
2. Přijímací optika - přijímací optická soustava. Opět může jít o povrstvený plankonvexní dublet nebo o Fresnelovu čočku. Tento systém se stará o správné směřování optického svazku (soustředění) na fotodiodu.
3. Receiver - fotodioda. Zpravidla se používá fotodioda typu PIN popřípadě lavinová fotodioda (APD). Po vhodném nasměrování výkonu svazku na aktivní plochu fotodiody je dopadající optický výkon pomocí FD převeden na fotoproud k dalšímu zpracování.

4. Zpracování dat - blok zpracování dat. Jeho součástí může být například demodulátor respektive modulátor, předzesilovač a jiné bloky sloužící ke zpracování přicházejícího signálu.
5. Opt. vlákno přijímače - stejně jako v případě VS jde o nosič již přijaté a zpracované informace. Může jit jak o optické vlákno tak například o metalický (koaxiální) kabel.
6. Rozmrazovač - zařízení sloužící k ohřevu čelního plexiskla. Umožňuje provozovat spoj spolehlivě i v zimních obdobích nebo například v rámci velkých nadmořských výšek. Účinně brání zamrzání, orosení a podobným nepříznivým vlivům, které by za normálních okolností znamenaly omezení nebo úplné ukončení funkčnosti spoje.
7. Stejně jako u VS i zde je s PS pevně spojen dalekohled sloužící pro hrubé zaměření, a navíc v PS bývá zpravidla použit interferenční filtr bránící interferenci s dopadajícím slunečním svitem tedy musí být vhodně navržen na patřičnou vlnovou délku.

Za zmínku ještě určitě stojí využití gyroskopů a tzv. tracking systému (systém sledování). Není to podmínkou, nicméně je vhodné použít elektronický systém, který automaticky zajišťuje směrovost spoje. Princip je takový, že v případě že dochází k odsměrování spoje, tedy ke ztrátě přijímaného výkonu a nejde o ztráty způsobené APP což je přijímací hlavice schopna rozpoznat na základě znalosti rozložení výkonového spektra na dané vlnové délce, provede hlavice automatické dosměrování tím, že elektromechanickým systémem pohybu dohledá (nasměruje se) maximum výkonu přicházejícího od vysílače.

Gyroskopy pak fungují odlišně. Na základě pohybu hlavice zjištěného gyroskopem je soustava elektromechanicky neustále dosměrovávána do výchozí polohy, čímž dochází k výraznému snížení ztrát výkonu způsobených právě například silným větrem nebo jinými jevy, jež mohou hlavicí pohybovat byť z našeho pohledu pouze nepatrně.

1.2.3 Další součásti optického spoje

Další částí optického spoje kromě vysílacího respektive přijímacího zařízení je samotné prostředí, jímž se optický svazek šíří. Jak bylo předesláno v úvodním dělení spoje rozlišujeme podle prostředí v němž se šiří informace. Vzhledem k tomu že práce je primárně věnována IN-DOOR optickým bezdrátovým spojům je rozboru atmosférického přenosového prostředí (APP) věnována kap. 2.

Kromě samotné vysílací respektive přijímací hlavice a přenosového prostředí, jsou na OBS připojeny další části, které už samotný přenos neovlivňují, ale je vhodné je zmínit. Další částí spoje může být tzv. kodek což je zařízení pro kódování a dekódování přijatého respektive vysílaného signálu, jehož zdrojem je například server, PC nebo jiné zařízení uzpůsobené k odesílání a přijímání dat. Toto zařízení bývá s vysílací soustavou resp. s přijímací soustavou spojeno zpravidla metalickým (koaxiálním) nebo optickým kabelem. Hardwarový prvek, který může být vložen mezi vysílací stanici v síti a VS optického spoje je router. Router je zařízení sloužící pro směřování datových toků na patřičná místa zde může jít například o router vyhodnocující stav OBS s možností volby

cesty signálu mezi právě OBS nebo mikrovlnným spojem, který zde slouží jako záloha primárního spoje pro případ, že parametry primárního spoje nesplňují stanovené provozní podmínky.

Tolik tedy ve stručnosti ke skladbě OBS a jeho jednotlivých částí. Jak jsem předeslal již výše, jednotlivé části budou dále diskutovány a detailně analyzovány v dalších kapitolách v rámci později realizovaného IN-DOOR spoje.

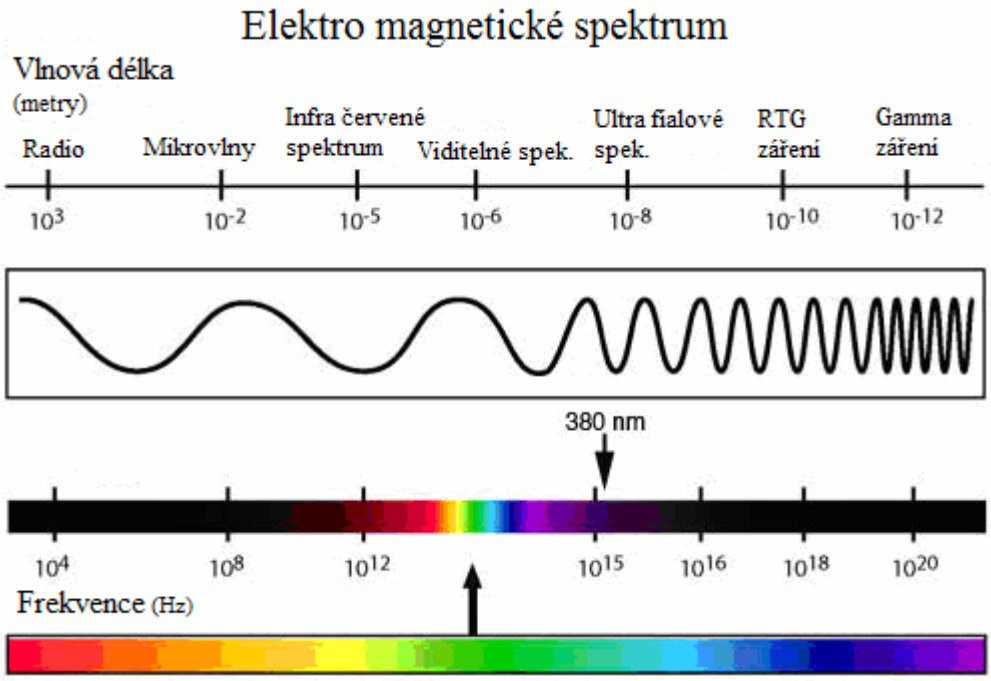
1.3 Základy teorie optických spojů

Chceme-li mluvit o optických bezkabelových spojích detailněji, je třeba si ujasnit základní terminologii v této oblasti a uvědomit si jakými fyzikálními zákony jsme omezováni. Definovat si pojmy jako *optický svazek, zdroje opt. záření, Gaussův svazek* a v neposlední řadě uvést základní matematické vztahy v oblasti optických komunikací.

Tuto kapitolu bych rád pojal jako rize seznamovací, a vztahy nastudované z literatury budu brát jako obecně platné a nebudu provádět jejich odvození ani jejich platnost později ověřovat experimentálně.

1.3.1 Vlastnosti optického záření

V úvodu je potřeba si objasnit skladbu spektra elektromagnetického vlnění, kterým světlo je. Na obr. 1.7 je znázorněno celé známe spektrum jak z hlediska vlnové délky tak z hlediska frekvence a jednotlivé oblasti popsány z hlediska využívání.



Obr. 1.7: Spektrum elektromagnetického vlnění jak z hlediska vlnové délky tak z hlediska frekvence. [3]

V optických komunikacích se pracuje se zářením v oblastech:

- infračerveného (IČ) záření s vlnovou délkou λ*=0,7-300*μ*m*,
- viditelného záření (VIS) o vlnové délce λ *=380-760nm*,
- ultrafialového záření (UV) o vlnové délce λ*=400 a více nm.*

Z hlediska optického záření, které nás zajímá, můžeme spektrum rozdělit na viditelné záření (visible), infračervené záření (infrared) a ultrafialové záření (ultraviolent). [28] Už ze samotných názvů částí spekter je jasné, že z hlediska vnímání člověkem, jako viditelné záření bude relevantní viditelná část spektra, kde vlnová délka elektromagnetického leží v intervalu 380-760nm [3]. IČ a UV záření se ještě dále dělí do několika podoblastí s různými intervaly vlnových délek.

Zaměříme-li se na výše zmíněné oblasti spektra, pak dojdeme závěru, že z hlediska bezpečnosti v rámci IN-DOOR spojů je využití UV záření nepřijatelné neboť toto má značný vliv na lidskou pokožku a jiné a mohlo by tedy dojít k ohrožení zdraví zvláště uvážíme-li, že spoj bude využíván například v rámci kanceláří. Viditelné a infračervené spektrum již nemá na člověka tak negativní vliv proto lze tyto později uvažovat jako možné oblasti záření v rámci IN-DOOR OBS. Je však nutno vzít do úvahy rušivý element viditelné oblasti spektra, jejímž zdrojem je například LED dioda a proto jako nejvhodnější zdroj se nám jeví záření v IČ oblasti spektra a klasické využívané vlnové délky 850 a 1550nm. proč právě tyto je diskutováno níže v kap. 2.

1.3.2 Optický svazek

Jak jsem naznačil již výše, světlo je zářením elektromagnetickým u kterého se spolu s vlnovou délkou mění i oblast záření a spolu s ní citlivost lidského organizmu na jednotlivé oblasti. Parametry světelného záření jsou:

1. amplituda,
2. polarizace,
3. vlnová délka.

Obecně se na světlo nahlíží, jako na tok částic tzv. fotonů, ale společně s tímto pohledem se aplikuje i pohled na světlo jako na vlnění. Je důležité si uvědomit, že na světlo resp. na světelný tok (záření) působí značné množství vlivů a z toho hlediska je nutné na světlo aplikovat různé teorie, které nám umožní z daného hlediska a daný jev charakterizovat. [29] Mezi jevy s nimiž se běžně v optice setkáme, patří:

1. interference - pro vysvětlení tohoto jevu se používá tzv. vlnová teorie světla. V případě vlnové teorie jak již ze samotného názvu vyplývá, nahlížíme na svazek jako na vlnu. Z toho hlediska vlnu dělíme na sférickou[1)] a rovinnou[2)]. Vlnová teorie se využívá v případě, že vlnová délka procházejícího záření je srovnatelná s velikostí částic (objektů) ovlivňujících svazek. Při interferenci obecně dochází k vzájemnému ovlivňování a skládání různých vlnění. [7]
2. difrakce - pro vysvětlení se využívá stejně jako u interference vlnová teorie. K difrakci pak dochází při průchodu vlnění otvorem nebo kolem překážky což vede k narušení vlnění (ohyb atp.),

3. lom (refrakce) - tento jev patří mezi základní pozorované a popisuje jej tzv. paprsková optika, která říká, že optický svazek je přímočaře se šířící záření procházející proměnným prostředím majícím na svazek různý vliv v prostoru i čase. Obecně při lomu dochází ke změně směru šíření vlnění. Zpravidla k lomu dochází při dopadu vlnění na rozhraní dvou různých prostředí majících různý index lomu a způsobujících různé rychlosti šíření světla.
4. odraz - k popisu se stejně jako v případě lomu využívá paprsková optika. Při odrazu může na rozdíl od lomu dojít k situaci, kdy se vlnění od rozhraní odrazí zpět do prostředí, odkud přichází. Platí zákon odrazu. [7]
5. polarizace - pro popis polarizace se využívá tzv. elektromagnetické teorie, ve které je světlo popisováno jako dvě vektorová pole (elektrické a magnetické) na sebe kolmá a popisovaná Maxwellovými rovnicemi. [7] Polarizace může být lineární, eliptická, kruhová.
6. absorpce - stejně jako polarizace se pro popis využívá elektromagnetické teorie. V případě absorpce jde o fyzikální proces, při němž je energie fotonu pohlcena látkou, která se skládá z atomů, jejichž valenční elektrony přecházejí mezi dvěma úrovněmi energie. Takto pohlcená energie může být vyzářena nebo přeměněna na tepelnou energii viz. kap. 2. Míra absorpce je vyjádřena absorpčním koeficientem. [7]
7. disperze - tejně jako polarizace se pro popis využívá elektromagnetické teorie. Při disperzi záření dochází k jeho rozkladu. Látka jakou světlo prochází je charakterizována různým indexem lomu jež je závislý na vlnové délce. V důsledku této závislosti dochází při lomu světla k odlišnému lámání různých vlnových délek s světlo je rozloženo. Např. rozklad (disperze) světla při průchodu opt. hranolem. [7]
8. interakce záření a látky - jde o fotoelektrický jev vysvětlovaný za pomocí kvantové optiky. Podle této teorie vycházející z kvantové fyziky je světelné záření vyzařováno v malých dávkách tzv. kvantech. Tuto teorii doložil fyzik Max Planck. [30]

(1) Sférická vlna - je taková vlna, jejíž vlnoplochy jsou koncentrické kulové plochy.

(2) Rovinná vlna - je taková vlna, jejíž vlnoplochou je rovina.

1.3.3 Parametry optického záření

Zmiňuji-li pojmy jakými jsou například vlnová délka, index lomu a podobné, je vhodné si tyto veličiny charakterizující optické záření vysvětlit a matematicky vyjádřit.

Jako první, vzhledem k tomu, že se pohybuji v optice a popisuji světelný svazek, je potřeba charakterizovat veličinu rychlost světla. Pro technické výpočty se využívá hodnota $c = 3.10^8$ *m/s* (rozuměno pro APP). Ve vakuu se světlo pohybuje rychlostí 299 792 458 m/s. Hodnota 3.10^8 však není hodnotou konstantní. Právě naopak při šíření světla APP, prochází světlo různými oblastmi s různými indexy lomu světla *n*, což způsobuje právě změnu rychlosti šíření světla daným prostředím. Index lomu *n* je bezrozměrná veličina.

Potom pro rychlost šíření záření v prostředí s indexem lomu *n* uvažovaném jako konstanta platí

$$v = \frac{c_0}{n}, \tag{1.1}$$

kde *n* je absolutní index lomu a c_0 je rychlost světla ve vakuu.

Index lomu můžeme však chápat i jako parametr frekvenčně závislý. V tom případě, je index lomu značen $N(\omega)$ a je komplexní funkcí frekvence.

$$N(\omega) = n(\omega) + j\kappa(\omega), \tag{1.2}$$

Tento popisuje rychlost šíření záření (světla) v látce. Imaginární část je interpretována jako index absorpce. Význam absorpce je popsán výše. Ve spojitosti s tímto navíc rozlišujeme mezi fázovou (1.3) a grupovou (1.4) rychlostí světla. Rychlost grupová je rychlostí šíření signálu a rychlost fázová definuje šíření ploch se stejnou fází vlnění a je závislá na vlnové délce. [7]

$$v_f(\omega) = \frac{c}{n(\omega)}, \tag{1.3}$$

$$v_g(\omega) = \frac{c}{n(\omega) + \omega\frac{dn}{d\omega}}. \tag{1.4}$$

Zajímavostí je skutečnost, že fázová rychlost může nabývat naprosto libovolných hodnot. Tím se rozumí, že může překročit hodnotu rychlosti světla ve vakuu nebo může nabývat i hodnot se záporným koeficientem. Naproti tomu rychlost grupová (přenášející informaci) je omezena právě rychlostí světla ve vakuu a kladným koeficientem své hodnoty.

Další veličinou, kterou je potřeba si definovat pro potřeby ohodnocení světelného záření je vlnová délka. Pro vlnovou délku záření ve vakuu platí:

$$\lambda = \frac{c_0}{\upsilon}[m], \tag{1.5}$$

kde υ je frekvence opt. záření. A vztah 1.6 platí pro prostředí s indexem lomu *n*.

$$\lambda = \frac{v}{\upsilon}[\mathrm{nm}]. \tag{1.6}$$

Další důležitou veličinou ohodnocující světelné záření je jeho energie

$$E = h \cdot \upsilon, [J] \tag{1.7}$$

kde h je Planckova konstanta (h = 6,6262.10^{-34}Js).

Pro určování parametrů a vlastností daného svazku se dále používají veličiny:

Optická intenzita

$$I(x,y,z) = I_0\left[\frac{w_0}{w(z)}\right]^2 e^{-2\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}}, \tag{1.8}$$

přičemž z Gaussovského rozložení vyplývá, že největší intenzity je dosaženo ve středu svazku a směrem k okrajům opt. intenzita klesá spolu s kvadrátem vzdálenosti.

Optický výkon

Optický výkon nesený svazkem na určitou vzdálenost je dán integrálem ze součinu opt.intenzity a plochy průřezu svazku, jež výkon přenáší [31]

$$P = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho, \tag{1.9}$$

nebo také

$$P(z,t) = \int_S I(x,y,z,t)dxdy, \tag{1.10}$$

potom pro výkon platí [7]

$$P = \frac{1}{2} I_0 \pi w_0^2. \tag{1.11}$$

Poloměr (pološířka) svazku

Vezmeme-li opt. svazek a provedeme příčný průřez svazku, dojdeme závěru, že v ose *z* leží maximum hodnot optické intenzity. Jak jsem zmínil již výše, maximum intenzity leží ve středu svazku a spolu se zvětšující se radiální vzdáleností ρ tato klesá. 86% výkonu je přenášeno v oblasti o poloměru *w(z)* kde *w(z)* je radiální vzdálenost, při níž výkon poklesne právě pod oněch 86% označuje se *w(z)* jako pološíře svazku. [31]

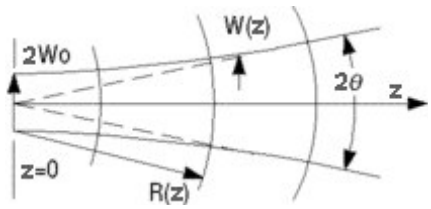
S rostoucí vzdáleností na ose z (tedy vzdalující se od zdroje) roste i pološířka svazku. V místě kde svazek opouští zdroj tedy v rovině z = 0 je pološířka svazku minimální w_0 což je místo označované jako střed svazku o poloměru w_0.

$$w(z) \approx \frac{w_0}{z_0} z = \theta_0 z, \tag{1.12}$$

tento vztah platí pro velké vzdálenosti od zdroje záření a Θ_0 je divergence svazku.

Divergence svazku

$$\theta_0 = \frac{2}{\pi}\frac{\lambda}{2w_0}. \tag{1.13}$$



Obr. 1.8: Graficky vyznačené výše diskutované parametry svazku jako úhel divergence, položířka svazku aj. [31]

Ohnisková hloubka

Ohnisková hloubka je vzdálenost v jaké položířka svazku dosáhne hodnoty $\sqrt{2}w_0$ a platí

$$2z_0 = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda}. \tag{1.14}$$

Z toho vyplývá, že ohnisková hloubka je přímo úměrná ploše průřezu svazku (čitatel) a nepřímo úměrná vlnové délce (jmenovatel) 1.14.

2 PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ

Je potřeba si uvědomit, že na vysílaný svazek po opuštění VS působí celá řada vnějších vlivů, které mohou způsobit značné problémy spojené s příjmem svazku a celkově s jeho přenosem. Obecně lze říci, že čím delší je přenosová cesta, tím širší škálou vlivů bude svazek zasažen. Nebudu se zde zaobírat přenosovým prostředím v rámci kosmického segmentu ani v rámci komunikace země-kosmický segment (vertikální spoje). Předmětem mého zájmu bude atmosférické přenosové prostředí (APP). Tak nazýváme prostředí, v jakém fungují terestrické spoje. Vzhledem k tomu, že IN-DOOR spoje jsou rovněž spoje atmosférické, má toto téma úzkou souvislost s pozdějším zaměřením se přímo na spoje IN-DOOR. V jednoduchosti lze říci, že přenosové prostředí v rámci IN-DOOR spoje je jakýmsi zmenšeným a mírně zjednodušeným modelem vlivů, jež působí na OUT-DOOR spoj proto považuji za účelné porozumět zákonitostem a vlivům působícím na OUT-DOOR spoje a nabyté vědomosti posléze aplikovat v menším měřítku na spoje IN-DOOR.

2.1 Atmosférické přenosové prostředí pro OUT-DOOR spoj

Je potřeba si uvědomit, že OUT-DOOR spoje provozované zvláště na dlouhé vzdálenosti jsou zatíženy vysokou proměnlivostí stavu přenosového prostředí. Pro APP (tedy spoje pracující v troposféře) obecně platí, že jde o prostředí nestacionární (mění se v čase), nehomogenní a s předpokladem, že jde zároveň o prostředí dielektrické, lineární, nedisperzní a izotropní. Z toho plyne, co jsem psal již výše, že jeho vliv na vysílaný svazek je zcela náhodný. V této podkapitole postupně objasním jednotlivé vlivy na spoj působící. Nejprve bude však vhodné vysvětlit jak se takové vlivy v rámci APP vlastně modelují.

2.1.1 Modelování vlivu atmosférického přenosového prostředí na kvalitu přenosu

Pro optické záření ve viditelné a IČ oblasti, je průchod APP obecně ovlivněn dvěma zásadními jevy a těmi jsou absorpce a rozptyl na molekulách a aerosolech obsažených ve vzduchu (blíže diskutované v kap. 2.1.5 až 2. 1. 10). Přenos záření v atmosféře je popsán Beer-Lambetovým zákonem viz. rovnice 2.1.

$$\tau(\lambda, L) = \frac{P(\lambda, L)}{P(\lambda,0)} = \exp[-\gamma(\lambda)L]. \tag{2.1}$$

Kde:

- $\tau(\lambda)$ je propustnost atmosféry na dané vlnové délce,
- $P(\lambda,L)$ je úroveň signálu ve vzdálenosti L od vysílače,
- $P(\lambda,0)$ je energie vyzářená vysílačem,
- $\gamma(\lambda)$ je útlum nebo koeficient extinkce na jednotku délky.

Vycházíme li z rovnice 2.1 interpretující Beer-Lambertův zákon, dostáváme typické

koeficienty útlumu γ pro:

1. čisté prostředí = 0,1 (0,43 dB/km),
2. opar = 1 (4,3 dB/km),
3. mlha = 10 (43 dB/km)

Dále je pak nutné hovořit o zmíněném koeficientu extinkce. Jde o veličinu zahrnující výše zmíněný rozptyl a útlum na molekulách a aerosolech. Pak platí vztah 2.2, kde $\alpha_{m,a}(\lambda)$je absorpce na molekulách respektive aerosolech a $\beta_{m,a}(\lambda)$je rozptyl na molekulách (tzv. Rayleighův rozptyl), respektive aerosolech (tzv. Mieho rozptyl). Pro oblast spektra využívanou pro AOS je koeficient útlumu aproximován koeficientem rozptylu na částicích zastoupených v atmosféře.

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda). \tag{2.2}$$

Víme tedy jak stanovit koeficient útlumu, zahrneme-li vlivy částic na šíření svazku. Dalším logickým krokem by tedy mělo být ohodnocení přenosového prostředí z hlediska propustnosti. Na obr. 2.1 je vyobrazena závislost propustnosti atmosféry na vlnové délce záření při stanovených parametrech. Je tedy potřeba definovat si základní veličiny pro modelování vlivu APP, které tvoří dílčí prvky v obecně známých rovnicích.

Tedy:

- koeficient útlumu atmosféry $\alpha_{1,atm}$,
- koeficient extinkce α_e,
- index lomu prostředí n
- strukturní parametr indexu lomu C_n^2.

Máme tedy výčet základních veličin, a jak jsem poznamenal výše APP je prostředím nestacionárním proto je očekávatelné, že zmíněné veličiny budou závislé na poloze (souřadnicích) v prostoru v rámci okolí blízkého přenosového kanálu dále na čase (stav prostředí se nemění jen v prostoru ale samotné lokální jevy jako déšť a jiné se mění i v čase) a na vlnové délce jak je ukázáno na obr. 2.1. Pak tedy můžeme psát.

- Pro koeficient útlumu atmosféry:

$$\alpha_{1,atm} = \alpha_{1,atm}(\vec{r}, t, \lambda), \tag{2.3}$$

- pro koeficient extinkce

$$\gamma_e = \gamma_e(\vec{r}, t, \lambda), \tag{2.4}$$

- pro index lomu prostředí

$$n = n(\vec{r}, t, \lambda), \tag{2.5}$$

- pro strukturální parametr indexu lomu

$$C_n^2 = C_n^2(\vec{r}, t, \lambda) \tag{2.6}$$

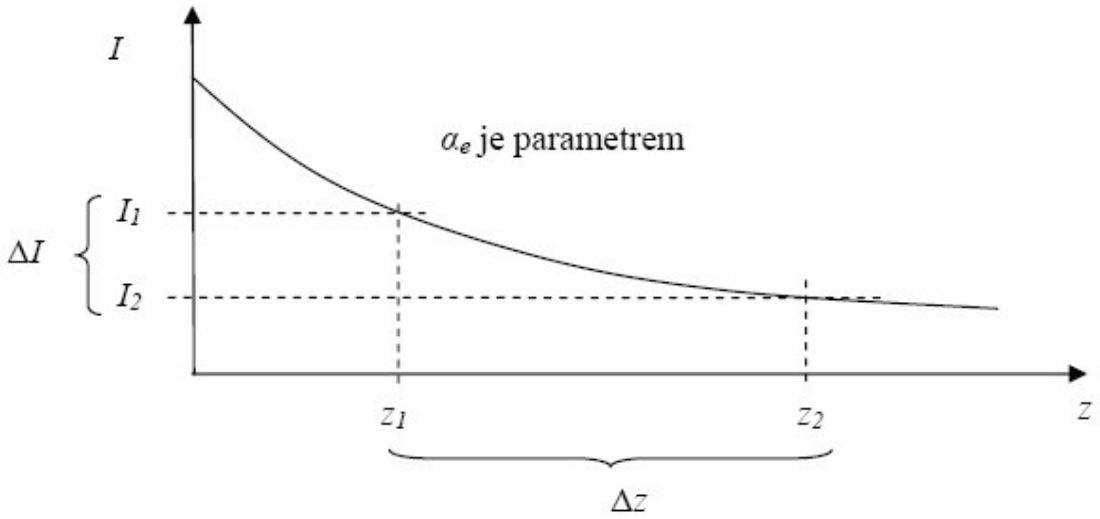
Abychom ohodnotili extinkci APP budeme vycházet z Bouguerova zákona viz. rovnice 2.7, kde *dI(λ)* je zeslabení optické intenzity na spektrální složce *λ* prochází-li záření vrstvou atmosféry o známe šířce *dz* a $\gamma_e(\lambda)$ je již zmíněný koeficient extinkce v [km^{-1}], který předpokládáme konstantní na celé trase atmosférou o tloušťce *Δz* [km].

$$dI(\lambda) = -\gamma_e(\lambda) I(\lambda) dz \ , \tag{2.7}$$

a dále integrací dostaneme:

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) \exp[-\gamma_e(\lambda)\Delta z]. \tag{2.8}$$

kde I_1 je optická intenzita na počátku a I_2 optická intenzita na konci vrstvy atmosféry o definované tloušťce *Δz* a z obr. 2.2 kde je patrná závislost optické intenzity na šířce atmosférického prostředí jakou musí záření překonat.



Obr. 2.2: Graf závislosti optické intenzity *I* na průchodu prostředím o tloušťce *z* při parametrickém koeficientu extinkce. [5]

Nyní když jsme si vysvětlili extinkci, a zavedli optickou intenzitu, můžeme definovat spektrální propustnost APP. Tedy koeficient, s jehož pomocí jsme schopni určit, jaké ztráty můžeme očekávat průchodem APP, tedy poměr přijaté ku vyslané optické intenzitě. Spektrální propustnost se označuje $T_\lambda(\lambda)$ a je definována vztahem

$$T_\lambda(\lambda) = \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} * 100 \ [\%]. \tag{2.9}$$

Dosadíme-li do této rovnice za I_1 a I_2 ze vztahu 2.8 můžeme psát, že pro spektrální propustnost platí

$$T_\lambda(\lambda) = \exp[-\gamma_e(\lambda)\Delta z]. \tag{2.10}$$

A pro střední spektrální hodnotu propustnosti platí vztah 2.11. Uvažujeme-li navíc koeficient extinkce *γ(λ)* na intervalu (*λ1 až λ2*) konstantní můžeme psát vztah 2.12.

$$T \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_\lambda(\lambda)d\lambda \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \exp[+\gamma_e(\lambda)\Delta z]d\lambda, \tag{2.11}$$

a při uvažování podmínek uvedených výše tedy

$$T = e^{-\gamma_e \Delta z}. \tag{2.12}$$

Dalším důležitým parametrem je tzv. meteorologická viditelnost (Visibility). Jde o pojem definovaný pro potřeby meteorologie. Tato veličina charakterizuje transparentnost atmosféry na základě odhadu pozorovatele. Viditelnost se měří například za pomocí diffusometru.

U meteorologické viditelnosti v našem případě jde o vzdálenost, na kterou dva paralelně vyzařované svazky musí projít atmosférou, dokud jejich intenzita neklesne 0.05x oproti původní hodnotě. Viditelnost se označuje *V* a jednotkou je obecně [*m*].

Mezi meteorologickou viditelností *V* a koeficientem extinkce *γ* platí vztah 2.15. Musí ovšem platit podmínky stanovené ve vztahu 2.13 a 2.14 kde I_1 a I_2 je optická intenzita před respektive po průchodu atmosférickým prostředím a *Δz* je tloušťka tohoto prostředí, jak jsem zmínil již výše při odvozování vztahu pro propustnost *T*. [5]

$$\text{Platí-li: } \frac{I_2}{I_1} = T = e^{-\gamma\Delta z} \text{ a pro } \Delta z \text{ platí: } \Delta z = V, \tag{2.13), (2.14}$$

za podmínek $I_2=0{,}02I_1$ a $\lambda=555nm$. Po úpravě pak můžeme psát pro vztah mezi koeficientem extinkce a meteorologickou viditelností vztah:

$$\gamma(\lambda) \approx \frac{3{,}91}{V\left(\frac{555}{\lambda}\right)^q}[km^{-1}; km, nm], \tag{2.15}$$

kde $q = 0{,}585 * V^{\frac{1}{3}}$ pro $V \le 6\ km$.

A stejně jako u optických kabelů i OBS stanovujeme koeficient útlumu $\gamma_{1,APP}$ [dB/km], který nám definuje zeslabení optické intenzity při průchodu APP o známé délce vrstvy L_{12} [km].

$$\gamma_{1,APP} = \frac{-1}{L_{12}} 10 \log \frac{I_2}{I_1}[dB/km]. \tag{2.16}$$

a vztah mezi koeficientem extinkce a koeficientem útlumu je

$$\lambda^{[km^{-1}]} = 0{,}23\gamma_{1,APP}^{[dB/km]} \tag{2.17}$$

Abychom nemuseli pro každý spoj pracně stanovovat viditelnost a koeficient extinkce, máme k dispozici tabelizované hodnoty pro odpovídající stav atmosféry. Tabulka zmíněných hodnot je uvedena níže viz. tab. 2.1.

Tab. 2.1 Tabelizované hodnoty V a $\gamma_{1,APP}$ pro uvedený stav atmosféry. [5]

V[km]	$\gamma_{1,APP}$ [dB/km]	Stav atmosféry
< 0,05	> 340	Silná mlha
0,2 ÷ 0,5	85 ÷ 34	Střední mlha
1,0 ÷ 2,0	14 ÷7,0	Slabá mlha nebo silný déšť
2,0 ÷ 4,0	7,0 ÷3,0	Opar
10 ÷ 23	1,0 ÷ 0,5	Čistá atmosféra

Vzhledem k tomu, že o bezdrátovou optickou komunikaci je v posledních desetiletích eminentní zájem je logické, že roste potřeba po jejím důkladném prozkoumání a standardizaci všech důležitých faktorů týkajících se těchto spojů. Jinak tomu není ani v případě zkoumání různých vlivů atmosféry a proto se pro modelování, dnes již ve velké míře, používají modely ověřené dlouhodobými měřeními. Tyto modelové situace pojednávající o dopadech různých dějů a vlivů v atmosféře na optický svazek jsou výsledkem dlouhodobých měření. V dalších kapitolách budu psát o jednotlivých dopadech dějů v atmosféře, jelikož si myslím, že toto téma si zasluhuje důkladné zkoumání a současně s nimi budu zmiňovat i právě tyto jednotlivé modely a podmínky za jakých byly výsledky dosaženy modely.

2.1.2 Atmosférické vlivy působící na optický bezdrátový spoj

Jak je okrajově zmíněno již v rámci kap. 1, vzhledem k tomu, že je optický spoj součástí troposféry, je množství vlivů na něj působící značné. V této kapitole se jen pokusím vyjmenovat tyto vlivy, abychom měli k dispozici ucelenou představu, a v rámci dalších částí kap. 2 budu jednotlivé problémy s atmosférickými jevy rozebírat a charakterizovat.

Nejprve bychom si měli jevy působící na svazek rozdělit do základních kategorií, které nám pomohou lépe chápat podstatu vlivu samotného.

Základní dělení:

1. útlumy - k útlumu dochází vlivem absorpce respektive rozptylu na molekulách nebo aerosolech (mohou působit současně),
2. fluktuace - kolísání optického výkonu, k němuž dochází vlivem turbulencí v atmosféře, deště, sněhových přeháněk a vlivem deformace tvaru svazku (rozšíření či odklon),
3. přerušení - k přerušení dochází ve chvíli, kdy není zajištěná přímá viditelnost, mezi vysílačem a přijímačem (byť chvilkově). Přerušit svazek

může v troposféře pták, letadlo a jiné.

Podstatou faktu, že index lomu atmosférického prostředí je náhodnou funkcí prostoru času (tedy je nestacionární a nehomogenní jak již bylo zmíněno), jsou lokální změny teploty a tlaku vzduchu přenosového kanálu. Tato skutečnost může způsobit, že v důsledku odklonění směru šíření svazku nebo jeho rozšíření způsobí značné změny úrovně přijímaného výkonu a to mnohdy až do oblasti kdy se přijímaný výkon zcela ztrácí v šumu nebo na přijímací hlavici vůbec nedopadne. Modelová ukázka odklonu svazku vlivem působení lokálních nehomogenit je na obr. 2.13**.**

Vnější vlivy však nemusí nutně působit pouze na optický svazek. Rovněž hardwarová část spoje (tedy vysílací a přijímací hlavice) je vystavována vnějším vlivům, které mohou v konečném důsledku způsobit, že byť dobře navržená energetická bilance spoje a modulace zaručující příjem s přijatelnou chybovostí i za velmi špatných podmínek jsou v důsledku zcela irelevantní. Například ve chvíli kdy svazek opouští VS která je již natolik odkloněna, že záření dopadá zcela mimo PS.

To byly tedy jevy působící přímo na VS a PS soustavy, kterým je věnována kap. 2.1.3 a nyní podrobněji vyjmenuji vlivy působící právě na svazek, jak jsme si popsali výše hrubým dělením. Stručný seznam je uveden v kap.1. Tedy jevy působící na optický svazek v atmosférickém přenosovém prostředí jsou:

- prachové částice,
- déšť,
- sníh (mokrý/suchý)
- mlha,
- sluneční svit,
- molekuly a atomy obsažené atmosféře (N_2, O_2, H_2, H_2O, CO_2 a mnoho dalších),
- proměnlivost teploty prostředí,
- turbulence,
- pevné překážky,
- odrazivost prostředí.

Všechny tyto vlivy jsou dynamické a mohou na spoj působit proměnlivě jak v čase, tak v místě, ale i ve vzájemné součinnosti. Zvláště pak u spojů realizovaných na dlouhé vzdálenosti není proměnlivost počasí žádnou výjimkou a tak se v různých úsecích spoje můžeme setkat s řadou odlišných anomálií. Právě proto se u optických spojů často provádějí testovací měření v řádů měsíců až let, aby bylo možné postihnout všechny vlivy působící v dané oblasti, analyzovat je a spoj vystavět takovým způsobem aby byl dostupný po většinu roku s předepsanou stabilitou a spolehlivostí co do chybovosti. Touto problematikou se bude zaobírat kapitola analýzy.

Ve stručnosti jsme si tedy pojmenovali jednotlivé jevy, s nimiž se můžeme setkat v rámci APP a nyní se na jednotlivé zaměříme. Provedeme důkladnou analýzu jak z hlediska problému jimi vyvolaných tak z hlediska jejich následného řešení. U jevů, s nimiž se můžeme setkat v rámci později detailně rozebíraných IN-DOOR spojů se o této skutečnosti zmíním a zaměřím se na ně detailněji z hlediska IN-DOOR i OUT-DOOR.

2.1.3 Mechanické vlivy

Jak jsem napsal již výše, nejen optický svazek bývá zasažen a degradován jevy, jež působí v APP. Bezdrátový optický spoj, jak je probíráno výše, se stává z vysílací a přijímací soustavy (VS a PS). Tedy minimálně ze dvou hlavic, jež na sebe míří a vyměňují si mezi sebou informace prostřednictvím optického svazku. Tyto hlavice jsou zpravidla umisťovány na střechy budov ať již rovné nebo zkosené, na stožáry, na transparentní místa vysokých budov a jiná vyvýšená místa, což zajistí přímou viditelnost. Příklad hlavic montovaných na stožáru a trojnožce je na obr. 2.5.

a) b)

Obr. 2.5: Názorná ukázka montáže hlavice OBS. a) na stožárek, b) na trojnožku. [6]

Mechanické vlivy, které na hlavice optického spoje působí, mohou způsobit značné nepříjemnosti. Jak jsem naznačil již výše, v důsledku takovýchto působení můžeme přijít o značnou část vyzářeného výkonu (ne-li o celý) aniž by prostředí, jimž svazek prochází, zasáhly jakékoliv jevy, jež by jej utlumovaly, defokusovaly. Odkloňovaly nebo jinak znehodnocovaly. Příkladem zdroje takovýchto problémů, může být například těžký sníh napadaný na těle hlavice, jež způsobí svou tíhou náklon hlavice a tím odsměrování svazku. To je však jen jeden z možných případů a níže v tab. 2.2 jsou popsány ve stručnosti další. Těmto vlivům se nemá cenu příliš věnovat neboť z hlediska pozdějšího zaměření na IN-DOOR spoje nás tyto nemusí příliš zajímat.

To jsou tedy zdroje a důsledky mechanického působení a v následující tabulce tab. 2.3 jsou nastíněny řešení takto vzniklých situací v rámci OBS. Nutno však podotknout, že tyto vlivy mohou působit na spoj současně a proto je potřeba spoj navrhovat co nejkomplexněji se zohledněním všech možných okolních vlivů a zahrnutí jejich dopadnu na spoj.

Toto však nejsou zdaleka jediné možnosti řešení problémů s mechanickým působením atmosférických jevů na vysílací respektive přijímací soustavu.

Vzhledem k tomu, že z hlediska optických spojů v rámci budov (IN-DOOR) nás tyto vnější vlivy příliš trápit nemusí, nebudu jim ani věnovat nějakou další pozornost a opustím tuto problematiku.

Tab. 2.2 Zdroje a důsledky mechanického působení atmosférických jevů na hardware OBS.

Zdroj působících vlivů	**Důsledky**
Teplotní variace působící na budovy	V důsledku působení vysokých teplot na konstrukci budovy ať již na vysílací či přijímací straně, dochází ke kroucení a ohýbání budov. Tato mechanická deformace má vzhledem k velice malé šíři svazku na spoj značný vliv. (Př.: hlavice se může pohybovat v rozmezí 1-2mrad což se zdá málo, avšak při spoji dlouhém 1km je rozptyl 1-2m).
Teplotní variace působící na hlavici OS	Stejný vliv má teplota i na hlavici samotnou byť ne v takové míře. Nicméně při zahřívání nemusí jít jen o problémy z konstrukčního hlediska, ale i co do elektronického vybavení hlavice a jejich prvků které s rostoucí teplotou mohou měnit své typické vlastnosti.
Povětrnostní vlivy	Při silném větru může docházet ke kymácení, chvění, ale i permanentního odklonění hlavice (není-li spoj dobře fixován). Tyto jevy způsobují rovněž defokusaci optického svazku (dlouho i krátkodobě).
Sluneční záření	Hlavice může být tímto zářením "oslepena" tedy intenzita záření může být natolik velká, že samotný přijímaný svazek a jeho energie zanikne. Sluneční záření může způsobit i HW škody na hlavici spoje.
Vodní páry	Mlha, déšť ale i sníh při odpařování mohou mít za následek ulpívání částic vody na optice hlavice (zamlžení a zarosení) a způsobit tak značný útlum ještě dřív než svazek defakto opustí VS nebo útlum trasy umocnit na přijímací straně.
Námraza	Částice vody a vodních par jež ulpěly na optice spoje mohou vlivem nízkých teplot zamrznout a vytvořit tak na povrchu optiky ledovou krustu byť nepříliš hrubou. Takovýto jev má pak za následek notné zvýšení útlumu.
Sněhová pokrývka	Sníh ulpívající na hlavici optického spoje může svou vahou, zvláště pokud jde o mokrý těžký sníh, zapříčinit nahnutí hlavice a tím defokusaci svazku.

Tab. 2.3 Řešení dopadů mechanických vlivů na OBS

Zdroj působících vlivů	Řešení
Teplotní variace působící na budovy	Používá se mechanismus pro automatické vychylování paprsků, který pohyb budovy eliminuje. Jde zpravidla o technologie založené na gyroskopech nebo v případě PS na monitorování přijímaného výkonu a na základě znalosti gaussovského rozložení výkonu následné natočení hlavice aby přijímala maximální výkon. Dále se využívá systému s více LD což zvětší ozářenou plochu na straně přijímače, vyšší intenzitu a možnost využití spoje na delší vzdálenost. Naopak rozšíření svazku řeší problém s vychylováním budovy, ale jelikož s optický výkon více rozprostře, nedosáhneme tak dlouhých spojů.
Teplotní variace působící na hlavici OS	Pro zamezení nežádoucích vlivů teploty na hlavici se využívá aktivní i pasivní chlazení.
Povětrnostní vlivy	řeší se velice dobrým mechanickým fixováním spoje a systémem automatického nebo ručního dosměrovávání za pomoci elektromechanického ovládání, nad nímž má kontrolu i obsluha spoje (i vzdálenou).
Sluneční záření	Využívá se spektrálních filtrů, které zamezí průniku slunečního záření na jeho vlnové délce.
Vodní páry	Využívá se s výhodou tzv. defrosteru, což je odporový drát tažený na čelní cloně VS a PS, který při potřebě odstranit ulpívající rosu nebo i námrazu zahřívá tuto clonu a vyčistí tak její povrch a umožní bezproblémovou prostupnost svazku. (podobnost s vytápěním zadního skla u osobních automobilů).
Námraza	Stejně jako v případě vodních par a jejich ulpívání.
Sněhová pokrývka	Vyhřívání hlavice spoje

2.1.4 Pevné překážky

Vzhledem k tomu, že APP je součástí troposféry jak jsem již zmínil, je dost dobře možné, že dojde k přerušení optického svazku pevným předmětem. Tato problematika nám nebude cizí ani při řešení IN-DOOR spojů, proto ji bude věnována patřičná pozornost a kromě možných zdrojů takovýchto rušení zmíníme i možná řešení.

Nejprve tedy problematiku pevných překážek z hlediska OUT-DOOR spojů neboť zde nepředstavují tak markantní problém.

Představíme-li si spoj realizovaný na řádově kilometrové vzdálenosti, roste spolu se vzdáleností i reálná možnost přerušení svazku. Podle toho, v jaké nadmořské výšce se spoj nachází, mění se i problémy s přerušováním svazku. Zatím co ve vysokých nadmořských výškách nám spoj může přerušit například prolétávající letadlo či pták, tak naproti tomu v nízkých polohách a zvláště v městské zástavbě kromě ptactva může optický svazek dost dobře přerušit i člověk. Stačí k tomu neopatrný pohyb dělníků na střeše a přímá viditelnost je narušena. U venkovních spojů jsou tyto přerušení velice náhodné a zpravidla krátkodobé.

Pro příklad uvažujme:

Pták letící rychlostí 40km/h nám přeruší svazek jehož úhel divergence je 3 mrad ve vzdálenosti 1km od zdroje záření. V této vzdálenosti je průměr ozářené plochy 300cm. Tak jednoduchým výpočtem neuvažujeme-li velikost ptáka.

$$v = \frac{s}{t}[m.s^{-1}] \Rightarrow t = \frac{s}{v} = \frac{0,3}{0,278} = 1,079[s] \tag{2.18}$$

Tedy doba přerušení svazku činní přibližně jednu vteřinu.

Samozřejmě s rostoucí plochou se doba bude zvětšovat, tudíž letadlo nám svazek může přerušit na delší dobu a stejně tak člověk nebo člověkem umístěná překážka. Avšak zpravidla se hlavice umisťují na taková místa, kde se nepředpokládá pohyb osob a jiného (např. okraje střechy, vysoké stožáry aj.) aby se tyto vlivy co nejvíce eliminovaly. Bohužel zamezit ptákům a podobným zasáhnout do trasy paprsku nelze a v takovémto případě se jako řešení používá například tzv. speciální kanálové kódování.

Pro spoje v rámci budov, kanceláří a jiných však přerušování svazku představuje mnohem větší problém. Zde se totiž pohybu osob, strojů a podobně zpravidla nevyhneme. Zvláště chceme-li pomocí OBS přivést signál až k pracovní stanici například v rámci kanceláře. Je nutné předpokládat, že pohyb v kanceláři není nijak korigován a směřuji-li signál na výškovou úroveň pohybujících se osob, pak možnost přerušení výrazně roste. Rovněž délka přerušení svazku bude mnohem delší než řádově jednotky sekund, jelikož člověk je obecně větší než např. pták a hlavně je zde možnost jeho dlouhodobého nehybného setrvání právě v trase svazku.

Z tohoto hlediska se nabízí opět využití speciálních kanálových kódů. Mimo tohoto řešení, zde však máme další možnosti jakými je například plošné záření zdroje s využitím LED diod. Takto plošně vyzářený paprsek je díky své divergenci schopen pokrýt značnou plochu a tím nám dává možnost například využit dvou přijímačů, kdy pří znepřístupnění jednoho funguje druhý. Stejně tak se toto řešení nabízí i s využitím LD jen s tím rozdílem, že využijeme například dvou LD a každá bude směřována na jiný přijímač a podle dostupnosti se bude mezi těmito přepínat. Dalším možným řešením by mohlo být využití odrazné plochy a vícecestného šíření. Bližšímu pohledu na řešení těchto situací se bude věnovat kapitola analýzy spoje.

Z hlediska optimálního řešení bude pro experimentální spoj v rámci analýzy vybrán vhodný postup a ten posléze aplikován a zkoumán. Je však jasné, že problematika přerušování svazku je jednou z největších nevýhod oproti bezdrátovým rádiovým spojům jakými je například Wi-Fi technologie.

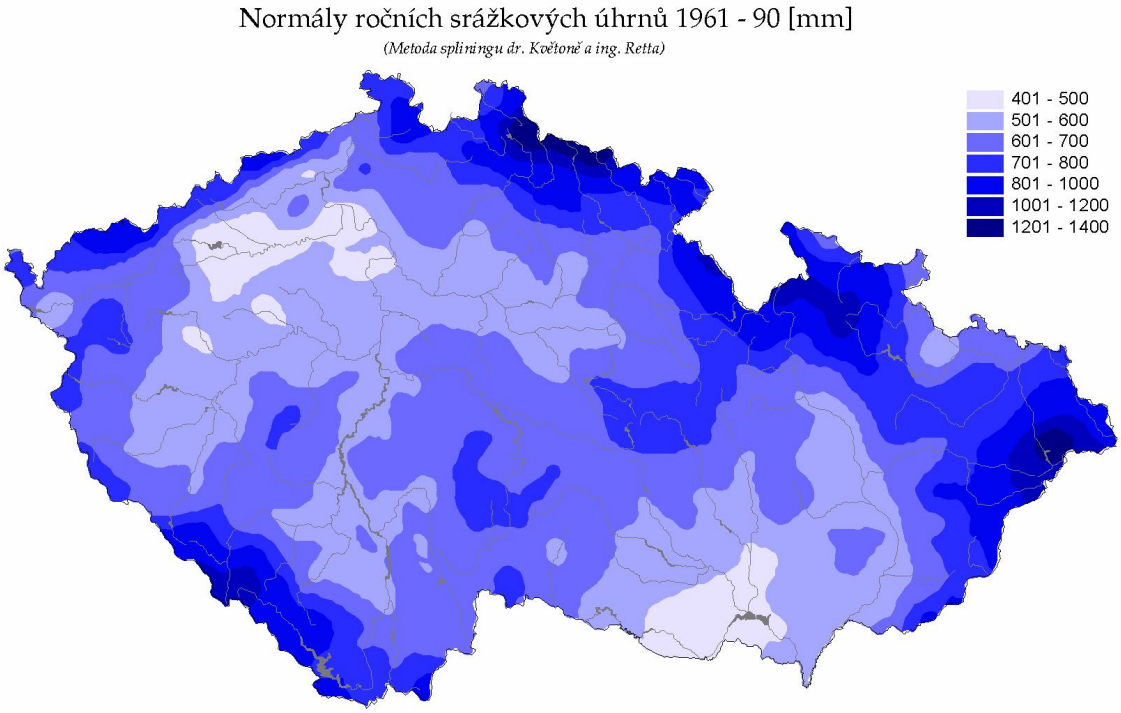
2.1.5 Útlum a absorpce na hydrometeorech a aerosolech

Pojmem hydrometeor rozumíme atmosférické srážky obsahující vodní částice v plynném nebo kapalném stavu. Tyto se vznáší v atmosféře nebo ulpívají na zemském povrchu. Hydrometeorické srážky se dělí na:

- vertikální - těmi je například déšť, sníh, kroupy,
- horizontální - rosa, zmrzlá rosa, mlha, opar ale například i zvířený sníh aj.

Mezi hydrometeory se ovšem neřadí oblaka, byť vodu obsahují. [7]

Je tedy jasné, že s vlivy útlumu a absorpce na hydrometeorech se budeme setkávat na většině povrchu planety a tedy tento problém představuje pro návrh OBS značnou překážku kterou je třeba řešit lokálně pro dané území, na němž spoj stavíme. Na obr. 2.6 je pro zajímavost mapa průměru srážkových úhrnů na území České Republiky za období 1961 -1990 [8]. Než ovšem přistoupíme ke způsobům řešení, vysvětlíme si dopady a příčiny těchto problémů. Z hlediska IN-DOOR spojů nejde však o tak důležité téma jelikož s krupobitím se v kanceláři setkáme jen stěží. Nicméně v malém množství se s problémy z oblasti zvláště aerosolů setkat můžeme i u těchto spojů. Jako příklad můžeme vzít stoupající páru při vaření vody v rychlovarné konvici. Tolik na úvod a nyní k samotným problémům s atmosférickými srážkami.



Obr. 2.6: Mapa průměrných srážkových úhrnů na území České Republiky. [8]

Na hodnotu parametru koeficientu útlumu, má do značné míry vliv podíl absorpce a rozptylu na různých částicích aerosolů a na molekulách plynů obsažených v atmosféře. Proto vlnové délky zdrojů záření (laserů) volíme tak, aby spadaly do tzv. propustných oken, kde je vliv absorpce na celkový útlum zcela zanedbatelný. Proto jsou typicky volené vlnové délky zdrojů záření $\lambda=785$, 850, 1550 nm. Druh rozptylu je pak určen velikostí částice obsažené v atmosféře s ohledem na vlnovou délku prostupujícího záření. Rozptylu je pak věnována kap. 2.1.8.

Aerosoly

Aerosoly jsou velice jemné pevné nebo kapalné částice obsažené v atmosféře a mají velice malou spádovou rychlost způsobenou gravitačním polem země. Obecně jsou to částice větší než molekuly, ovšem stále natolik malé, aby zůstaly v atmosféře potažmo v přenosovém prostředí po poměrně dlouhou dobu. K zemi klesají jen velmi pozvolna (spádová rychlost je velice malá). Tyto částice (aerosoly) mají průměr d v rozmezí $0.002\mu m < d < 100\mu m$. V tab. 2.4 se můžeme přesvědčit, že zdroje aerosolu v atmosféře jsou skutečně rozmanité a je jasné, že s některými se můžeme setkat i v případě IN-DOOR spojů.

Mezi aerosoly v pevné formě počítáme například prach, kouř aj. jejich velikost se pohybuje mezi 10^{-2} - $100\mu m$. Další je tedy forma kapalná a zde jde například o mlhu, větrem unášenou mořskou vodu, jemné mrholení aj. Dále pak člověkem nebo přírodou vypouštěné plyny a v přímořských oblastech je navíc v atmosféře a vodě (částicích vody) do značné míry zastoupená sůl respektive krystalky soli a podle typu pobřeží a vzdálenosti od něj i různé další mikroskopické částečky.

Tab. 2.4: Odhad obsahu částic (aerosolů) vypuštěných nebo vznikajících v atmosféře. (Celkové množství činí ročně více než 10^6 metrických tun/rok (1971)). [15]

Zdroj	
Zemina a částečky prachu	100-500
Lesní požáry a hořící trosky	3-150
Mořská sůl	300
Sopečná suť	25-150
Částice vznikající emisemi plynů:	
Sulfát vzešlý z H_2S	130-200
Amonné soli z NH_3	80-270
Dusičnany z NO_8	40-430
Uhlovodíky vylučované rostlinami	75-200
Člověkem produkované:	
Přímo produkované částice	10-90
Částice tvořené emisemi plynů:	
Sulfát z SO_2	130-200
Dusičnan z NO_8	30-35
Uhlovodíky	15-90

Aerosoly mají na atmosférický útlum vliv vzhledem k jejich chemickému složení, velikosti a koncentraci. Především velikost má na životnost částice v APP značný vliv. Aerosoly obsažené v atmosféře dělíme podle zmíněné velikosti a to do dvou kategorií, kde v každé z těchto kategorií vznikají tyto částice jinak.

Kategorie zahrnující jemné částice s průměrem $d < 2.5\mu m$, která se dále dělí viz. níže a kategorie zahrnující "velké" částice s průměrem $d > 2.5\mu m$.

Jemné částice se dále mohou ještě dělit podle způsobu vzniku a to na částice vzniklé kondenzací, srážením a formováním se přímo v atmosféře. V tomto případě jde

o částice s $d < 0.1\mu m$ a toto dělení se nazývá Aitken [15]. Druhým způsobem je akumulace kde částice vznikající touto cestou mají průměr v rozmezí $0.1 < d < 2.5\mu m$. Zásadní rozdíl je tedy ve způsobu vzniku, ale také v tom, že první jmenované se mohou rozvíjet a zvětšovat narozdíl od částic vzniklých akumulací. Skupinou s průměrem $d > 2.5\ \mu m$ jsou částice vzniklé za přispění mechanických vlivů jakými je například vítr, který zvířuje prach, písek, částečky rostlin aj. Těmto usazeným částicím, které se do APP dostávají tímto způsobem se říká sedimenty neboli usazeniny.

Jak jsem zmínil výše, velkou roli pro OBS hraje "životnost" částice, tedy doba po jakou bude částice setrvávat v atmosféře, tím pádem bude součástí APP a bude ovlivňovat spoj. Doba života se primárně odvíjí od velikosti částice. Nebudeme-li brát do úvahy vliv turbulencí na částice, ale pouze gravitační sílu a odpor prostředí můžeme definovat stálost respektive spádovou rychlost těchto částic. Obecně platí tab. 2.5. Kde T_{100} představuje čas po jaký částice o průměru d bude padat $100m$.

Tab. 2.5: Spádové časy částic (T_{100}) o průměru d pro dráhu 100m (k zemi). [15]

Průměr d[μm]	**Doba pádu T_{100}**
0.10	≈ 3.6 let
1.00	≈ 33 dní
10.0	≈ 8.5 hodin
100	≈ 7minut

Další dělení skladby částic je možné pro oblasti nad otevřenými vodními plochami, hlavně oceány a moři. Tato problematika však IN-DOOR spoje zcela míjí, proto se jí nebudu zaobírat, pouze zmíním dělení na částice obsahující mořskou sůl a menší částice obsahující částečky aerosolů z pevniny.

Na počátku kapitoly jsem naznačil, že nejvíce nás zajímá velikost částice. Není to však jediný aspekt, který svazek ovlivňuje. Dalším parametrem majícím vliv na extinkci svazku, je samozřejmě složení částice přicházející do konfrontace se svazkem. Z toho nám plyne, že abychom byli schopni vyjádřit hodnotu extinkce prostřednictvím aerosolů, potřebujeme znát jejich množství, velikost a také složení. K tomu nám mimo jiné slouží parametr popisující množství částic jako funkci jejich velikosti (zrnitosti) jde o takzvané rozložení velikosti částic (z ang. PSD - particle size distribution - dále budu používat zkratku PSD). Tento parametr bývá měřen množstvím nástrojů založených na využívání mechanických, aerodynamických a elektromagnetických principů. Mnohem složitější je však stanovit složení oné částice. Jedna z technik spočívá v analyzování částice procházející měřící soustavou pro určení PSD což nám, však poskytuje pouze základní informace o složení. Pro přesnější určení složení se částice zachytávají pomocí filtrů a ty se následně analyzují v laboratořích. Je tedy patrné, že při takovýchto měřeních narážíme na mnohá úskalí zvláště v jejich využití v pracovních podmínkách hlavně v případech, kdy nechceme provádět zdlouhavá a náročná měření pro každý jeden realizovaný spoj. Z těchto důvodů byly a průběžně jsou sestavovány modely popisující koncentraci aerosolů v APP jako funkci meteorologických nebo klimatologických parametrů. Tyto modely se dělí podle prostředí, pro něž jsou využívané na modely pro městské prostředí, venkov, přímořské prostředí a troposférické prostředí.

Modelování vlivů aerosolů

Jak jsem již zmínil, je praktické a žádoucí mít k dispozici nástroj minimalizující potřebu provádět zdlouhavá měření ve chvíli kdy chceme realizovat OBS. A v průběhu zkoumání vlivů aerosolů na OBS byla vytvořena celá řada modelů studujících a popisujících tento jev. Tyto modely jsou dnes využívány k predikci koncentrace částic v APP na základě klimatologických a aktuálních meteorologických podmínek. Neexistuje však tak komplexní model, který by nám umožnil přesně stanovit výslednou extinkci pouze na základě těchto vložených dat. A lokální meteorologické podmínky jsou zároveň hlavní příčinou variability a těžké předvídatelnosti stavu atmosféry z hlediska aerosolů. Nicméně spojíme-li predikci aktuálního stavu aerosolů v APP se znalostí aktuálních meteorologických a geografických podmínek, které budeme při výpočtech brát v potaz, jsme schopni se skutečným hodnotám velice přiblížit. Pro koncentraci aerosolových částic v atmosféře platí:

$$c(r) = \frac{dN}{dr}, \tag{2.19}$$

což je vyjádření koncentrace objemu částic se zvětšujícím s uvažovaným poloměrem. Pro gamma záření pak byl vztah modifikován (Deirmendjian) [17] na:

$$c(r) = \frac{dN}{dr} = ar^{\alpha} \exp(-br^{\gamma}), \tag{2.20}$$

kde pro *b* píšeme:

$$b = \frac{\alpha}{\gamma r_{\mathrm{mod}}^{\gamma}}. \tag{2.21}$$

V tomto vztahu pak r_{mod} je proměnný poloměr (v μm) korespondující s poloměrem při jakém je hodnota *c(r)* maximální a kde *N* je celkový objem částic na cm^3. Proměnné *a, b,* α a γ jsou čtyři variabilní parametry, které umožňují této funkci použití pro širokou škálu modelů. Máme-li k dispozici zjištěné údaje o velikosti částic je možné sestavit histogram pro *N=f(r)*. Kromě výše zmíněných vztahů pro koncentraci částic aerosolů v APP se využívá ještě jedna modifikace vztahu 2.19 tzv. Jungeho distribuční funkce:

$$c(r) = \frac{dN}{d\log r} = pr^{-\nu}, \tag{2.22}$$

kde koncentrace *c(r)* je definována jako množství částic na logaritmus poloměru. Stanovení *p* a *v* je založeno na individuálním charakteru typu aerosolu.

Konkrétně exponent *v* může nabývat hodnot v rozmezí $2 < v < 4$, kde nižší z hodnot je typická například pro mlhy. Pak pokud platí, že koncentrace částic je funkcí jejich velikosti pak můžeme *p* vyjádřit ze vztahu 2.22. Je však nutno podotknout, že výše zmíněné uvažují pevninské podmínky. Budeme-li koncentraci zkoumat v oblastech přímořských nebo přímo nad mořskou hladinou je nutné vzít v úvahu zvýšenou

koncentraci částic mořské soli. Pro vztah 2.22 pak takovéto částice znamenají značnou změnu v předikovaných profilech koncentrace v oblasti částic s velikostí mezi *1-10μm* což naneštěstí zasahuje velké množství vlnových délek používaných a uvažovaných pro laserovou komunikaci.

Jak jsem zmínil již dříve, byly pány Shettlem a Pennem navrženy čtyři modely pro oblasti venkova, industriální, přímořské a troposférické. Tyto modely jsou dostupné v programu MODTRAN, který umožňuje na základě vložených vstupních parametrů nasimulovat chování APP v dané oblasti.

Pro oblasti venkovské nebo snad lépe řekněme oblasti bez industriálních vlivů jsou typické aerosoly ve formě směsí prachu (zeminy) a podobných částic a výsledný index refrakce je dán váhováním podílu různých druhů aerosolů v této směsi.

Co se týče industriálního modelu tak tento zahrnuje i například produkty vzniklé spalováním jako jsou například saze a další typické pro průmyslovou zástavbu. Index refrakce pro takovéto částice má poměrně značnou imaginární část obzvláště v porovnání s ostatními aerosoly pro vlnové délky ve viditelné oblasti spektra**.** Pro přímořské oblasti, jak jsem již zmínil výše, musíme kromě klasických částic brát do úvahy i částice mořské soli. Tyto se shromažďují a kondenzují v oblastech s vysokou vlhkostí v blízkosti moří. Aerosoly v přímořských oblastech tedy obsahují dvě hlavní složky a to je příspěvek mořských solí a část pevninských částic stejně jako v případě venkovských oblastí. Neobsahují však zpravidla větší částice z pevniny neboť tyto podléhají vyšší spádové rychlosti a během unášení větrem se dostávají k zemi a již pro nás nejsou relevantní. Snaha pro pochopení a popsání přímořských aerosolů je reprezentována především modely NAM a ANAM (Navy Aerosol Model a Advanced Navy Aerosol Model), kdy první zmiňovaný je rovněž součástí prostředí MODTRAN jako jeden ze základních modelů pro přímořské oblasti. 15]

Z popsaných situací je tedy jasné, že rozsah útlumů vlivem aerosolu je značný a je nanejvýš žádoucí, aby pro jeden každý spoj byla provedena analýza a predikce za použití informací a dat o lokálním stavu prostředí a za použití výše zmíněných modelů.

Tyto výzkumy a modely, nám tedy umožňují na základě definovaného scénáře z hlediska aerosolů spočíst očekávatelné útlumy způsobené právě těmito částicemi. Pro tento účel nám slouží například softwarový balík s názvem OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds). Tento program obsahuje databázi vlastností různých typů aerosolů v rozsahu velikosti *0.25* až *40.0* μm včetně vlastností mraků a různých složek aerosolů a jejich případný vliv na záření pro různé vlnové délky za různých podmínek vlhkosti. Výstupem jsou pak informace o koeficientech absorpce, rozptylu a útlumu, které je možno exportovat a dále s nimi počítat. Jde o volně dostupnou aplikaci na webových stránkách *http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/*.

Hydrometeory

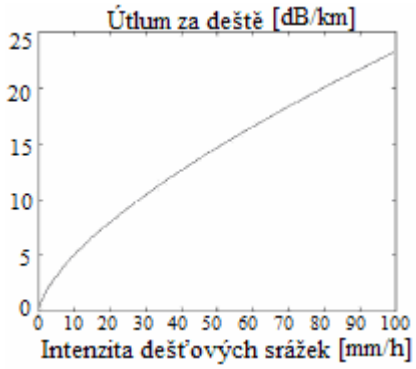
Pod tímto názvem se neskrývá nic jiného, než atmosférické srážky tedy obecně srážky dešťové a sněhové. Avšak vzhledem k tomu, že s atmosférickými srážkami se v rámci budov a uzavřených prostor tedy v rámci IN-DOOR spojů pravděpodobně nesetkáme, nebudu jim věnovat takovou míru pozornosti.

Dešťové srážky

Dešťové srážky přispívají výraznou měrou ke zvýšení útlumu signálu v APP. Pro

útlum způsobený deštěm platí vztah 2.23, tzv. Carbonneaův vztah [16], ve kterém R je míra srážek [mm/h] a vliv srážek na hodnotu útlumu je patrný ze závislosti na obr. 2.7.

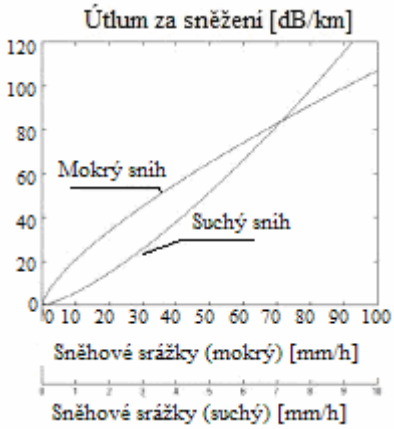
$$Att_{rain} = 1.076 * R^{0,67} [dB / km]. \tag{2.23}$$



Obr. 2.7: Vliv míry padajících dešťových srážek na útlum prostupujícího svazku.[19]

Sněhové srážky

U srážek sněhových jde o problematiku složitější. Kromě hustoty spadených srážek má na spoj vliv i vlhkost sněhu. V souvislosti s tímto hovoříme o tzv. sněhu vlhkém a suchém. Pro útlum vlivem sněhových srážek platí vztah 2.24 kde parametry a respektive b platí pro suchý resp. mokrý sníh podle vztahů 2.25 a 2.26. Dále S je srážkový úhrn opět [mm/h] a λ je vlnová délka přenosové vlny [nm]. Na obrázku 2.8 je pak jasně vidět rozdíl pro oba typy sněhu a je patrné že od určité míry srážkového úhrnu se mění míra útlumu mezi oběma druhy a při silných srážkách je pro OBS větším problémem právě sníh suchý.



Obr. 2.8: Vliv míry padajících sněhových srážek na útlum svazku. Pro mokrý a suchý sníh. [19]

$$Att_{snow} = a.S^{b} [dB / km], \tag{2.24}$$

$$a = 5{,}42.10^{-5} \lambda + 5{,}4958776, \quad b=1{,}38 \text{ - pro suchý sníh,} \tag{2.25}$$

$a = 1{,}023.10^{-4}\,\lambda + 3{,}7855466$, $b=0{,}72$ - pro mokrý sníh. (2.26)

Mlha a opar

Navzdory tomu, že s mlhou se v IN-DOOR spojích rovněž nesetkáme, považuji tento element rovněž za natolik podstatný, že jej zde zmíním alespoň okrajově. Jak jsem již předeslal mlha je pro OBS pravděpodobně jedním z největších problémů. Vzhledem k závislosti velikosti koeficientu útlumu na vlnové délce prostupujícího záření. S novými poznatky, se však ukazuje, že tato závislost není zcela pravdivá. Akceptujeme-li Eldrigeho tři typy stavu atmosféry způsobující sníženou viditelnost pak docházíme závěru, že pro meteorologickou viditelnost $V < 500m$ přestává platit výše zmíněná závislost. [23]

Eldrige stanovil pro: $V < 500m$ jako mlhu, pro $V > 1000m$ jako opar a mezilehlou zónu pro $500m < V < 1000m$ označuje jako mrholení.

V oblasti označované jako opar platí, že se snižující se vlnovou délkou se úměrně zvyšuje atmosférický útlum, což koresponduje se staršími tvrzeními. Oproti tomu však stojí meteorologická viditelnost nižší než 500m označovaná jako mlha resp. silná mlha kde jak je ukázáno níže se hodnota útlumu spolu s měnící se vlnovou délkou nemění.

Pro stanovení specifického útlumu pro různé vlnové délky a podmínky meteorologické viditelnosti, existuje několik modelů. Dva nejznámější a asi i nejpoužívanější jsou Kurseho a Kimův model. Specifický útlum je pak stanoven ze vztahu 2.27 [20], kde V [km] je viditelnost, λ [nm] je vlnová délka, referenční hodnota viditelnosti na vlnové délce λ_0 [nm] a pro propustnost pak pokles na percentuální hodnotu $V\%$ z hodnoty pro čistou oblohu.

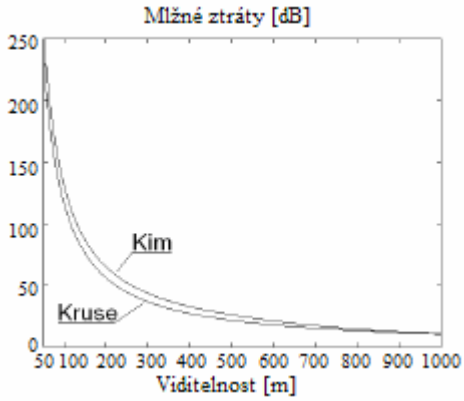
$$\alpha_{spec} = \frac{10\log V_{\%}}{V[km]}\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-q}[dB/km], \tag{2.27}$$

a pro parametr q, který vyjadřuje právě závislost vlnové délky a platí pro něj následující vztahy. Vztah 2.28 podle Kurseho a 2.29 podle Kima. Pro vysoké hodnoty útlumu je vhodnější a přesnější Kimův model.

$$q = \begin{cases} 1{,}6 & když \quad V \geq 50km \\ 1{,}3 & když \quad 6km < V < 50km \\ 0{,}585V^{1/3} & když \quad V < 6km \end{cases}, \tag{2.28}$$

$$q = \begin{cases} 1{,}6 & když \quad V \geq 50km \\ 1{,}3 & když \quad 6km < V < 50km \\ 0{,}16V + 0{,}34 & když \quad 1km < V < 6km \\ V - 0{,}5 & když \quad 0{,}5km < V < 1km \\ 0 & když \quad V < 0{,}5km \end{cases}. \tag{2.29}$$

Je tedy patrné, že Kurseho model lépe pokrývá stavy atmosféry, kdy je viditelnost velice špatná což umožnilo potvrdit tvrzení výše. Na obr. 2.9 jsou pak křivky závislosti ztrát v mlze způsobených snižující se viditelností jak pro Kimův tak pro Kurseho model. Závěrem snad jen zmíním, že vztah dále upravil Al-Naboulsi, který dále mlžné prostředí specifikoval pro dva typy mlhy a to mlhu advektivní a konvektivní. [20]



Obr. 2.9: Závislost ztát (v mlze) na meteorologické viditelnosti s využitím Kimova a Kurseho modelu. [20]

V tab. 2.6 jsou pro srovnání hodnoty atmosférických ztrát dle starých předpokladů vyčíslených podle 2.30 s využitím Kurseho modelu a podle nových s využitím Kimova modelu vyčíslených podle 2.27. Z tabulky b) je patrné že pro *V<500m* nemá vlnová délka žádný vliv, jak bylo výše uvedeno.

$$\sigma = \frac{3{,}91}{V}\left(\frac{\lambda}{550nm}\right)^{-q}. \tag{2.30}$$

Rovněž se experimentuje s využitím vztahu 2.30 a Kimova modelu nicméně tato práce ještě nebyla adekvátně ověřena měřeními. [20]

Je třeba si však uvědomit, že i když jednotlivé modely a studie počítají se situacemi, kdy je APP a spoj zatížený výhradně například deštěm, ve skutečnosti jsou v atmosféře přítomny i další částice které se v této vyskytují prakticky neomezeně a stále. Například prach a podobné. Proto je potřeba si uvědomit, že spoj je i při zdánlivě čisté atmosféře, úmyslně neříkám za jasného dne, zanesen množstvím látek a částic mající na něj vliv. A naproti tomu i za deště nebo jiné události je potřeba stále uvažovat i ony v atm. neustále přítomné částice.

2.1.6 Útlum a absorpce na molekulách a rozptyl na molekulách

Jak jsem zmínil již při popisu rovnice extinkce, tento jev je díky své nevýraznosti resp. díky dominanci rozptylu zanedbatelný. β_m tedy při uvažování vlivu APP na svazek zanedbáváme.

A vzhledem k velikosti molekul ve vzduchu, které jsou ve srovnání s vlnovou délkou záření ve viditelném a IČ spektru velice malé zanedbáváme rovněž útlum a absorpci na molekulách α_m.

Tab. 2.6: a) atmosférické ztráty pro vlnové délky λ=785 a 1550nm podle vztahu 2.30 v závislosti na meteorologické viditelnosti. b) atmosférické ztráty pro vlnové délky λ=785 a 1550nm podle vztahu 2.27 v závislosti na meteorologické viditelnosti. [18]

Met. viditelnost [km]	dB/km 785nm	dB/km 1550nm	Počasí
0,05	315	272	Mlha
0,2	75	60	
0,5	29	21	
1	14	9	
2	7	4	Opar
4	3	2	
10	1	0,4	Čistá atm.
23	0,5	0,2	

Tabulka a)

dB/km 785nm	dB/km 1550nm	Počasí
340	340	Mlha
85	85	
34	34	
14	10	
7	4	Opar
3	2	
1	0,4	Čistá atm.
0,5	0,2	

Tabulka b)

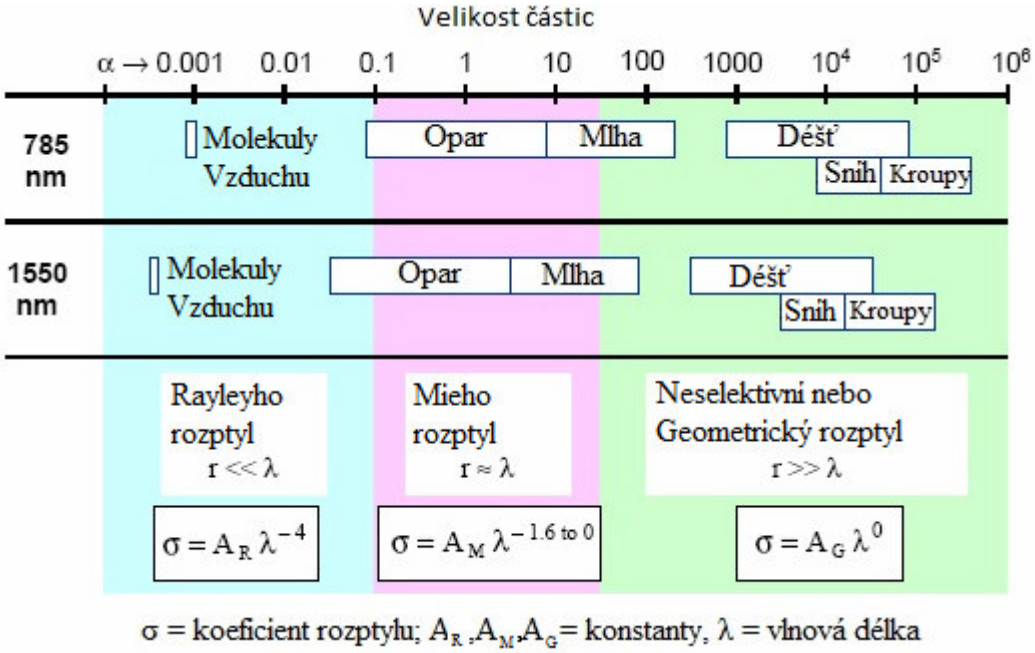
2.1.7 Rozptyl na hydrometeorech, aerosolech a molekulách

V souvislosti s rozptylem hovoříme zpravidla o tzv. Mieho teorii rozptylu (Mie scattering theory). Jde o základní myšlenku spojující vliv velikosti částice, kterou vlna překonává (kterou prostupuje), na extinkci při vlnových délkách odpovídajících velikosti této částice. A vzhledem k velikostem částic, jež mají na OBS největší vliv je jasné, že se s tímto jevem a tudíž i problémem můžeme setkat i v rámci IN-DOOR spojů. Mieho rozptyl se tedy týká částic o velikosti mezi *0.1 až 50 μm* což je interval pokrývající převážně mlhy a opary. Mimo těchto se však s rozptylem v APP setkáváme i v případě Rayleighova rozptylu a to na molekulách vzduchu a rozptylu tzv. neselektivním nebo geometrickém. Z obr. 2.10 je jasně patrný vliv jednotlivých typů rozptylů na záření o vlnových délkách *λ=785 a 1550 nm* na částicích resp. molekulách určité velikosti.

Z čistě praktického hlediska nám tedy v oblasti rozptylu u OBS způsobují větší problémy aerosoly a molekuly v ovzduší v důsledku jejich velikosti. Tedy částice o velikosti v rozmezí *0,1 -50 μm* na nichž se uplatňuje Mieho teorie rozptylu. Přehled velikostí částic pro různé stavy atmosféry v porovnání s délkou vlny je uveden v tab. 2.7. Vlna dopadající na kapky vody za deště je vzhledem ke své vlnové délce (řádově nm) nesrovnatelně menší v porovnání s velikostí kapky vody (řádově mm) a proto jimi prochází prakticky nepozměněná. Oproti tomu mlha je pro OBS obrovským problémem, neboť částice přítomné v APP jsou v té době srovnatelné nebo menší než je vlnová délka procházejícího záření.

Rayleyho rozptyl jak napovídá obr. 2.10, nastává pro částice mnohem menší než je vlnová délka. Zpravidla jde o molekuly plynu a podobně. Z hlediska celkového koeficientu útlumu, je však Rayleyeho rozptyl zanedbatelný.

Zajímavost: Platí, že modré světlo je rozptylováno mnohem více než světlo červené a Raylyeho rozptyl má tedy za následek modré zbarvení oblohy.



Obr. 2.10: Vliv částic určitých velikostí na záření o vlnové délce *λ=785 a 1550 nm* a příslušný typ rozptylu, jež se na nich uplatní. [18]

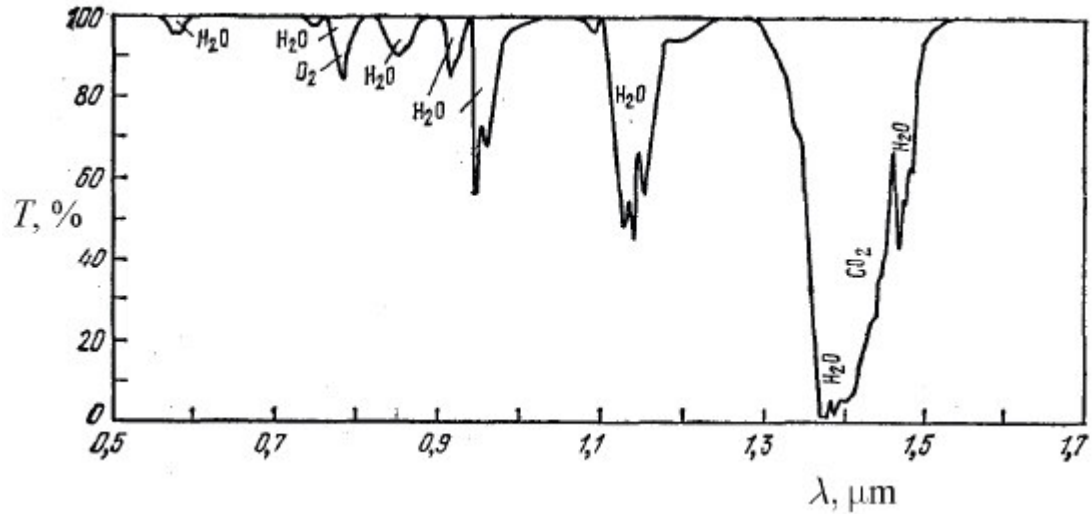
Z tab. 2.7 je jasně patrná míra vlivu mlhy na spoj a je tedy jasné, že jde o dominantní problém v oblasti útlumu energie procházejícího svazku resp. v oblasti Mieho rozptylu. Extinkce svazku je pak dána součtem absorpce a rozptylu energie svazku a oba tyto můžeme spočíst za pomocí Mieho teorie viz. níže.

Tab. 2.7: Parametr velikosti částic (parametr dimenze) ve vztahu k různým stavům atmosféry a přítomnosti jednotlivých částic. [18]

Typ částic	Poloměr [μm]	Parametr velikosti částice *x* resp. *α*	
		785 nm	1550 nm
Molekuly vzduchu	0,0001	0,0008	0,0004
Částice oparu	0,01-1	0,08-8	0,04-4
Kapky mlhy	1-20	8-160	4-80
Déšť	100-10000	800-80000	400-40000
Sníh	1000-5000	8000-40000	4000-20000
Kroupy	5000-50000	40000-800000	20000-400000

Jak jsem předeslal již dříve, právě z důvodu výše popisované absorpce a zde zmiňovaného rozptylu, je nutné pečlivě volit vlnové délky zdrojů záření. V praxi se tedy využívají primárně vlnové délky *λ= 785, 850, 1550 nm* spadající do oblastí, kterým v rámci APP říkáme propustná okna (transmission window). [2] Jde o oblasti, kde na zmíněných vlnových délkách dochází k minimální interakci s molekulami a částicemi a tudíž vliv Rayleighova a Mieho rozptylu je minimální, což je pro OBS z hlediska přenášené energie žádoucí. Na obr. 2.11 je jasně patrná propustnost atmosféry z hlediska absorpce prostupujícího záření respektive propustnosti tohoto záření na určitých vlnových délkách. A je jasně viditelné, že na výše zmíněných vlnových

délkách jsou vlivy minimální, proto je volba těchto vlnových délek pro AOS výhodná.



Obr. 2.11: Propustnost atmosféry při zanedbání nepříznivých vlivů (déšť atp.) za podmínek kdy měříme na úrovni mořské hladiny při trase dlouhé 1km a šíři spektrální čáry 1,5nm. [5]

Parametry extinkce pro částice aerosolů jsou vyjádřeny téměř výhradně pro částice tvaru kulového nebo pro zploštělé a protáhle elipsoidy. To nám ovšem nebrání využít teorii i pro jiné tvary částic (válcové atd.). Základní Mieho výpočet hovoří, o absorpci a rozptylu zasažené prostupující vlny na homogenní kouli. V úvodu jsem již zmínil, že záleží na velikosti částice, která ovlivňuje svazek, ale problematika je trošku složitější.

Ve skutečnosti je možné, ignorujeme-li značně větší částice, pozorovat rozdílný vliv v případě, že je částice výrazně menší než vlnová délka a v případě, že jsou velikostně srovnatelné.

Pro částice jež jsou zhruba stejné velikosti nebo větší než vlnová délka prostupující vlny se při výpočtu extinkce uvažuje primárně vliv rozptylu. Naproti tomu pro částice značně menší než je vlnová délka prostupující vlny se při výpočtu extinkce uvažuje primárně vliv absorpce. Což nám dává možnost vždy druhou zmíněnou zanedbat a zjednodušit si tak výpočty.

Z předchozího rozboru je tedy jasné, že v Mieho teorii hraje hlavní roli vlnová délka λ prostupující vlny a velikost částice. Potom můžeme psát 2.31.

$$x = kr = \frac{2\pi r}{\lambda}[-], \tag{2.31}$$

kde x je bezrozměrný parametr velikosti, r je poloměr částice, k je vlnové číslo a λ vyzářená vlnová délka. Jde tedy pouze o poměr mezi velikostí částice a vlnovou délkou vyzářené vlny. Pro dopadající záření o optické intenzitě I_0, je celková rozptýlená energie na jednotlivých částicích o poloměru r a s indexem refrakce n snadno zjistitelná podle 2.28. Celková energie dopadající na částici, na níž dojde k rozptylu, označujeme C_{sca} (rozptyl na optické trase). Podobně pak celková energie dopadající na částici, která je touto absorbovaná je označována jako C_{abs}, této se pak říká absorpce na optické trase.

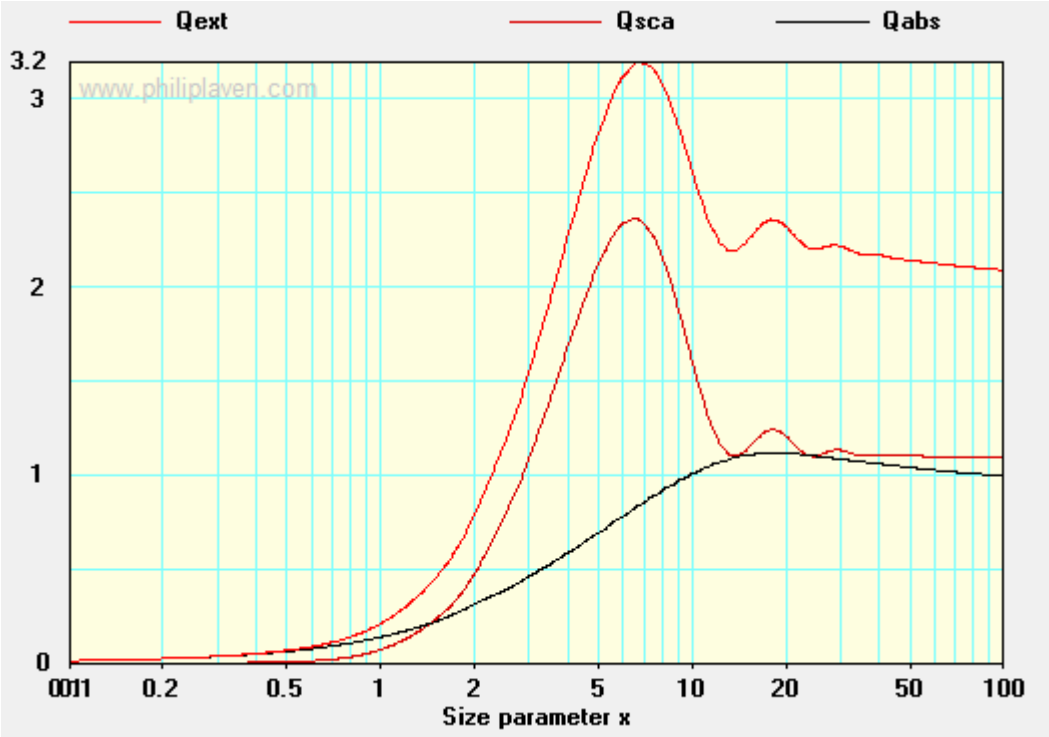
Pro extinkci svazku C_{ext} pak můžeme psát:

$$C_{ext} = C_{sca} + C_{abs}, \tag{2.32}$$

často se o této extinkci hovoří jako o celkové energii odebrané svazku. Velikost částic, vlnová délka a charakteristická extinkce jsou vyjádřeny pomocí veličiny označované jako extinkční účinnost Q_{ext} vyjádřené podle vztahu 2.33. Kde uvažujeme kulovou částici o poloměru r a s geometrickým průřezem πr^2. [15] Nechápejme však extinkční účinnost jako pozitivní jev. Právě naopak jde míru ztracené energie vlivem překážek ve formě molekul a aerosolů myšleno tedy jako do jaké míry bude mít parametr extinkce na svazek vliv (jaká bude jeho "účinnost").

$$Q_{ext} = \frac{C_{ext}}{\pi r^2}. \tag{2.33}$$

Faktor extinkční účinnosti je obvykle uvažován jako závislost Q_{ext} na parametru velikosti x vyjádřeném ve vztahu 2.31. Příklad této závislosti je na obr. 2.12 což je výsledek simulace exportovaný z programu MiePlot v4.2.03 [17].



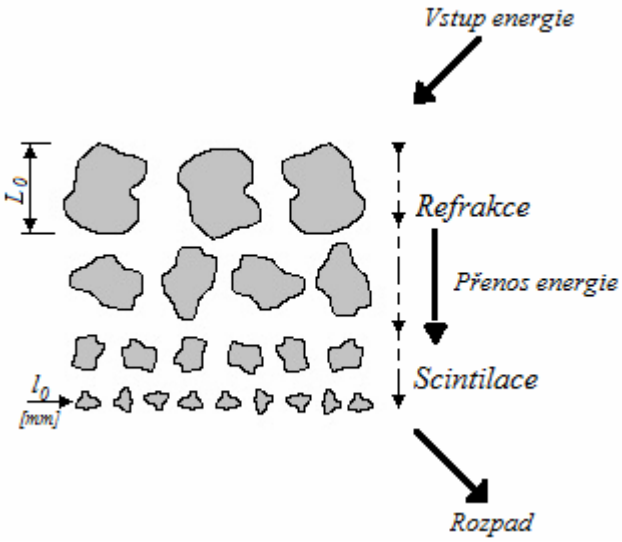
Obr. 2.12: Extinkční účinnost spočtená pro index refrakce n = 1,29 + i0,05 pomocí programu MiePlot při λ=850nm, prostředí šíření byl zvolen vzduch o teplotě 23°C s n = 1,0002669 a rušivým elementem byly částečky vody s rostoucím parametrem velikosti x.

2.1.8 Turbulentní vlivy a vlivy změn teplot

Optické turbulentní vlivy se objevují v důsledku změn v atmosféře. Mezi takovéto změny patří například proměnlivá teplota vzduchu, směr a rychlost proudění větru, relativní vlhkost, obtékání překážek a mnoho jiného. Tyto změny mají za následek (rozumějme vzájemná interakce těchto jevů) neuspořádaný pohyb vzduchu v APP. V případě, že turbulentní proudění větru v atmosféře způsobí vzájemnou interakci mezi vertikální vlhkostí a teplotního gradientu, kterou způsobuje ohřev zemského povrchu způsobený Slunečním zářením. Tento jev má pak na svědomí vznik iregularit v indexu lomu APP což má za následek vznik tzv. buněk (cells), vírů a podobně, jež jsou souhrnně nazývány optickými turbulencemi. [15]

Zdánlivě, tento jev působí jako problém postihující pouze OUT-DOOR spoje, avšak není tomu tak. V IN-DOOR spojích se s turbulentními vlivy setkáme rovněž v hojné míře. Například v oblasti topných těles (radiátorů), v kancelářích u počítačů, v dílnách u obráběcích strojů, ale i v běžné domácnosti. Zvláště silné turbulentní vlivy jsou pozorovatelné v oblasti oken, pod kterými jsou umístěny radiátory, které zvláště v zimě kdy dochází k interakci teplého a studeného proudění spolu s vlhkostí mohou mít za následek silné turbulentní vlivy působící na případný procházející svazek. Je tedy patrné, že turbulencemi je vhodné se zabývat podrobněji a proto se zde budu věnovat analýze turbulencí a jejich vlivu na optický svazek a možnostem řešení tohoto problému a budu se snažit tento problém aplikovat do oblasti IN-DOOR optických spojů.

Z hlediska vzniku turbulencí, se budu věnovat výhradně turbulencím termickým vznikajícím vlivem měnící se teploty v různých vrstvách vzduchu. Teplota zde rozpíná masy vzduchu a v důsledku toho se mění index lomu. Dalšími turbulencemi jsou turbulence dynamická a mechanická ty nás ale vhledem k podstatě svého vzniku nemusejí zajímat, jelikož se v IN-DOOR spojích neuplatní.



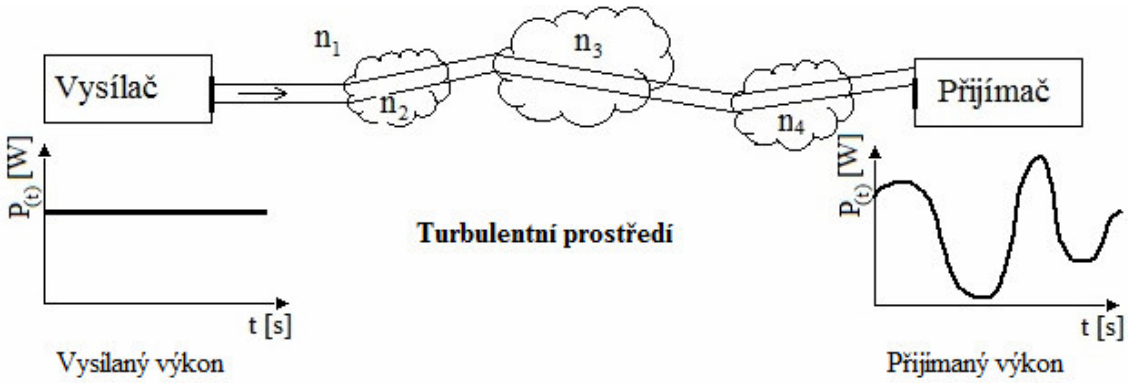
Obr. 2.13: Kaskádní teorie turbulencí a přenos energie mezi nimi podle Kolmogorova a jevy na svazek působící. [27]

Turbulentní buňky (cell's) mohou mít různou velikost. Pro názornost byla zavedena teorie kaskádních energií turbulencí. Z obr. 2.13 je patrné dělení turbulencí z hlediska

jejich velikosti. Při působení vlivů majících za následek vznik turbulencí se po překročení určité hranice vytvoří tzv. nestabilní lokální buňky mající určitou velikost. V závislosti na této velikosti mají tyto buňky vliv na svazek. Pro buňky o velikosti L_0 hovoříme o tzv. refrakci, neboli lomu. Naproti tomu čím jsou buňky menší tím více se bude projevovat jev scintilací (fluktuace optické intenzity) až k buňkám o velikosti l_0. Tento interval $<L_0,l_0>$ se nazývá setrvačný rozsah. Turbulence menší než jakými jsou vnitřní turbulence o velikosti l_0 se již rozpadnou a zbývající energie se přetransformuje v teplo a okolí se nepatrně ohřeje. [27]

Refrakce

Buňky (cells), o velikosti L_0, mají tedy různý index lomu (n) mající za následek, že svazek jimi procházející je tzv. fokusován a odsměrován jinými slovy je odkloněn od místa kam měl dopadat. Pod tímto pojmem se jednoduše rozumí odklon svazku od apertury přijímací soustavy (PS). Podle toho, o který z výše zmíněných případů jde, můžeme vliv chápat jako destruktivní a nedestruktivní. V případě odsměrování, dochází k odklonění svazku od přijímací apertury, což má za následek ztrátu velké části energie resp. kolísání optického výkonu jak je patrné z obr. 2.14. V mnohých případech může být odklon tak výrazný, že celý svazek dopadá mimo aperturu PS a tedy dojde ke ztrátě veškerého signálu resp. jeho energie z hlediska PS v mírnějším měřítku, poklesne signál pod minimální stanovenou úroveň citlivosti přijímače. Naopak v případě dosměrování dopadá svazek a celá jeho energie přesně na aperturu PS. Je však potřeba si uvědomit, že ačkoliv by se jev dosměrování mohl zdát jako výhradně pro nás dobrý je tomu právě naopak. V případě, že je svazek fokusován a nedochází ke ztrátám a právě naopak celá energie dopadá na aperturu, může dojít k situaci, kdy dojde k poškození PS vlivem přemíry dopadající energie tedy k saturaci. Tento jev je mimo jiné důsledkem jednoho z řešení turbulentních vlivů, které si popíšeme níže.

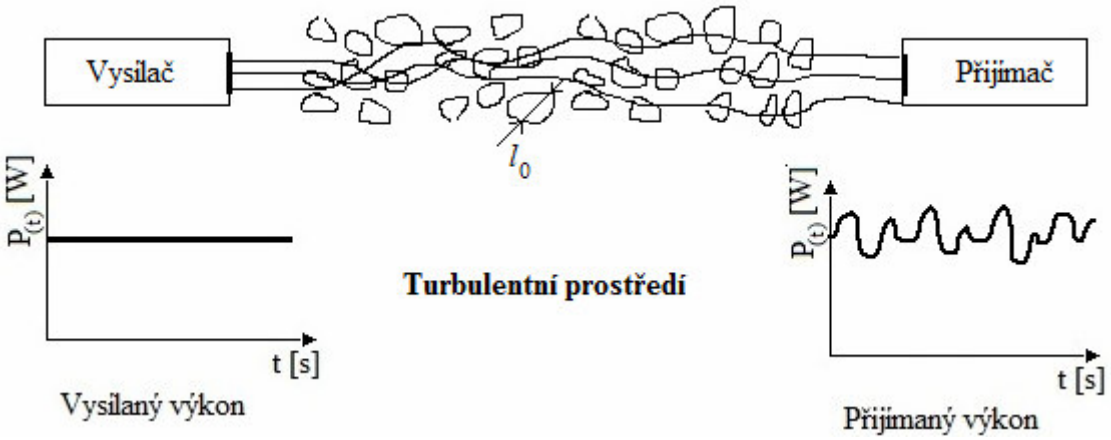


Obr. 2.14: Naznačení vlivu refrakce na buňkách (L_0) na svazek optického signálu procházejícího APP. [21]

Scintilace

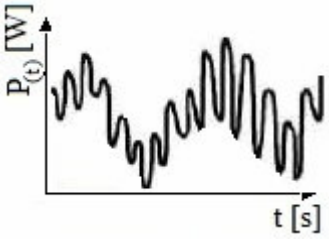
Jevy popisované výše tedy odsměrování a dosměrování, měly za následek odklon svazku. V případě, že mluvíme o fluktuaci přijímaného optického výkonu, mluvíme o jevu, jež nazýváme scintilacemi. Tento jev má za následek kolísání signálů z optických zdrojů, které vzniká v důsledku ohybu optických svazků na lokálních nehomogenitách o velikostech l_0. Na obr. 2.15 je naznačen průchod svazku turbulentní oblastí a vliv lokálních nehomogenit na svazek, kde na přijímací straně je patrná fluktuace přijaté

energie. Jak jsem již zmínil, následkem rozprostření nebo úplného odchýlení dopadajícího svazku potažmo energie dochází ke zvýšení bitové chybovosti (BER - bit error rates) o které se zmíním později a rovněž může tedy dojít k úplné ztrátě signálu. Vzhledem k závažnosti tohoto problému a četnosti výskytu, je pro turbulentní vlivy vypracována celá řada modelů vztahujících se k určitým stavům a typům turbulencí. O těchto se zmíním později pouze okrajově, neboť zpravidla se vztahují na spoje OUT-DOOR.



Obr. 2.15: Naznačení vlivu fluktuace přijaté energie při průchodu turbulentním prostředím s lokálními nehomogenitami o l_0. [21]

V konečném důsledku je tedy signál ovlivněn fluktuací energie způsobenou lokálními nehomogenitami o velikostech l_0 a odchylováním svazku vlivem buněk (cells) o velikosti L_0 s různým indexem lomu. Podíl obou jevů na výsledný přijímaný výkon je patrný z obr. 2.16.

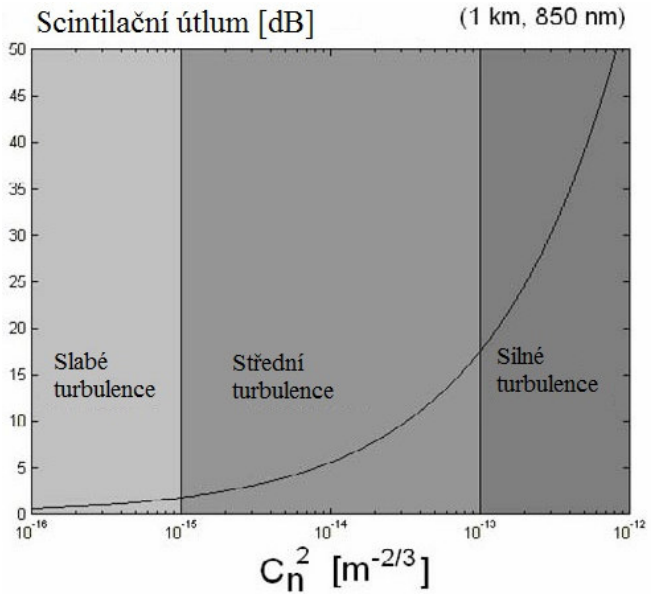


Obr. 2.16: Účinky scintilací a refrakce na výkon přijímaného svazku. [21]

Amplituda (velikost) a frekvence (rychlost) scintilací, je závislá na velikosti buněk ve srovnání s šíří svazku. [20] Pak platí, že frekvence a intenzita fluktuací roste spolu s frekvencí prostupující vlny. Pro názornost, uvažujeme-li rovinnou vlnu, neturbulentní prostředí resp. prostředí s minimálním výskytem a vlivem turbulencí a pro náš případ specifický přijímač můžeme pak pro rozptyl scintilací psát rovnici:

$$\alpha_{scin} = 2\sqrt{23{,}17.\left(\frac{2\pi}{\lambda}10^{9}\right)^{7/6}.C_n^2.l^{11/6}}\,[dB], \qquad 2.34$$

kde λ reprezentuje vlnovou délku vysílače [nm], l je délka kanálu [m] a Cn^2 (index lomu) strukturní parametr indexu lomu [$m^{-2/3}$] reprezentující intenzitu turbulencí. Pro neturbulentní prostředí se Cn^2 blíží hodnotám řádově 10^{-16} pro prostředí s průměrným vlivem turbulencí se hodnota pohybuje okolo 10^{-14} a pro vysoce turbulentní prostředí pak 10^{-13} a více.[20] Vliv turbulentního prostředí na svazek z hlediska scintilačního útlumu je patrný na obr. 2.17 kde bylo provedeno měření na vzdálenost l = 1km při vlnové délce λ = 850nm pro intenzitu turbulencí v rozmezí $Cn^2 = 10^{-16}$ až 10^{-12}. [20]



Obr. 2.17: Vliv intenzity turbulencí Cn^2 na scintilační útlum svazku na vzdálenost 1km a při λ=850nm. [20]

Spolu se vztahem 2.30 je patrné, že při silných turbulentních vlivech dochází k saturaci rozptylu neboli k tzv. nasycení turbulencemi.

Strukturní parametr indexu lomu C_n^2 je funkcí vlnové délky, atmosférického tlaku a teploty atmosféry tedy prostředí. Tento parametr, se vzhledem k měnícím se podmínkám v atmosféře spolu s rostoucí nadmořskou výškou rovněž výrazně mění a v krajních oblastech atmosféry se blíží 1, což odpovídá vakuu. Naopak pro nízké nadmořské výšky tedy blízko zemského povrchu je tato hodnota nejvyšší. Jak jsem uvedl již výše, hodnota parametru C_n^2 ovlivňuje sílu optických turbulencí. V tab. 2.8 je přehled vlivu strukturního parametru indexu lomu C_n^2 na míru atm. turbulencí. Další dělení pak ještě upřesním z hlediska chybovosti BER a odstupu SNR v další části práce. Z tabulky už je samo o sobě patrné, že od určitých hodnot C_n^2 se spoj stává nepoužitelný, jelikož hodnota chybovosti natolik vzroste, že nemůže spolehlivě fungovat.

Pro simulaci vlivů turbulencí na svazek procházející APP se v dnešní době využívá řada modelů. Zpravidla jsou však navrhována pro OUT-DOOR spoje. Mezi typické modely patří PAMELA Model (poskytující nám odhad parametru C_n^2 při povrchu), Gurvich model (pojednávající o závislosti parametru C_n^2 na nadmořské výšce h), Greenwood model a celá řada dalších. [15] Abychom však dosáhli maximální věrohodnosti a tedy i odpovídajících výsledků pro vhodné nastavení spoje, je stejně jako

v případě modelování rozptylů a útlumů použít ve zvoleném modelu vhodné parametry charakterizující oblast, ve které bude spoj provozován. Je tedy možné vhodný model po vložení vlastností prostředí a jeho parametrů použít pro i pro IN-DOOR spoje a s určitou rezervou se výsledky řídit.

Tab. 2.8: Vliv strukturálního parametru indexu lomu C_n^2 na míru turbulencí v atmosféře. [15]

C_n^2 [$m^{-2/3}$]	Míra atm. turbulencí
10^{-17}	Velice slabé (nereálná hodnota)
10^{-16}	Slabé
10^{-15}	Střední
10^{-14}	Silné
10^{-13}	Velice silné
10^{-12}	Extrémní (spoj nepoužitelný)

Pro řešení turbulentních vlivů, existuje celá řada možností dnes v praxi využívaných. Například zvětšení velikosti přijímací apertury je pravděpodobně nejsnazší cesta jak redukovat turbulentní vlivy mající za následek příjem pouze části energie vyslaného svazku. Další možností je použití fázového difuzoru jako nenákladné řešení zajišťující rozšíření paprsku což omezí scintilací a zeslabení signálu prostřednictvím domnělého efektu rozšíření apertury. Tyto techniky jsou účinné však pouze pro velmi slabé nebo střední intenzity turbulencí. Jakmile však v APP dochází k silným turbulencím, je potřeba využít systému, jež jsou založeny na využití adaptivní optické regulaci. Samotná realizace však není předmětem řešení této kapitoly, proto jí zde neuvádím. K dispozici je však v literatuře [20].

2.1.9 Vliv slunečního svitu

Tento problém se týká spíše výhradně OUT-DOOR spojů. V rámci IN-DOOR spojů, lze tento vliv dobře eliminovat vhodným umístěním vysílací respektive přijímací optiky a v případě, že by takto nebylo možno vliv eliminovat, řešením je způsob používaný v OUT-DOOR spojích. K této problematice se tedy vyjádřím pouze velice stručně.

Zásadní vliv na PS má sluneční záření ve chvíli, je-li slunce přibližně v rovině nasměrování OS. V tuto chvíli totiž sluneční paprsky dopadají s maximální intenzitou na aperturu PS. Pro tuto potřebu je zaveden termín zorné pole, které je definováno, jako část prostoru jaký je optický přijímač schopen zachytit tedy oblast ze které na PS dopadají světelné paprsky (náš optický svazek). [7] Pokud tedy známe potřebné parametry přijímací soustavy a zdroje záření (nemusí jít nutně výhradně o slunce, ale i o jiný silný zdroj záření) můžeme zorné pole spočíst a získaná hodnota se bude pohybovat v řádech desítek *mrad*. Vypočtená hodnota však bude jen orientační neboť na sluneční paprsky má APP stejný vliv jako na optický svazek námi vysílaný proto dochází k určitým deformacím a změnám v průběhu šíření a ty by bylo nutné zahrnout rovněž.

Uvědomíme-li si však, že sluneční záření je definováno jako záření o určité vlnové délce, dojdeme k rozumnějšímu řešení tohoto problému. Tímto řešením je použití tzv.

interferenčního filtru, který má za následek potřebnou selekci přijímaného signálu. Tedy filtr propouštějící pouze úzké pásmo vlnových délek (v podstatě jednobarevné světlo). Je založen na interferenci záření procházejícího několika vrstvami s rozdílným indexem lomu. Na přijímací aperturu se tedy dostane pouze záření o požadované vlnové délce vysílače a samozřejmě i ostatních zdrojů vysílajících na této vlnové délce. Druhým řešením podstatně snazším avšak nikoliv tak účinným a všestranně použitelným je využití stínícího štítu. V tomto případě nejde o nic jiného než o jakýsi štít (kšilt) čnící nad aperturou PS fyzicky bránící vniku záření zdrojů z jiných směrů než ze směru přímého tedy od VS (avšak zároveň i čehokoliv co září v ose šíření svazku).

2.1.10 Vliv prachových částic

Vliv prachových částic je diskutován v rámci aerosolů. Vzhledem k velikosti prachu a jeho složení se na něj může uplatňovat stejně jako například na mlhu Mieho rozptyl proto jej nebudu znovu řešit a jako výchozí pro prach budu brát kap. 2.1.7. Tím však neodsunuji prach jako zanedbatelnou složku APP. Právě naopak prachové částice jsou nedílnou a téměř vždy přítomnou složkou APP a to jak v IN-DOOR tak v OUT-DOOR spojích. V IN-DOOR spojích se s nimi obzvláště často budeme setkávat v místnostech resp. budovách v blízkosti silnic, továren a jiných industriálních oblastí a oblastí s vysokou prašností. A obzvlášť´t silný výskyt lze uvažovat při instalaci spojů např. v továrnách a na podobných místech kde je zvýšená prašnost.

2.1.11 Vliv odrazivosti prostředí

S tímto jevem, se setkáme téměř výhradně v IN-DOOR optických spojích. U OUT-DOOR spojů jsou hlavice namířeny přesně na sebe a malá divergence svazku nedává prostor pro více cestní šíření a podobně. Oproti tomu při použití v oblasti IN-DOOR spojů, můžeme odrazivých ploch nejen využívat pro šíření svazku, ale hlavně v případě že použijeme plošného zdroje záření, jako například vysoce svítivou LED, nutně musíme počítat s možností více cestního šíření svazku vlivem jeho odrazu na stěnách místnosti a také odrazu na vybavení místnosti (skříně, stoly atp.). Vzhledem k tomu, že jde o problém úzce s tématem související, nastíním zde několik modelových situací a výsledků simulací vlivu na parametry spoje.

Pro komunikaci v rámci budov, je pro nás rozhodující zpoždění signálu, objem přenositelných dat (kapacita spoje) a spolehlivost spoje. Z tohoto hlediska byla vypracována metoda určující impulsní odezvu pro OBS, s jedním nebo více přijímači resp. vysílači, sloužící k ohodnocení spoje. Z hlediska místnosti pak její velikost a objem překážek a případná existence přímé cesty šíření bez odrazů a skoků. Pro testování byla zvolena místnost o různých rozměrech a s různou koncentrací překážek viz. níže. Pro šíření optických vln většina povrchů stěn a prostředí, vzhledem k tomu že jsou matná, způsobuje výrazné omezení při šíření světla. Ve většině případů dochází k tzv. difuznímu (paprsek se vlivem nerovnoměrnosti povrchu odráží ve více směrech) odrazu a zřídka k odrazu spekulárnímu (paprsek se odráží pod zrcadlovým úhlem dopadu). [21]

Speciálně pro simulaci chování OBS uvnitř budov, byl vytvořen program (v jazyce C využívající prostředí Matlabu) IrSimIt panem Jeffreym B. Carruthersem [22] s implementovanými modely a výpočtovými metodami založenými na konceptu, kde je jeden nebo více vysílačů a několik přijímačů. Níže zmíním důležité parametry projektu

a stručně výpočtové metody v programu používané a na závěr výsledky simulací.

Tedy modely charakterizující vlastnosti přijímačů resp. vysílačů, modely odrazivosti povrchů v uzavřených prostorách a vhodnou metodu pro výpočet impulsní odezvy. Modelování optického bezdrátového přenosového kanálu v případě, že je přijímač a vysílač umístěn uvnitř odrazného prostředí kde, S_j je laserová nebo LED dioda představující zdroj, z níž vystupuje signál $X_j(t)$ kdy je použita intenzitní modulace (IM) o které se budu zmiňovat dále. Dalším krokem je volba počtu a umístění přijímače resp. přijímačů s fotodiodou užívajících přímou detekci (direct detection - DD). Může jít o skupinu přijímačů pospolu jež budou tvořit přijímač s úhlovou diverzitou, ale rovněž může jít o vhodně rozmístěné přijímače pracující společně.

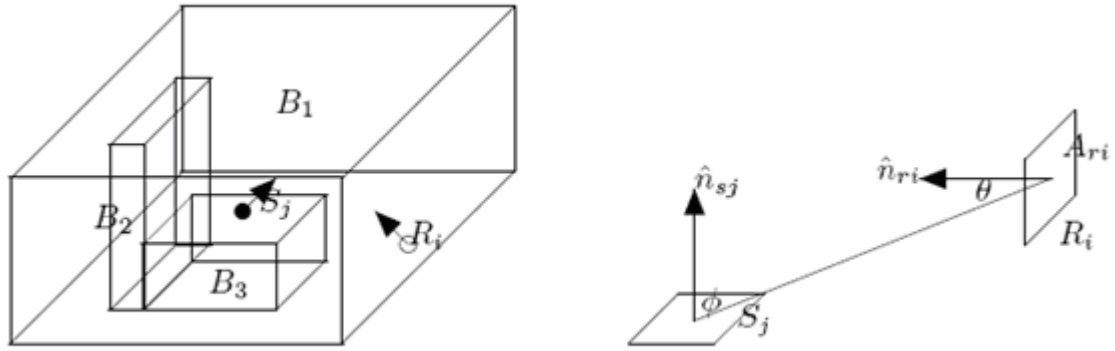
1. Modelování kanálu - signál přijatý přijímačem R_i je-li zdroj S_j je $Y_{ij}(t)$. Vztah 2.31 platí pro spojení mezi jedním přijímačem a jedním vysílačem, kde * značí konvoluci, $h_{ij}(t)$ je impulsní odezva kanálu (trasa zdroj - kanál) a $N_i(t)$ je šum na přijímači. Vztahy 2.36 a 2.37 platí pro více vysílačů resp. více přijímačů.

$$Y_{ij}(t) = rX_j(t) * h_{ij}(t) + N_i(t), \tag{2.35}$$

$$Y_{ij}(t) = \sum_{j=1}^{J} (rX_j(t) * h_{ij}(t)) + N_i(t), \tag{2.36}$$

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{I} \alpha_i Y_{ij}(t - \tau_i). \tag{2.37}$$

2. Modelování zdroje resp. přijímače - zdroj S_j je popsán pozičním vektorem r_{sj} a směrovým vektorem n_{sj}. Přijímač je popsán pozičním vektorem r_{ri} a směrovým vektorem n_{ri} a snímanou oblastí A_{ri} a efektivní snímanou oblastí s incidenčními úhly Θ tedy $A_i(\Theta)=A_{ri}g_i(\Theta)$ kde g_i je funkce optického zisku modelována jako osově symetrická.
3. Prostředí - je modelováno jako jakýsi uzavřený prostor (simuluje např. kancelář) v němž je N_b předmětů (v našem případě pravoúhlých kvádrů) B_{Nb} jak je patrné z obr. 2.19. Všechny zdroje a přijímače jsou tedy umístěny v oblasti B_1 což nám simuluje místnost a jednotlivé další oblasti nám představují vybavení kanceláře. Spolu s tím nám tento model dovoluje zahrnout vše, co se v místnosti může vyskytovat včetně lidí apod. Každá oblast (box) má šest neprůhledných vnitřních a šest vnějších stěn. U B_1 jsou pro nás důležité pouze vnitřní stěny a naopak pro ostatní B_N bereme v úvahu pouze stěny vnější. Každá jedna plocha F_i je modelována jako difuzní odrazná plocha (Lamebrtovská) s odrazivostí ρ_{Fi}. Jednotlivé přijímače/vysílače nejsou zahrnuty a pokud má být model relevantní musíme je doplnit.



a) simulované prostředí b) Zdroj a přijímač

Obr. 2.19: Ukázka formátu simulovaného prostředí, kde B_1 představuje stěny budovy a B_N představuje objekty v místnosti a). Na obr. b) je naznačena poloha vysílač/přijímač spolu se směrovými vektory. [21]

Dalším bodem je pak výpočet impulsní odezvy.

1. Pro ten je potřeba provést rozklad na jednotlivé skoky signálu (každý vyslaný signál, který dopadne na přijímač nesmí překročit stanovený počet odrazů nebo skoků) [21],
2. diskretizace (rozdělení ploch F_i na dílčí elementy N o rozměru $1/P$ x $1/P$ kde P je faktor prostorového rozdělení) a
3. iterace pro více přijímačů.

Metoda výpočtu však není předmětem stávající práce, proto ji pouze akceptuji jako vyslovenou skutečnost a přejdu přímo k výsledkům simulací. [21]

Pro program a rychlost výpočtu je určující a) počet uvažovaných skoků M, b) počet předmětů v místnosti N, c) počet uvažovaných přijímačů I. Z mého pohledu však rychlost výpočtu není důležitá, proto se vlivem jednotlivých zmíněných faktorů nebudu zabývat. Naproti tomu nás však budou zajímat výsledky odezvy kanálu na impuls pro různé variace velikosti místnosti, umístění přijímačů resp. vysílačů a jejich orientace aj.

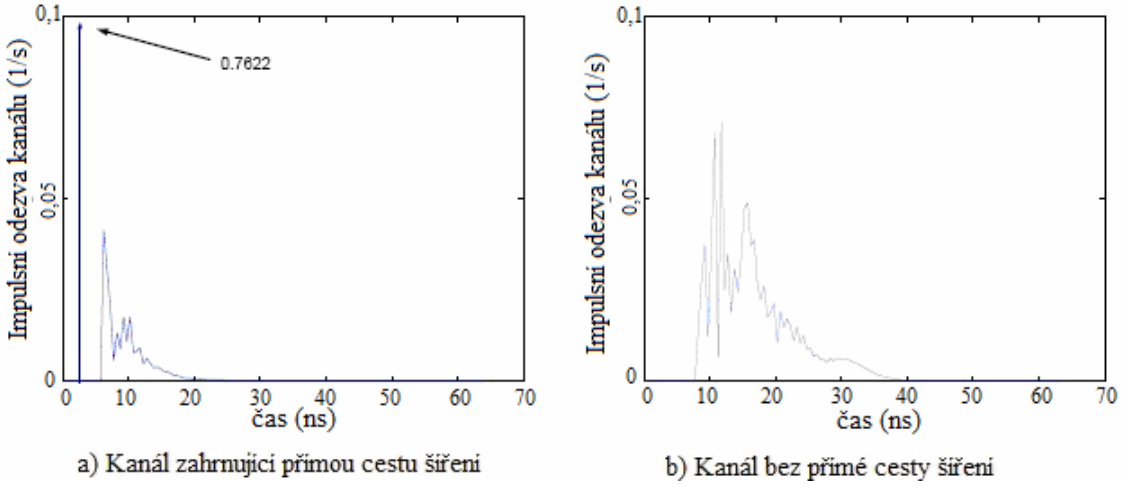
Konfigurace

Nejprve si tedy stanovíme parametry, při jakých jsou výpočty prováděny. Byly uvažovány různě veliké místnosti od kanceláří po velké haly. Vysílače jsou rozmístěny v pravidelných intervalech každé 2m v x-ové ose a ve výšce 1,2 a 3m v ose y. Přijímačů je deset a jsou rovnoměrně rozmístěny po domnělé kouli o průměru D_{ij} centrované u vysílače. Odrazivost stěn je 0,9 dále odrazivost stropu je 0,8 a odrazivost podlahy je 0,2 což odpovídá převážně bílé klasické místnosti. Spolu s přibývajícím vybavením v místnosti budou hodnoty odrazivosti klesat.

Dalším parametrem, který je ještě potřeba definovat pro přijímač je zorné pole (FOV - field of view) to je $\pi/2$ a efektivní snímaná oblast $A_{ri}=10^{-4}$ m^2. Úhel natočení přijímače resp. vysílače je určen dvěmi náhodnými proměnnými elevací a azimutem. Pro každý jeden vysílač je pak simulováno deset různých úhlů. Azimut je rovnoměrně měnící se proměnnou v intervalu $<0,2\pi>$ a kosinus elevace je rovněž rovnoměrně se měnící proměnná v intervalu <0,1>. Dále je zajištěno, aby byl každý vysílač uvažován uvnitř místnosti a aby nedošlo k situaci, kdy bude natočen proti zdi.

Vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem D_{ij} je přímo závislá na velikosti místnosti. V první simulaci uvažujeme pouze dva skoky a holou místnost. V tomto případě budou získaná data zahrnovat šíření přímé, s jedním odrazem a posléze se dvěma odrazy. V případě, že jde o prázdnou místnost tak každá soustava přijímač-vysílač bude přenášet nějakou energii tedy nedojde k situaci, že vlivem zarušení viditelnosti na přijímači nedetekujeme signál. Po vyhodnocení impulsní odezvy kanálu obdržíme jednak parametr zisk kanálu ale také střední hodnotu (RMS) rozptylu dob zpoždění tyto dva parametry jsou dostačující pro modelování difuzního optického bezkabelového kanálu.

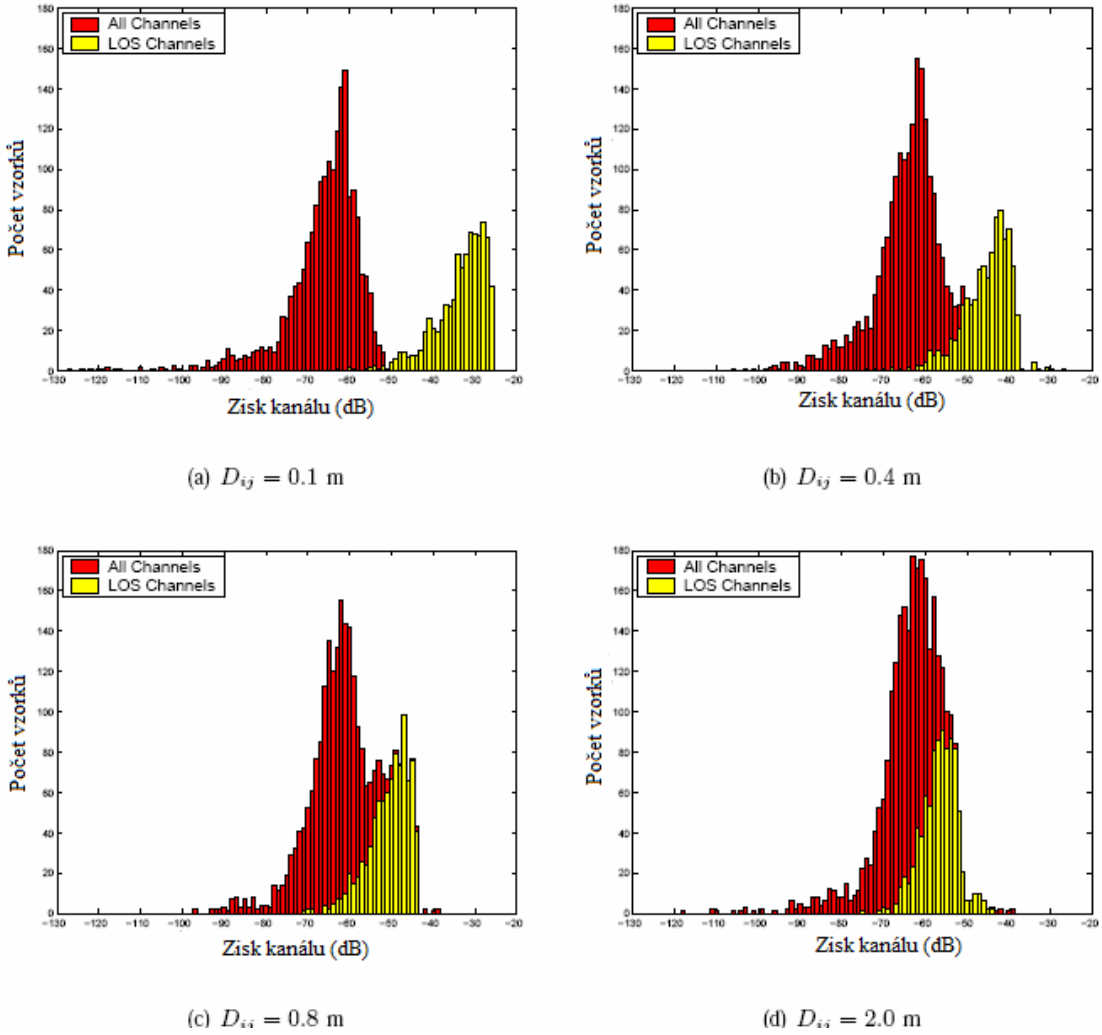
Na 2.20 jsou pak impulsní odezvy pro kanál s přímou viditelností a kanál bez přímé viditelnosti. Zde konkrétně pro vzdálenost přijímač-vysílač $D_{ij}=0,8m$ a místnost o velikosti $4x4\ m^2$.



Obr. 2.20: Impulsní odezva pro kanál a) s přímou cestou šíření, b) bez přímé cesty šíření. Při D_{ij}=0,8 a rozměrech místnosti 4x4 m^2. [21]

Zisk kanálu

Zisk kanálu je definován jako poměr mezi přijatou a vyslanou energií a je udáván v dB. Tedy ohodnocuje kanál po stránce ztrát při přenosu. Jde o jeden z nejdůležitějších parametrů kanálu, jelikož nám určuje dosažitelný poměr SNR (signal to noise ratio) o kterém se spolu s BER budu ještě zmiňovat dále. Na obr. 2.21 je ukázka zjištěného typického rozdělení při použití IrSimIt. Jde o data spočtená pro místnost 4x4 m^2 pro místnosti jiných velikostí jsou pak výsledky velice podobné jak je z obr. 2.20 vidět. Při analýze byla týmem J. B. Carrutherse [21] vyřčena domněnka, že dvě odlišné křivky (histogramy) které můžeme pozorovat jsou pravděpodobně důsledek přítomnosti přímé viditelnosti (LOS - line of sight) v kanálu. S rostoucí vzdáleností mezi přijímačem a vysílačem D_{ij} je z obr. 2.21 patrné splynutí histogramu zisku kanálu s přímou viditelností s histogramem kanálů nedisponujících trasou přímé viditelnosti.

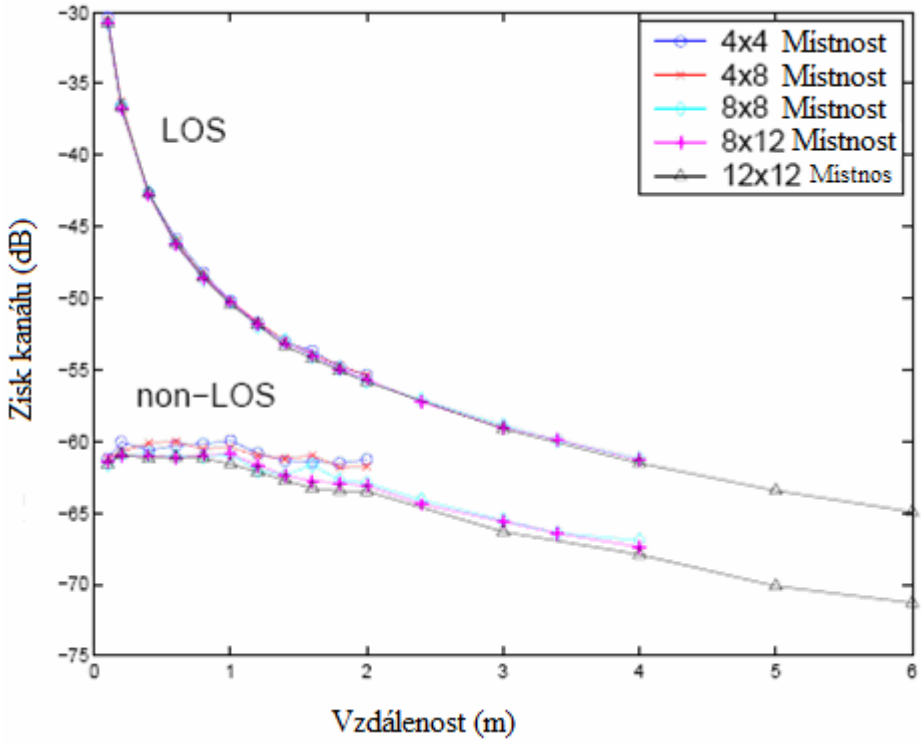


Obr. 2.21: Histogramy zisků kanálu (dB) v závislosti na vzdálenosti vysílač-přijímač. Pro místnost 4x4 m^2 a kanál s i bez přímé cesty. [21]

Zisk kanálu (dB) odpovídá přijaté energii dBW při přenosu energie 1W.

Místnost bez překážek

Dále pak z obr. 2.22 můžeme ohodnotit zisk kanálu v závislosti na vzdálenosti vysílač-přijímač D_{ij} a na situaci kdy má kanál trasu s přímou viditelností (LOS) a kdy ne. Z výsledků pro různě veliké místnosti vyplývá pokles zisku kanálu v poměru ke kvadrátu vzdálenosti D_{ij}^2. Kanál s přímou viditelností vykazuje mnohem vyšší hodnoty zisku než kanál bez přímé viditelnosti a to obzvláště pro krátké vzdálenosti což je dáno přímým šířením signálu. A rovněž je patrná jen malá závislost zisku kanálu bez přímé viditelnosti na D_{ij}^2 a to především pro malé vzdálenosti což je pravděpodobně důsledek skutečnosti, že signál se nutně musí šířit skoky, takže přímá vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem je irelevantní. Pro vzdálenosti větší než 2m je rozdíl mezi oběma kanály pouze 7dB.



Obr. 2.22: Závislost zisku kanálu na vzdálenosti *Dij* pro různě velké místnosti. [21]

Za povšimnutí ještě stojí skutečnost, že velikost místnosti není pro zisk jediným určujícím faktorem z hlediska rozměrů. Z grafu je, jak bylo již řečeno, patrná závislost na velikosti místnosti, kdy menší místnost vykazuje lepší vlastnosti, jelikož paprsek nemusí urazit takovou vzdálenost, nicméně je rovněž patrný vliv rozměru nejmenší stěny v místnosti na tuto závislost. Například místnost o rozměru 4x4 a 4x8 m^2 mají průběhy takřka identické z čehož plyne, že zisk kanálu je závislý na nejmenším rozměru stěny místnosti bez ohledu na celkovou velikost.

Rovněž je pro kanál bez LOS patrný rozdíl 1-2 dB pro vzdálenosti D_{ij} <0,1 - 0,2m> což je způsobeno stíněním vlastního vysílače na malé vzdálenosti. Tím se rozumí sitace kdy úhel divergence svazku resp. oblast jakou vysílač pokryje je menší než taková, která by byla potřebná k zajištění přijmu na přijímači. Jinými slovy přijímač leží ve vysílacím stínu, kde nedopadá přenosový svazek.

Více cestní šíření a rozptyl dob zpoždění

Kromě zisku kanálu nás zajímá ještě tzv. střední hodnota rozptylu dob zpoždění. Obzvlášť důležitý je tento faktor pro velké objemy dat. [21]

Př.: Jestliže platí, že S = 0,2/R, kde R je rychlost přenosu dat a power penalty (jde o výkon potřebný k překonáni negativních vlivů jako je mezisymbolová interference, odrazu a šumu) je 2dB pro zkoumaný kanál. Tak pro R=50 Mbit/s je rozptyl doby zpoždění 4 ns a tedy i opačně rozptyl zpoždění o velikosti 4ns nám při přenosové rychlosti 50 Mbit/s způsobí power penalties 2 dB.

Tato doba je zásadní pro systémy s úzkými pulsy, jakými je například PPM modulace. Tyto jsou velice citlivé na právě rozptyl zpoždění a vícecestné šíření způsobuje značné problémy. Pokud tedy očekáváme (a v IN-DOOR spojích ano), že se

signál nebude šířit pouze přímou cestou, je lepší volit modulace na tento jev nenáchylné. Často se používá například OOK modulace (on-off keying což je zjednodušená forma ASK amplitude shift keying) a aktuálně se experimentuje s použitím vícestavové modulace. Tato problematika bude předmětem dalších kapitol.

Pro výpočet střední hodnoty rozptylu zpoždění je použita impulsní odezva *h(t)* a platí vztah:

$$S = \left[\frac{\sum (t-\mu)^2 h^2(t)}{\sum h^2(t)} \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{2.38}$$

kde μ je průměrné zpoždění spočtené jako:

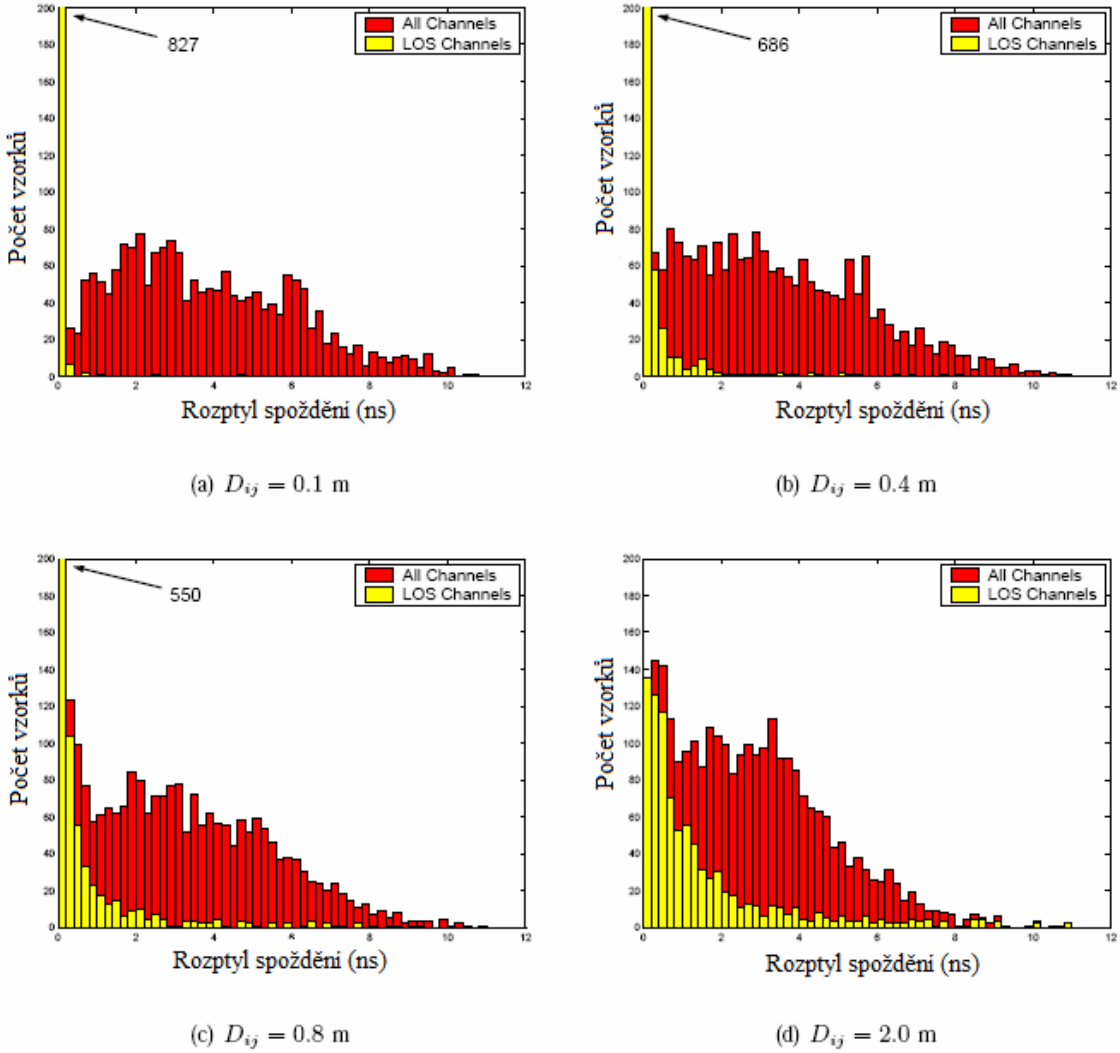
$$\mu = \left(\frac{\sum t h^2(t)}{\sum h^2(t)} \right). \tag{2.39}$$

Výsledky z programu IrSimIt jsou reprezentovány na obr. 2.23 představující střední hodnotu rozptylu zpoždění. Rozměry místností jsou stejné jako v předchozím případě a vzdálenost vysílač-přijímač je uvedená u každého histogramu. Z histogramů je patrné, že pro kanál s přímou cestou šíření jsou dominantní velice malé rozptyly například pro D_{ij} = 0,1m je doba rozptylu okolo 0,03 ns nezávisle na velikosti místnosti. Toto je důsledkem faktu, že na tak malou vzdálenost je signál přijatý přímou cestou natolik silný a dominantní, že se přídavné signály dalších skoků jeví jako nulové. Avšak s rostoucí vzdáleností D_{ij} se podíl energie přijaté přímou cestou snižuje a vliv vícecestného šíření roste.

Jasně patrný je vliv více cestního šíření pro přenos signálu při absenci přímé cesty, kde hodnoty rozptylu jsou značně větší a spadají do intervalu <1-7 ns>, kde a průměrná doba je o 4-5 ns vyšší než pro kanál s přímou viditelností. V histogramu pro kanály bez přímé viditelnosti se nejčastěji vyskytují hodnoty rozptylu v intervalu <2-5 ns>, které představují až 60% všech vzorků.

Místnost s překážkami

V případě výše, jsme uvažovali místnost bez jakýchkoliv překážek nebo předmětů, kde zisk kanálu byl větší pro přímé spoje. Nyní budeme shodný postup aplikovat na prostory, jejichž vnitřní oblast do jisté míry vyplní překážky představující například vybavení kanceláře apod. Mějme tedy místnost 4x4 m^2 s nábytkem jako je vyobrazeno na obr. 2.24.



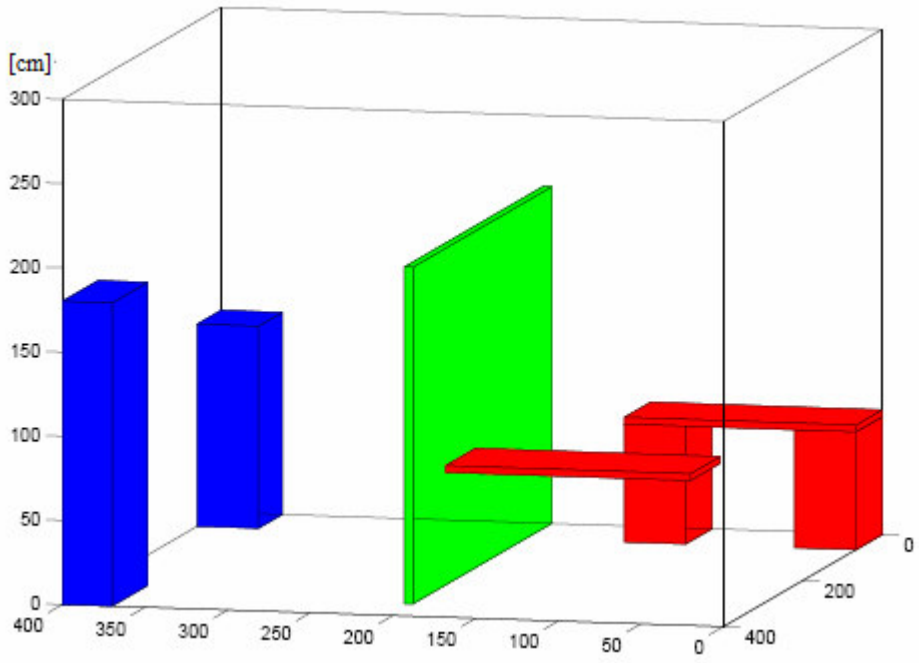
(a) $D_{ij} = 0.1$ m

(b) $D_{ij} = 0.4$ m

(c) $D_{ij} = 0.8$ m

(d) $D_{ij} = 2.0$ m

Obr. 2.23 Histogramy střední hodnoty rozptylu zpoždění v místnosti o výměru 4x4 m^2 pro různé vzdáleností D_{ij}. [21]

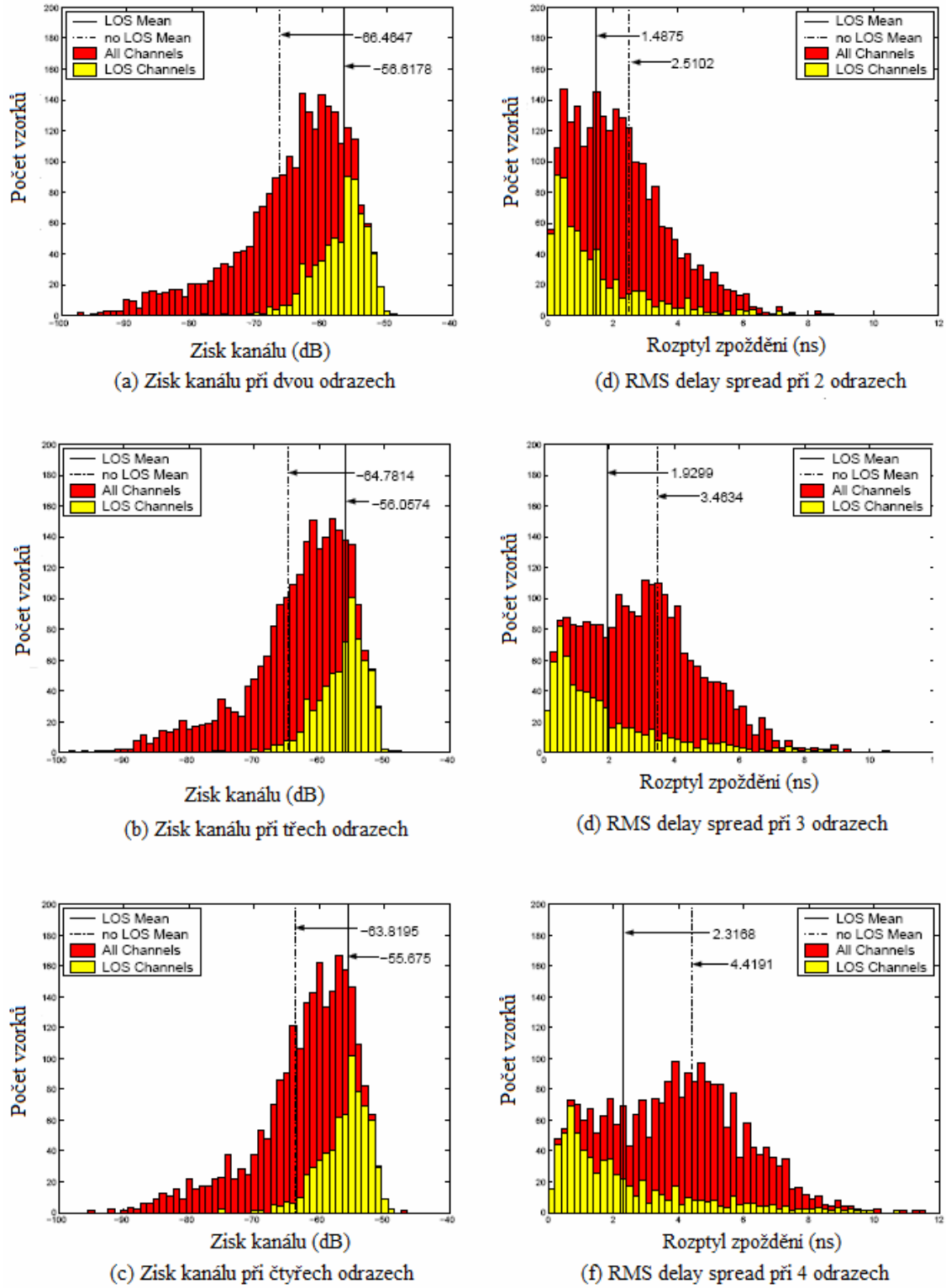


Obr. 2.24: Model kanceláře o rozměrech 4x4 m^2 včetně nábytku. [21]

Výsledkem tohoto měření je soubor histogramů na obr. 2.25 reprezentující 2700 vzorků naměřených v průběhu jedné hodiny. Z výsledků vyplývá, že při zvětšení počtu skoků se pro oba, LOS i non-LOS, kanály zvýší zisk kanálu avšak nepatrně. Pro kanál bez přímé viditelnosti znamená zvýšení počtu skoků ze 2 na 4 nárůst zisku o 2,5dB pro kanál s přímou viditelností pak je tento nárůst pouze 1dB.

Definice střední hodnoty rozptylu zpoždění. V praxi se toto zpoždění měří, abychom byli schopni ohodnotit kanál z hlediska více cestního šíření. Jde o zpoždění mezi prvním na detektoru přijatém signálu (zpravidla signál šířící se přímou cestou) a poslední přijatou částí signálu šířícího se více cestně. [7] [23]

Kromě změny zisku kanálu je patrná i změna střední hodnoty rozptylu zpoždění, jež při zvýšení počtu skoků z 2 na 4 vzroste až o 70% pro kanál bez přímé cesty šíření a pro přenos trasou s přímou viditelností při uplatnění více skoků vzroste zpoždění o 60% což je důsledkem nárůstu přijaté energie vlivem právě oněch skoků navíc. Po zhodnocení grafu a jejich vzájemném srovnání pro případ kdy v místnosti není přítomen nábytek (obr. 2.20) a v opačném případě kdy místnost je běžně vybavená (2.24), dojdeme závěru, že pro místnost bez nábytku bude až 31% kanálů s přímou cestou šíření a ve chvíli kdy zahrneme do simulací i nábytek toto číslo klesne na 25%. To plyne ze skutečnosti, že pro kanály s přímou cestou v zastavěné místnosti roste pravděpodobnost přítomnosti objektu blízkého vysílači, který může způsobit rozptyl vysílaného záření. Což vzhledem k výše zmíněnému způsobí nárůst rozptylu dob zpoždění. Přibudou-li při šíření další skoky a šířený paprsek bude nucen zasáhnout několik různých objektů, aby dosáhl přijímače, dojde k nárůstu střední hodnoty rozptylu zpoždění.



Obr. 2.25: Histogramy zisků kanálů a střední hodnoty rozptylu pro místnost 4x4 m^2, konstantní vzdálenost D_{ij}=2m a s přítomností nábytku v místnosti. [21]

3 IN-DOOR OPTICKÉ SPOJE

Spolu s IN-DOOR optickými spoji a jejich praktickým návrhem a využitím se v poslední době uvažuje jako velice schůdná alternativa použití viditelného světla. Konkrétně bílého světla, jehož zdrojem jsou uvažovány LED diody. Princip je velice jednoduchý a praktický zároveň. V dnešní době se stále častěji používají LED diody jako zdroj světla a to velice výhodný jak po stránce ekonomické, tak z hlediska konstrukce, životnosti a provozu.

Spolu s využitím LED diod jako zdroje světla se nám otevírá možnost využití takto koncipovaných a vhodně navržených světel, zároveň jako zdrojů záření pro optickou komunikaci. Touto myšlenkou se prakticky začali zabývat například pánové Toshihiko Komine a Masao Nakagawa z Keio University [33], kterým se povedlo zprovoznit takto koncipovaný optický spoj byť s parametry na dnešní dobu zcela nemyslitelnými pro praktické využití. Myšlenku dále rozvinuli a prohloubili např. Wang Rui a jeho kolegové [32], kterými vytvořené spoje již svou kvalitou a parametry jsou schopny pokrýt nároky i z uživatelského hlediska. V této krátké kapitole tedy shrnu poznatky, postupy a způsoby řešení ON-DOOR optické komunikace za pomocí využití viditelného světla, jehož zdrojem jsou LED diody. Jde o shrnutí práce výše zmíněných vědců a nejen jejich, z jejichž postupů bych rád odvodil vlastní návrh spoje, jehož parametry bych studoval při zatížení běžnými okolními vlivy, jak jsou popsány již výše.

3.1 Koncepce spoje

Výhody LED diod jako zdrojů světla pro běžné užití jsou známy již několik let a to především v oblasti automobilového průmyslu. V poslední době se, jak jsem již podotkl, stále častěji využívá LED diod jako zdrojů světla pro běžné užití v domácnostech, kancelářích, ale i venkovních a jiných prostorách. Jejich zásadní výhodou pro využití v oblasti komunikačních technologií, je možnost modulace a bude-li modulace dostatečná pak dosáhneme parametrů, jež nám umožní spolehlivý přenos informace bez toho, aby lidské oko tuto modulaci (blikání uvažujeme-li klasickou ON-OFF modulaci) vůbec zaznamenalo a bylo jí nějak ovlivněno. Další výhoda použití světla jako nosného média vychází spíše z jeho nevýhody, kterou je neprostupnost světla pevnými (vyjma sklo a podobné). To spoje omezuje k použití pouze v rámci jedné místnosti (pro daný vysílač/přijímač) nicméně na druhou stranu to zároveň poskytuje ochranu proti interferencím s jinými buňkami sítě a naslouchání, které je tak často kladeno jako výrazná nevýhoda bezdrátových Wi-Fi sítí. Další z výhod použití LED diod v oblasti viditelného spektra je šířka spektrální čáry a tím značně zanedbatelný vliv interferencí v rámci dané buňky. Což značně zjednodušuje celou koncepci a potřebu tento jev eliminovat.

Je nutné si však uvědomit, že vyžadujeme-li obousměrný provoz a to ve většině případů vyžadujeme, pak je potřeba informaci nejen přijímat ze zdroje, jimž by v tomto konkrétním případě mohlo být například stropní světlo osazené LED diodami, které má již v dnešní době v nabídce řada firem zabývající se osvětlením, ale zároveň i vysílat. Tato potřeba je však limitována negativními vjemy v případě, že bychom chtěli použít stejný způsob přenosu a to za pomocí viditelného světla a zdroje s velkým vyzařovacím

úhlem, jak je tomu v případě stropního zářiče a jak je po technické stránce komentováno níže. Proto se jako mnohem vhodnější, pro UP-Link, jeví použití směrového záření (ne však vysoce směrového), které by mohlo být realizováno například pomoci IR zdroje záření umístěného například na stole u přijímacího zařízení, čímž by byly eliminovány negativní vjemy, jaké by na uživatele bezesporu měl plošný zářič ve viditelném světelném spektru umístěný na pracovním stole nebo v přenosném zařízení (laptopu, PDA apod.). Oblast mobilní komunikace, rozumějme pohyblivý přijímač potažmo vysílač, zde řešit nebudu, nicméně předpokládám, že řešení pro tyto případy bude bez problémů dosažitelné.

Po stránce šíření, jak je již zmiňováno v kap. 2.1.11, uvažujeme-li místnost o velikosti řekněme 5x5 metrů, tedy kancelář, laboratoř a jiné musíme zohlednit vlastnosti použitých materiálů povrchu a jejich barvy. Bíle a IČ světlo které k našemu záměru uvažujeme má z hlediska absorpce a odrazivosti na určitých površích shodné vlastnosti. Černá barva v obou případech působí jako absorbující povrch, světlé povrchy naopak způsobují rozptýlený odraz záření a povrchy opatřené lesklou vrstvou způsobují směrový odraz. Tyto vlastnosti je potřeba si uvědomit a bude třeba provést měření, které ukáže jaký povrch a v jaké barvě je nejvhodnější použít. Samozřejmě však musíme vzít v potaz skutečnost, že ideálních vlastností zpravidla dosaženo nebude vzhledem k tomu, že bude žádoucí spoje používat v již zavedených prostorách a jejich rekonstrukce by spoj značně prodražila a instalace by se stala nepříjemnou a zdlouhavou záležitostí.

Stejně jako skupina vedena Wang Rui [32] i my budeme uvažovat vystavění pokusného spoje složeného ze stropního vysílače potažmo světelné jednotky složené z LED diod zajišťující jednak osvětlení v místnosti a zároveň přenos signálu přivedeného kabelově k vysílači. V páru k tomuto zařízení bude odpovídající detektor a v opačném směru tedy UP-Linku bude použit IR vysílač v páru s odpovídajícím přijímačem umístěným v oblasti stropních zářičů. V jednotlivých částech práce níže se budu stručně zabývat konstrukcí, vlastnostmi a výsledky vysílače (IČ i LED) a rovněž přijímače. Bude provedena potřebná analýza pro sestavení spoje jak po stránce konstrukce spoje tak po stránce přenosového prostředí. Bude uveden vzorový výpočet pro reálnou místnost v rámci fakulty, nicméně pro technické zjednodušení bude spoj realizován v menším měřítku.

3.1.1 Základní požadavky z hlediska osvětlení

Máme-li použít LED diody zároveň jako stropní světlo určené pro osvětlení místnosti, je potřeba aby splňovalo určité normy dané směrnicí ISO, která nám říká, že pro kancelář je vyžadováno osvětlení 300 - 1500lx. V první řadě bude tedy potřeba určit, v jak velké místnosti bude spoj realizován a podle toho dopočítat potřebné rozměry a parametry svítidel. Ke stanovení potřebných parametrů osvětlení jsem využil [34] kde jsou uvedeny orientační výpočty a tabulky pro stanovení potřebných parametrů svítidel aby bylo dosaženo osvětlení, jaké nám udává norma viz. níže.

STANOVENÍ PARAMETRŮ OSVĚTELNÍ

Je potřeba si stanovit požadovanou intenzitu osvětlení v rozmezí 300-1500lx. Pro naše účely budu volit osvětlení *E= 500lx*, což považuji za adekvátní pro místnost ve které se bude pracovat a bude kladen patřičný důraz na dobré světelné podmínky. Níže uvedené výpočty jsou realizovány pro kancelář č. 546 na adrese Purkyňova 118, Brno 612 00. Náčrt půdorysu kanceláře je na obr. D.1.1. Tyto výpočty jsou prováděny s

ohledem na teorii a v praxi bude testovací spoj realizován v menším měřítku viz. kap. 3.2. Jde o informativní a velice zjednodušenou formu výpočtu. V praxi se využívají návrhové programy jako například program Relux [42], který prostřednictvím metody světelného toku zadaných parametrů místnosti a svítidla dopočítá potřebný příkon resp. počet svítidel a jejich výkon optický a rovněž zohlední hygienické požadavky z hlediska rovnoměrnosti osvětlení, udržovacího činitele a podobně to však není předmětem této práce. Níže uvedené výpočty jsou tedy pouze orientační a značně zjednodušené vzhledem k tomu, že nepoužívám žádný běžně vyráběný a normalizovaný světelný zdroj. V programu Relux byla provedena orientační simulace testovacího spoje viz. kap. 3.2.

Vzhledem k charakteru práce, zde uvedu pouze vzorce použité pro výpočet a nebudu zde rozepisovat podrobný postup. V příloze D, je pak uveden orientační výpočet s dosazenými hodnotami.

Tedy osvětlovaná plocha pro půdorys dané kanceláře podle 3.1

$$S = a * b[m^2]. \tag{3.1}$$

Stanovení činitele místnosti

$$m = \frac{a}{h}, \tag{3.2}$$

kde *a [m]* je délka kratší strany místnosti a *h[m]* je výška svítidla nad srovnávací rovinou což je oblast ke které zjišťujeme intenzitu světla např. stůl. Obvykle se používá 0,85m nebo celá výška k zemi [34].

Potřebný měrný výkon osvětlovací soustavy

Je potřeba stanovit charakter místnosti z hlediska světlosti. Rozumějme, zda místnost působí tmavým, středně světlým či světlým vjemem. K tomu nám slouží vzorec 3.3 pro stanovení střední odrazivosti stěn a stropu *K*.

$$K = \left(\frac{\sum K_i * S_i}{\sum S_i} \right) [\%], \tag{3.3}$$

kde K_i je koeficient odrazivosti dané plochy *i* a S_i je plocha dané plochy *i*.

Pro jednotlivé povrchy a materiály jsou zavedeny tabulky [35] a v konečném bodě, jak vidíme na ukázce výpočtu, pro naší místnost získáme koeficient *K[%]*. Podle kterého z tabulek stanovíme, o jaký typ místnosti se jedná a podle typu svítidel, činitele místnosti a střední odrazivosti stanovíme měrný příkon osvětlovací soustavy $P_m[-]$ opět uvedený v tabulkách [34]

Stanovení informativní hodnoty měrného příkonu osvětlovací soustavy

Tento parametr označený jako *P[W]* nám dá informaci o velikosti příkonu osvětlovací soustavy, aby byl splněn náš požadavek na osvětlení dané místnosti v našem případě *E=500[lx]*.

$$P = P_m * \left(\frac{E}{10\eta} \right) * S \ [\mathrm{W_{el}}], \tag{3.5}$$

kde P_m je měrný příkon soustavy *[-]* viz. výše, E požadovaná osvětlenost *[lx]*, S plocha místnosti *[m^2]* a η měrný výkon použitých světelných zdrojů v našem případě LED diod *[lm/W_{el}]*.

Jako první spočteme jmenovitý příkon LED (jedné):

$$P = U * I[mW]. \tag{3.6}$$

Chceme-li dosazovat hodnoty do vzorce 3.5 tak narazíme na potřebu dosazení měrného výkonu η v jednotkách *[lm/W]* Jak je patrné z jednotky jde o poměr svět. Toku *[lm]* ku elektrickému příkonu *[W]*. Lumen (lm) je fotometrickou veličinou ohodnocující světelný zdroj a z toho plyne že vztah mezi W a lm je přímo závislý na vlnové délce záření tedy z jaké části spektra záření pochází. To však platí pouze pro viditelnou část spektra viz. níže. V případě této diody je parametr η udáván výrobcem a je roven *6 lm/W* viz. tabulka nebo katalogový list na stránkách výrobce [38]. Velice často jsem se, ale setkal s případy kdy hodnota nebyla součásti dokumentace a proto níže zmiňuji postup jak danou hodnotu získat.

Mezi světelným tokem a elektrickým příkonem je přímá úměra. Jestliže tedy platí podle tab. 3.1, že U_F*=3,1 V* a I_F*=20 mA* a *P=U*I* což je *62 mW* pak pro *P=1 W* je výsledná hodnota světelné účinnosti η_{opt}:

$$\eta_{opt} = \frac{P_{1W} . \phi_{typ}}{P_{typ}} = \frac{1.0,32}{0,064} = 5,16[lm/W_{el}]. \tag{3.7}$$

Definice lumenu zní: *1 lumen je definován jako množství světla na 1 steradián vyzářeným bodovým zdrojem o svítivosti 1 candely [7]*.

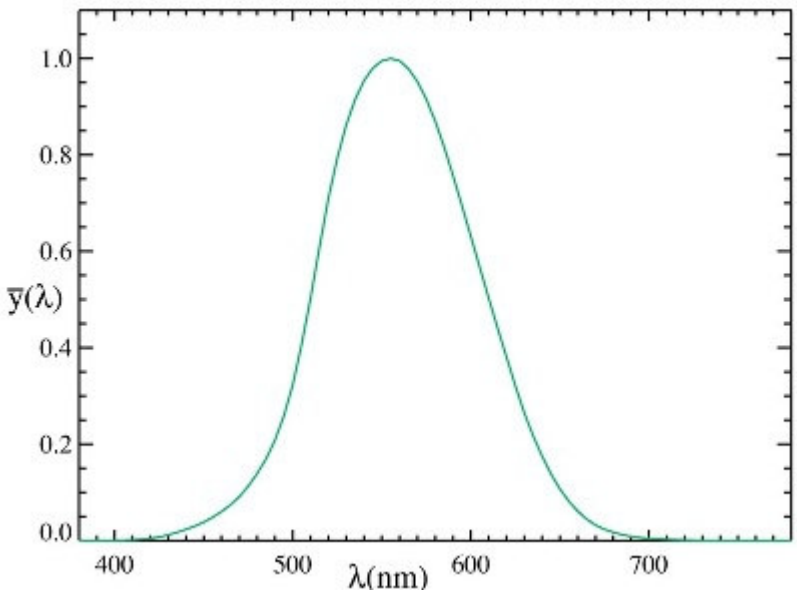
Dále je potřeba si uvědomit vztah mezi opt. watty a lumeny. Zde nám definice říká že: opt. *výkon 1W při vlnové délce λ=555 nm nám dává hodnotu 683 lm.* To však platí pouze právě pro vlnovou délku 555nm tedy:

$$1lm = \frac{1}{683} W \ \text{ při } \lambda = 555nm, \tag{3.8}$$

tedy na sv. tok o velikosti *1 lm* na vlnové délce *λ=555nm* připadá optický výkon P_{opt}*=1,464* mW_{opt}. Potřebujeme-li stejným způsobem ohodnotit světlo jiné vlnové délky, pak vycházíme z funkce "CIE Photopic Spectral Luminous Efficiency" jejíž průběh je na obr. 3.2 a jde o křivku citlivosti lidského oka. Zde pro danou vlnovou délku odečteme koeficient citlivosti oka *y(λ)* např. pro náš případ y=0,6708, viz. 3.10 a křivka obr. 3.1, pak platí:

$$P_{opt} = \frac{1}{683} . \frac{1}{y} = \frac{1}{683} . \frac{1}{0,6708} = 2,182[mW], \tag{3.9}$$

a víme-li, že vybraná LED nám poskytuje sv. tok $\Phi_V=320\ mlm$, viz. tab. D.1.1 tak odpovídající opt. výkon $P_{opt}=0,7\ mW_{opt}$



Obr. 3.1: Graf závislosti citlivosti lidského oka y(λ) na vlnové délce. [7]

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2,898.10^{-3}}{5600} = 517,5[nm]. \tag{3.10}$$

Vlnová délka záření vybrané LED je $\lambda=517,5nm$ což je hodnota kterou jsme získali z Wienova posunovacího zákona [7] viz. vztah 3.8. Z grafu na obr. 3.1 jsem zjistil, že odpovídající koeficient citlivosti je $y=0,6708$.

Dále je potřeba stanovit do vzorce 3.5 parametr P_m což je měrný příkon [-]. Tento je k dispozici v tabulkách [34] a vychází ze znalosti činitele místnosti, který jsme vyčíslili na $m=1,15$ a průměrné odrazivosti ploch v místnosti viz. tab. D.1.2. V této tabulce jsou rozepsány plochy jednotlivých stěn spolu s nábytkem a příslušenstvím kanceláře č. 546 majícím vliv na odrazivost a tím i šíření světla od zdroje. Koeficienty odrazivosti jednotlivých typů ploch jsou rovněž tabelovány [34].

Pro stanovení průměrného koeficientu odrazivosti platí:

$$K = \frac{(\Sigma K_i * S_i)}{\Sigma S_i} = [\%]. \tag{3.11}$$

Nyní máme všechny potřebné hodnoty a dosadíme do 3.5 a získáme hodnotu potřebného příkonu osvětlovací soustavy.

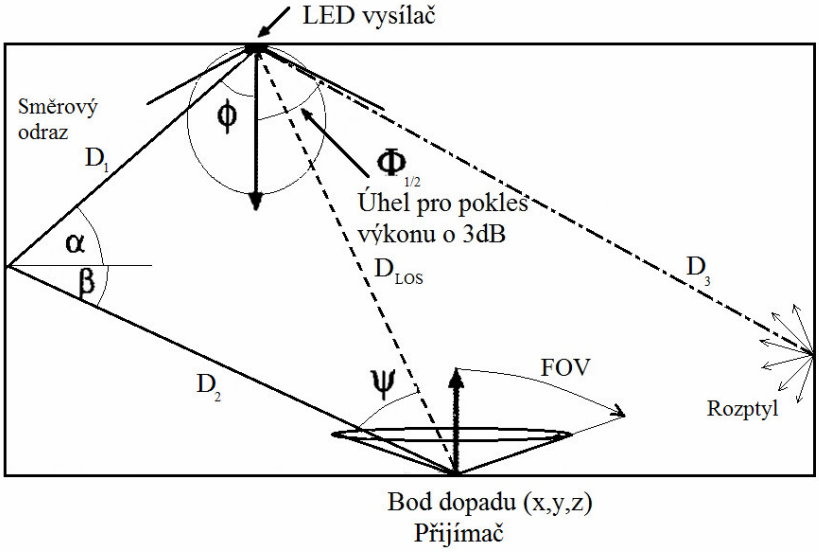
Výše uvedené postupy jsou obecně platné. Jako příklad se nabízí měření kdy vědci výzkumného institutu při společnosti Siemens [37], kteří pro svůj nejnovější pokus na

poli optické bezdrátové komunikace ve viditelném spektru použili LED fy. OSRAM konkrétně z řady produktů Ostar [38], vyznačující se velice vysokou svítivostí. (např. typ LE W E3B má svítivost *14,5*10^6 cd/m^2* a optický výkon *50 lm/W* při *350 mA* a *T=5600 K* (bílá)).

3.1.2 Vysílač down-link (LED)

Máme-li tedy místnost o zadaných parametrech v podobě jejich rozměrů, barvách stěn a obsazení nábytkem jež mají vliv na odrazivost paprsků a jejich šíření jak je zmíněno výše v kap. 3.2.1 a kap. 2.1.11 tak pro vícecestné šíření můžeme ve stručnosti říci, že signál zpravidla k přijímači přichází z více směrů a s různým časovým zpožděním. A to šířením přímou cestou vysílač - přijímač tzv. LOS a šíření odrazem (Diffuse) od různých povrchů, jež jsou v místnosti přítomny a mající na svazek větší či menší vliv.

Naznačení šíření svazku v místnosti je na obr. 3.2. Níže uvedené výpočty jsou brány s ohledem na výpočet osvětlení dopadajícího na jeden konkrétní bod v místnosti ($P_{x,y,z}$) a spočtená hodnota není hodnotou úrovně osvětlení v celé místnosti.



Obr. 3.2: Šíření svazku přímou (LOS) D_{LOS} a odraženou D_1, D_2 (Diffuse) cestou.

Pro kanál LOS [32]:

Předpokládáme-li, že zdroj záření má Lambertovské rozložení, což znamená, že dochází k rovnoměrnému šíření záření ve všech směrech pak lze pro intenzitu záření (zářivost) v určitém úhlu Φ psát:

$$I_i(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} I \cos^m(\phi) \ [\mathrm{W.sr^{-1}}], \tag{3.13}$$

kde I je celkový světelný tok [lm], i je index příslušné LED a m je úroveň Lambertovského záření daná polovičním úhlem vyzařování příslušné LED $\Phi_{1/2}$ viz. tab. 3.1.

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})}. \tag{3.14}$$

Horizontální (Plošné) ozáření L_i [lm/m^2 (lx)] pro určitý bod v místnosti $P_i(x,y,z)$ vzdálený od vysílače d_i pro přímý kanál LOS a pro každou jednu LED s indexem *i* na pozici $P_i(x,y.z)$ je pak:

$$L_i(x, y, z) = \frac{I_i(\phi)\cos(\psi)}{d_i^2(x, y, z)} \ [\text{lm/m}^2], \tag{3.15}$$

kde d_i je vzdálenost mezi zdrojem záření (LED) a plochou na níž záření dopadá, tedy potencionálním přijímačem I_i, je optická intenzita v určitém úhlu záření Φ pro každou jednu LED v soustavě a Ψ je úhel dopadu záření viz. obr . 3.2. Výsledné ozáření dané plochy (bodu) při uvažování přímé cesty šíření (LOS) je pak dáno sumací všech zdrojů záření tedy jednotlivých LED.

Výše uvedené výpočty jsou následně prakticky ukázány pro jednu LED. V praxi, bych si ale dovolil, uvažovat jako hodnotu pro intenzitu záření L_i souhrnnou hodnotu pro jedno svítidlo tedy pro skupinu LED a toto považovat za jeden zdroj a výslední plošné ozáření by bylo dáno sumací dílčích příspěvků jednotlivých svítidel a nikoliv jednotlivých LED.

Příklad:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})} = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos(20))} = 11{,}143.$$

Uvažujme LED viz. tab. D.3.1 kde celkový světelný tok *I=320 mlm*.

$$I_i(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} I \cos^m(\phi) = \frac{12{,}143}{2\pi} 320.10^{-3} \cos^{11{,}143}(9{,}28) = 0{,}5337.$$

$$L_i(x, y, z) = \frac{I_i(\phi)\cos(\psi)}{d_i^2(x, y, z)} = \frac{0{,}53365 * 0{,}986855}{6{,}4668} = 0{,}082[lm/m^2].$$

Dílčí výpočty jednotlivých vzdáleností a úhlů vycházejí z použití elementárních výpočtu pomocí Pythagorovy resp. Sinovy věty na základě obr. 3.2, jež představuje modelovou situaci k výše řešené místnosti, a které zde nebudu uvádět.

Pro kanál odražený (Diffuse)

Pro nepřímé cesty (diffusní) šíření pak pro názornost předpokládejme Labertovskou odraznou plochu (ve všech směrech dochází ke stejnému odrazu toho však dosáhneme pouze v případě černého povrchu tudíž jde pouze o modelový příklad) s činitelem odrazu $\rho=0{,}68$ (viz. kap. 3.1.1). Pak horizontální ozáření označme D_i (diffusní) v bodě P způsobené prvním odrazem od povrchu stěny označeného jako *dA* v okolí místa dopadu na stěnu P_r vyjádříme jako:

$$dD_i = \rho \frac{m+1}{2\pi} \frac{I \cos(\Theta) \cos(\beta) \cos^m(\alpha) \cos(\gamma)}{r_1^2 r_2^2} dA [\ \mathrm{lm/m^2}]. \quad (3.16)$$

Pro celkové ozáření D u nepřímé cesty šíření po prvním odrazu je potřeba provést integraci přes veškerou odraznou plochu a následně sumaci příspěvků všech zdrojů záření *i* podle 3.17.

$$D = \sum_i \int_{wall} dD_i \ [\ \mathrm{W.sr^{-1}}]. \quad (3.17)$$

Příklad:

$$dD_i = \rho \frac{m+1}{2\pi} \frac{I \cos(\Theta) \cos(\beta) \cos^m(\alpha) \cos(\gamma)}{r_1^2 r_2^2} dA =$$

$$= 0,68 \frac{12,143}{2\pi^2} \frac{320.10^{-3} \cos(61) \cos(45) \cos^{11,143}(45) \cos(29)}{2,489^2.1,5443^2} dA =$$

$$= 4.757.10^{-4} dA[lm/m^2],$$

opět dílčí výpočty vycházejí z použití Pythagorovy věty a jiných známých matematických pouček proto je zde neuvádím.

Pro výsledné osvětlení podle ISO normy *E=500 lx* by bylo zapotřebí, při uvažování přímé i odražené cesty šíření (LOS i Difuse), *n≈6000* LED typu LW3333. Jde o hypotetický příklad a v praxi bychom dosáhli lepšího rozložení osvětlení instalací více světelných zdrojů a samozřejmě použitím výkonových LED viz. závěr předchozí kapitoly.

3.1.3 Přijímač Down-link (LED)

Základem pro příjem optických signálů ve viditelném spektru jsou prvky zpracovávající dopadající záření a s určitou účinností jej převádějící na proud (foto proud). Využívá se několik dostupných technologií a mezi prvky patří např. fototranzistory, fotorezistory, fotodiody a jiné.

Optické přijímače se sestávají ze dvou základních částí a to z detektoru a koncentrátoru, kterým může být čočka vhodného tvaru "sbírající" a soustředící dopadající energii co nejvíce do prostoru detektoru. Základními druhy čoček jsou spojky a rozptylky. Přičemž pro tento účel by byla vhodná spojka která mění dopadající svazek na sbíhavý a paprsky se pak protínají v určité vzdálenosti nazývané ohnisko. Základními parametry čočky jsou index lomu (>1) a index absorpce (≈0). Jde o problematiku velice rozsáhlou, kdy na parametry konkrétní čočky pro daný účel jsou kladeny nejvyšší nároky co do čistoty, broušení a skládání proto se zde jimi zabývat nebudu. V tomto případě bychom na čočku kladli vysoké nároky z hlediska všesměrovosti příjmu tedy velkým FOV a všesměrový zisk což je žádoucí zvláště vzhledem k přítomnosti odraženého záření. Vhodná by byla například hemisférická čočka [32]. Zmínka o čočkách používaných v FSO je rovněž v kap. 1.2.1. Často se FD dodávají přímo se zapouzdřenou optikou již od výrobce.

Záleží samozřejmě na λ záření které chceme detekovat a podle toho FD vybíráme. V případě viditelného spektra (VIS) a bílých LED, které emitují světlo v širokém rozsahu vlnových délek je zde možnost použít tu vlnovou délku λ v oblasti které má FD dobrou citlivost. K takové selekci se používají optické filtry. Jde konkrétně o pásmové propusti skládané z několika tenkých dielektrických vrstev zajišťujících propustnost právě λ na které má FD dobrou spektrální odezvu.

Další parametry, které budou mít na převod O/E vliv jsou aktivní plocha FD tedy plocha detektoru řádově v mm^2, zorné pole FD (FOV - field of view) a účinnost konverze O/E udávané v A/W. Toto jsou parametry udávané výrobcem příslušné FD.

Spojíme-li výše zmíněné prvky v jednu soustavu, změníme tak i vlastnosti FD, a pokud soustavu navrhneme dobře, zlepšíme i množství detekovatelného opt. výkonu, jelikož ten je úměrný velikosti aktivní sběrné plochy FD, která je dána 3.18.

$$S_{ef} = \begin{cases} ST_S(\psi)g(\psi)\cos(\psi), & 0 \le \theta \le \psi_C \\ 0, & \theta \ge \psi_C \end{cases} [\mathrm{m}^2], \tag{3.18}$$

kde S je fyzická plocha detektoru (řádově max. desítky mm^2), Ψ je úhel dopadajícího záření na filtr, $T_S(\psi)$ je signálový přenos filtru, $g(\psi)$ je zisk koncentrátoru a Ψ_c je zorné pole koncentrátoru.

Pro přímý kanál (LOS)

Stejně jako máme přímé a odražené dopadající osvětlení popsané v kap. 4.1.2 i z hlediska přenášeného optického výkonu bude na FD dopadat přímé a odražené záření. Z tohoto hlediska je DC zisk příslušného LOS kanálu dán [33]:

$$H(0) = \begin{cases} \dfrac{(m+1)S}{2\pi d_i^2}\cos^m(\phi)T_S(\psi)g(\psi)\cos(\psi), \\ 0 \le \psi \le \Psi_C, \\ 0, \\ \psi \ge \Psi_C, \end{cases} \tag{3.19}$$

kde S je fyzická plocha detektoru, d_i je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem, ψ je úhel dopadu záření na FD, Φ je úhel ozáření po průchodu čočkou, $T_S(\psi)$ je zisk optického filtru a $g(\psi)$ je zisk koncentrátoru a Ψ_c vyjadřuje FOV.

Pro přijatoý optický výkon pak platí 3.20.

$$P_r = H(0).P_t[W]. \tag{3.20}$$

Vzhledem k tomu, že níže popisovaný praktický spoj nebude obsahovat prvky v podobě koncentrátoru atd., nebudu ani zde v teoretickém rozboru uvádět příklad s těmito prvky navzdory tomu, že z hlediska použitelnosti by bylo zřejmě nutné zařadit i tyto prvky a uvažovat je při výpočtech odpovídajících parametrů.

Nepřímý kanál (Diffuse)

Jak jsem již předeslal, cesta šíření signálu bude notně poznamenána odrazy o nejen stěny příslušné místnosti, ale o všechny objekty v ní umístěné včetně pohybujících se lidí a podobně. Proto je potřeba tyto odrazy uvažovat nejen v oblasti osvětlování ale i v oblasti optického spoje. Přijatá energie je tedy dána jak DC ziskem přímé cesty ale i cesty odražené [33] $H_d(0)$ a $H_{diff}(0)$.

$$P_r = \sum^{LED} \left\{ P_t H_d(0) + \int_{stěte} P_t dH_{diff}(0) \right\}. \tag{3.21}$$

Stejně jako pro LOS i pro Diff. kanál platí pro DC zisk po prvním odrazu [33]

$$dH_{diff}(0) = \begin{cases} \dfrac{(m+1)S}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho dS_{diff} \cos^m(\phi)\cos(\alpha), \\ \cos(\beta) T_s(\psi) d(\psi)\cos(\psi), \\ 0 \le \psi \le \Psi_c, \\ 0, \\ \psi \ge \Psi_c, \end{cases} \tag{3.22}$$

Pro svůj záměr jsem zvolil fotodiodu BPW21 [40] viz. parametry tab.3.4.

3.1.4 Shrnutí důležitých parametrů spoje a prostředků pro jeho ohodnocení

ISI – Inter Symbol Interference (mezi symbolové interference)

Vlivem ISI jsou detailně popsány v kap. 2.1.13. Zde pouze shrnu několik poznatků. Při uvažování kanálu znehodnoceného AWGN (aditive white gaussian noise) tedy bílým šumem, se zpravidla projevuje vliv tzv. výstřelkového šumu. [36] Signál je zatížen časově proměnným výstřelkovým šumem, jehož průměrná hodnota je *10^4 až 10^5 fotonů na bit*. V simulacích prováděných na IN-DOOR optických spojích však bylo zjištěno, že nezávisle na intenzitě dopadajícího okolního osvětlení je hodnota výstřelkového šumu v rozmezí *10^7 až 10^8 fotonů/bit* což dává možnost tento zanedbat a uvažovat jej jako Gaussianský proces. [36] V případě velmi malého nebo žádného dopadajícího okolního osvětlení se jako zdroj šumu projeví předzesilovač v přijímači. Což dále řeším použitím LNA (low noise amplifayer) a dalšími nízkošumovými prvky.

Na hodnotu ISI má, v rámci bezdrátové komunikace obecně, značný vliv objem datových toků a FOV jak přijímače, tak vysílače. V případě optického spoje, kdy světlo využíváme zároveň jako zdroj světla a jako nosnou pro informaci se bude tento problém týkat spíše přijímací části vzhledem k velkému vyzařovacímu úhlu vysílače (rozumějme

světla). Hodnota ISI má poměrně zásadní vliv na hodnotu SNR (Signal to Noise Ratio) viz. níže. Shrneme-li poznatky [36], dospějeme k závěru kdy je patrná úměra mezi FOV přijímače, objemem datového toku a poměrem SNR a to taková, že chceme-li dosáhnout definovaného poměru SNR, je potřeba zajistit poměrně malý parametr FOV u přijímače, čímž zároveň dosáhneme vyšších přenosových rychlostí. Avšak pro větší objemy dat by FOV musel klesat k velice malým hodnotám a zde by už nebylo možné zaručit všesměrovost příjmu. Proto se využívá tzv. tracking, který je popisován v úvodu. Jde o systém zaměření, který umožní nízký FOV v řádech jednotek stupňů a tím i výrazně větší přenosové kapacity. Pro příklad v [36] uvažují pro datovou propustnost *200Mb/s* FOV v rozmezí *40* až *60* stupňů při *SNR=13, 6dB* bez použití trackingu. A pro datovou propustnost *10Gb/s FOV = 5 stupňů a SNR=13,6 dB*, avšak s využitím trackingu. Výhoda je tedy zřejmá, nicméně realizace tracking systému není předmětem práce.

Jinými slovy, ISI je jev vznikající na základě časového zpoždění způsobeného mnohacestným šířením signálu. Samotné časové zpoždění je pak dáno právě cestou signálu po různých trajektoriích mezi vysílačem a přijímačem a celková délka zpoždění pak může způsobit, že symbol putující delší trasou doputuje na přijímač s takovým časovým zpožděním, že zasáhne a ovlivní (překryje) následující signál. Je pravidlem, že délka periody jednotlivých symbolů se zkracuje úměrně s rostoucím datovým tokem a tak může nastat situace kdy při vysokých datových tocích, se odražený a zpožděný signál promítne až např. do druhého a dalšího symbolu.

Další způsob jak tento negativní jev co nejlépe ošetřit je zavedení tzv. ochranného intervalu. Tedy časové periody zařazené mezi po sobě jdoucí symboly a umožňující tak snazší potlačení vlivu ISI. Velikost ochranného intervalu se dovíjí od celkové periody signálu. Často se místo nulového ochranného intervalu používá například cyklický prefix (CP), který nese na začátku signálu informaci zkopírovanou z konce odpovídající periody signálu. Velice dobrým příkladem kompromisu mezi přenosovou rychlostí a odolností vůči ISI je např. OFDM využívající řádově tisíce nosných kmitočtů dále modulovaných např. QPSK, čímž dosáhneme rozdělení celkového datového toku na dílčí části na jednotlivých nosných, a tím prodloužíme periodu jednotlivých symbolů jelikož snížíme dílčí přenosovou rychlost a tím odstraníme nebo alespoň omezíme vliv ISI.

V kombinaci s výše zmíněným GI a CP můžeme dosáhnout velice dobrých vlastností s co nejmenším dopadem na přenosové kapacity kanálu. Jen dodám že OFDM využívá vzájemné ortogonality jednotlivých nosných, tedy skutečnosti, že v oblasti maxima každé jedné nosné prochází zbylé nosné nulovou hodnotou (chápáno v časové oblasti). Problematika ISI a volby vhodné modulace, ochranných intervalů a podobně, je poměrně komplexní problém a bylo by potřeba věnovat mu celou kapitolu. Já budu pracovat s myšlenkou, že vzhledem k nízkým přenosovým rychlostem jež budu testovat lze jev ISI dobře zanedbat i vzhledem k výše popsaným skutečnostem, které jsou uvedeny [36] a udávají možnost zanedbat vliv vícecestného šíření s ohledem na intenzitu dopadajícího odraženého signálu.

SNR – Signal to Noise Ratio (poměr signálu ku šumu)

Výše jsem zmiňoval vliv parametrů přijímače na tento parametr. Jde o poměr signálu ku šumu. Tento nám slouží pro ohodnocení kvality spoje. Signál je dán energií přijatého signálu a responsitivitou přijímače podle 3.23 a velikost šumu je dána součtem

šumu tepelného, výstřelkového a velikostí ISI. Obecně se velikost SNR stanovuje tak, aby byla zaručena určitá kvalita spoje a jeho spolehlivost z hlediska chybovosti BER.

$$SNR = \frac{\eta.P_D}{2\hbar.\omega.B_M}[dB], \tag{3.23}$$

kde P_D je dopadající výkon na FD, η je účinnost a B_M je šířka pásma.

BER - Bit Error Rate (četnost výskytu bitových chyb)

Jde o parametr ohodnocující přenos informace, tedy spoj, z hlediska výskytu chybovosti. Tento parametr je dán poměrem chybně přijatých bitů datového toku ku celkovému množství přenesených bitů za specifický interval měření. Obecně platí:

$$BER = \frac{Bit_{chybný}}{R_b.t}[-]. \tag{3.24}$$

Bude-li použita OOK, pak pro BER platí:

$$BER = Q(\sqrt{SNR}), \tag{3.25}$$

kde Q(x) [36]:

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi}\int_x^{\infty} e^{-y^2/2}dy. \tag{3.26}$$

Například pro optické spoje obecně platí, že pro dosažení chybovosti $BER=10^{-6}$, což lze považovat za mezní hodnotu chybovosti pro provoz například hlasových služeb, je potřeba dosáhnout odstupu signálu od šumu *SNR = 13,6 dB*. Obecně se snažíme o co nejlepší poměr SNR a tím o co nejmenší chybovost spoje.

Impulse Response (impulsní odezva)

Dalším důležitým parametrem je impulsní odezva. Tato je diskutována v kap. 2.1.13 poměrně detailně proto zde jen připomenu, že vzhledem k velikosti vysílače a spektrálnímu rozložení výkonu oproti IR vysílačům je vliv vícecestného šíření na impulsní odezvu přijímače zcela zanedbatelný. Po prvním odrazu je impulsní odezva minimální. [33]

Šumy při fotodetekci

Při použití FD je potřeba uvažovat kromě výše zmíněných i šumy, které způsobuje světlo samotné ze své podstaty.

- výstřelkový - způsoben zpravidla temnými proudy viz. výše,
- kvantový - příčinou kvantového šumu je podstat samotného šíření světla a jeho interakce s látkou a je důsledkem fluktuace el. proudu opt. detektoru,

- šum pozadí - světlo dopadající na detektor z okolních zdrojů,
- tepelný šum - nahodilý pohyb elektronů v krystalové mřížce a je závislý na teplotě.

Pro jednotlivé šumy platí vztahy:

$$P_{kvantovy} = 2e.B_M .G_{PD}^2 \left(\frac{e\eta}{\hbar\omega} P_D \right).R_Z \text{ [W]}, \tag{3.27}$$

$$P_{tem.proud} = 2e.B_M .G_{PD}^2 .I_D .R_Z \text{ [W]}, \tag{3.28}$$

$$P_{pozadí} = 2e.B_M .G_{PD}^2 \left(\frac{e\eta}{\hbar\omega} P_B \right).R_Z \text{ [W]}. \tag{3.29}$$

Výstřelkový šum je dán součtem jednotlivých výše zmíněných šumů. Výslednou jednotkou jsou *W*, ale zpravidla používáme decibelovou míru *dB*.

Tyto jednotlivé šumy je potřeba korigovat. Např. šum pozadí nelze eliminovat (pokud neumístíme spoj do uzavřeného prostoru), ale lze jeho negativní dopad omezit zvolením vhodné rozhodovací úrovně a vhodné úrovně zesílení signálu. Popřípadě pomocí filtrů. Změříme referenční hodnotu pro detektor, kdy na něj dopadá pouze okolní záření a vhodně nastavíme jeho parametry.

Zásadnější vliv na kvalitu přijímaného a vyhodnocovaného signálu by však mohly mít přidružené zdroje umělého osvětlení, jako jsou stolní lampy a podobně. Tyto zdroje, vlivem síťové frekvence, "blikají" a tím, že dopadají na přijímač, by způsobily zkreslení požadovaného přijímaného signálu tuto situaci je také potřeba vyřešit a to použitím vhodného filtru, nejlépe pásmovou propustí, který bude navržen pro vysílaný kmitočet. Blíže funkci a návrh filtru popisuji v kapitole věnující s návrhu přijímače.

Další jevy působící optickou vlnu obecně jako např. difrakce, refrakce a podobně, jsou důkladně popsány v rámci celé kap. 2.

3.1.5 Vysílač Up-link (IR)

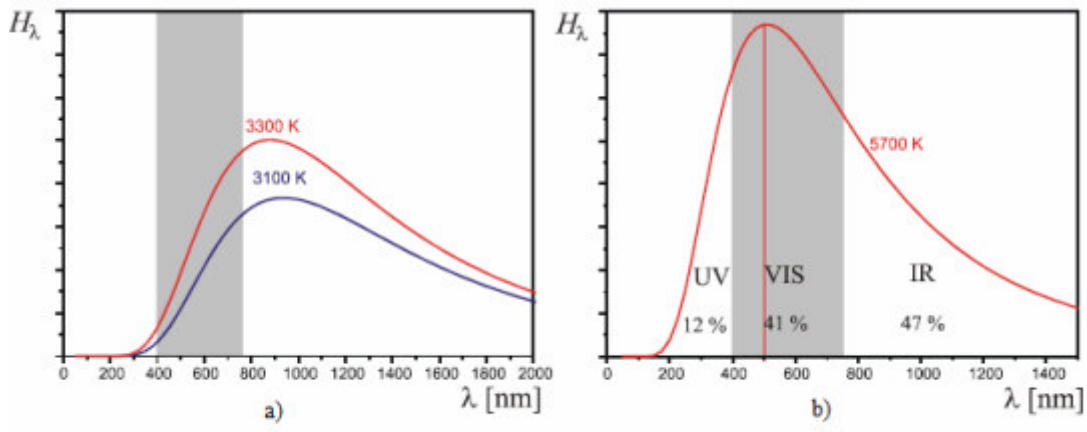
Jak již bylo zmíněno, pro UP-link byla jako vhodnější a přijatelnější zvolena technologie přenosu pomocí IR zářiče. Jako zdroj bude sloužit IR Dioda zářící na vlnové délce λ=875nm výběru typu diody je věnována kap. 3.2.3. V Up-linku se nemusíme zabývat dílčími problémy, jakými bylo osvětlení a podobně proto by realizace po této stránce měla být snazší. Pro příjem IR záření použijeme vhodný fotodetektor (FD). Je však potřeba zvážit některé negativní vlivy a požadavky jaké budeme na spoj mít.

3.1.6 Přijímač Up-link (IR)

Nejprve je potřeba si uvědomit na jakou vzdálenost bude přenos pomocí IR realizován. Důvodem je přímá úměra mezi velikostí přijímaného výkonu a vzdáleností přijímače od zdroje záření. Od diody pak požadujeme co možná největší intenzitu záření $I[W.m^{-2}]$ což se v praxi setkává s hned dvěma zásadními problémy. Prvním je potřeba většího příkonu a tedy větších proudů, což se setkává s problémy obzvlášť u případných mobilních zařízení napájených z baterie, a druhým jsou pak hygienické a bezpečnostní normy. Vzhledem k tomu, že se zde zabývám IN-DOOR optickými spoji nepředpokládám přenos na vzdálenosti desítek metrů nicméně je potřeba spoj vhodně navrhnout proto níže popíši běžně využívané způsoby pro řešení zmíněných problémů.

Abychom dosáhli pokud možno co nejlepšího příjmu, aniž by vysílací část musela mít zbytečně velký výkon. Používají se pro příjem v dané oblasti na dané vlnové délce λ co nejcitlivější přijímací fotodiody. Citlivosti na příslušnou vlnovou délku se dosahuje zapouzdřením diod do speciálních pryskyřicových pouzder, jež zároveň slouží jako filtr a je tak zajištěna selekce přijímaného pásma před vstupem na FD a omezí se tím vliv zdrojů mimo toto požadované přijímané pásmo jako je třeba VIS. Filtry, které se běžně používají, jsou schopny zajistit selekci na určitý kmitočet a kmitočty nižší odfiltrovat. To způsobí příjem na frekvencích odpovídajících vysílané anebo vyšší. Druhým způsobem je zvětšení aktivní plochy FD tedy plochy, na níž záření dopadá a je dále zpracováno diodou.

Důvodem proč přijímáme taková opatření je množství dopadajícího záření na FD z okolních zdrojů, jakými můžou být jiné zdroje umělého osvětlení (žárovky, zářivky,…) nebo přirozené zdroje jakým je například Slunce. Spektrální složení jakéhokoliv záření závisí na mechanismu jeho vzniku. Jakýkoliv světlo-tepelný zdroj má toto spektrum velice široké a k popisu se používá Planckovo rozdělení, je proto třeba selektivně přijímat záření jen na odpovídající vlnové délce. Příklad spektrální hustoty intenzity vyzařování v závislosti na vlnové délce je na obr. 3.3



Obr. 3.3: Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování a) žárovky b) Slunce. Šedě je vyznačena VIS část spektra. [39]

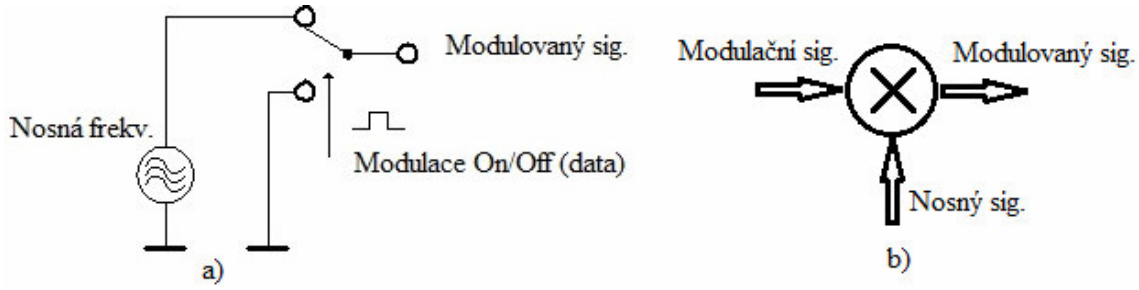
Je tedy jasné, že různé zdroje budou více či méně ovlivňovat záření v IR oblasti. Proto tedy výše přijímaná opatření v podobě filtrů, dostatečných vysílacích výkonů a rozměru

aktivních ploch FD. Rušení v podobě interferencí však nemusí být pouze optického charakteru, stejně negativní vlivy na spoj má i elektromagnetické rušení, jež způsobují modulované výkonové signály v okolí pracovní frekvence přijímače a zdrojem může být například jiný vysílač či vysílač sám nevhodně navržený, zářivky, generátory aj.

V praxi se používají křemíkové FD s integrovaným či externím filtrem a případnou čočkou. Spektrální účinnost křemíkových FD se v oblasti přijímaného spektra blíží 100% a nejtypičtěji bývá 950nm. Nižší vlnové délky jsou potlačeny filtrem a pro vyšší vlnové délky je citlivost diody nižší vlivem spektrální absorpce křemíku a tloušťky aktivní vrstvy. Výběru vhodné FD je věnována kap. 3.2.3

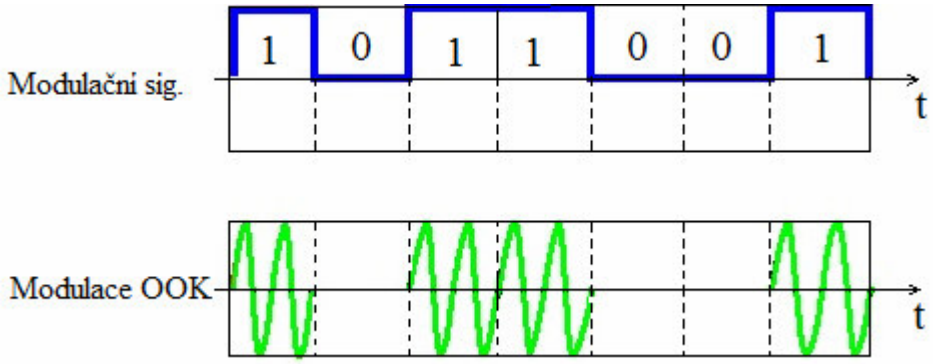
3.1.7 Modulace

Modulace je proces, při němž se snažíme přenášený signál přeložit do jiného než stávajícího pásma. Důvodem může být zamezení rušení od jiných zdrojů v okolí signálů a podobně. Modulátor zpracovává jednoduše řečeno dva signály a to signál nosný a signál modulační tedy např. data. Nosný signál je zpravidla vf. signál s harmonickým průběhem v čase (sin, cos) a značíme jej např. f_c. Tento signál je modulován signálem modulačním f_m tedy naším datovým signálem nebo jinou užitečnou informací kterou chceme přenášet. Výsledkem je pak signál modulovaný. Princip modulace a ON/OFF modulátoru je patrný z obr. 3.4



Obr. 3.4: a) Princip ON-OFF modulátoru. b) Princip ON-OFF modulace

Pro náš záměr se nejlépe hodí zjednodušená verze ASK, kterou je tzv. ON/OFF modulace. Tato se často používá v optických komunikacích (nejčastěji IrDA). Princip tohoto typu modulace je velice jednoduchý a lze si ji představit jako spínač ovládaný modulačním signálem viz. obr. 3.4. Na vstup je přiveden nosný signál v tomto případě vysokofrekvenční harmonický signál f_c a modulační signál, v praxi tedy vysílaná data, je přiveden jako řídící na tento domnělý spínač a podle H/L úrovně modulačního signálu dochází ke spínání resp. rozpínání spínače v rytmu daném modulačním signálem a tedy na výstupu modulátoru buď je anebo není nosná f_c resp. modulovaná nosná. Lze tedy říci, že jde o 100% ASK, kdy amplituda je přenášená buď ve 100% nebo v 0%. Příklad signálu modulovaného ON/OFF modulací je na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Ukázka nosného signálu modulovaného ON-OFF modulací.

3.1.8 Synchronizace

Realizace modulace, by vyžadovala synchronizaci obvodu pro zpětné přeložení signálu tedy demodulátoru. Tato se u OOK modulací provádí například pomocí smyček fázového závěsu tzv. PLL (phase locked loop) tato problematika a dobré odlazení obvodů pro obnovení synchronizace však nejsou součástí záměru testování spoje, proto nebudu minimálně v rámci SP2 modulaci uvažovat a signál bude vysílán přímo z generátoru signálů. Jakási pseudomodulace bude však realizována v případě, že k vysílání použijeme oba vstupy vysílače resp. přijímače, kde jeden bude vstupem datovým a druhý vstupem pro hodinový signál. Princip bude však zjednodušen o použití jednoho referenčního zdroje hodinového signálu jak pro vysílač, tak pro přijímač. Tím nám odpadne nutnost řešení synchronizace.

Další možností jak synchronizace dosáhnout, je využití mikroprocesoru jako zdroj dat resp. prostředku, který data zpracovává a dále posílá. Tuto možnost by nabízelo například sériové rozhraní UART (např. pro linky RS232). Zde je synchronizace zajištěna vložením start resp. stop bitu na začátek resp. konec vysílaného paketu a sjednocení rychlosti komunikace v přijímači a vysílači, kterou je možno nastavit. Zjednoduším-li proces komunikace, lze říci, že data (byte) uložená v registrech se zapíší do vysílacího registru, kde jim je přiřazen start/stop bit. Takto zaopatřená data jsou vyslána na výstupní pin a v přijímači se po detekci start bitu provede zápis do přijímacího registru a po zápisu posledního datového bitu se zkontroluje stop bit a data se při úspěšné kontrole zapíší do bufferu a celý proces se opakuje s dalšími rámci. Je samozřejmě možné využití zabezpečení například pomocí parit atp. a rovněž komunikace je efektivnější vlivem zřetězení vysílání a přijmu, kdy speciální registry umožňují zápis vysílaných resp. přijímaných dat již ve chvíli, kdy stávající byte je stále odesílán. Bližší informace o problematice viz. [45]. Zde ji nebudu detailněji rozebírat, pouze zmíním, že přípravek je osazen potřebnými vývody tak aby bylo možné připojit UART rozhraní při použití další vývojové desky osazené příslušným procesorem a vyvedenými komunikačními rozhraními.

3.1.9 Přenos informace

Samotný přenos informace je žádoucí v obou směrech. Takovýto režim nazýváme takzvaně plně duplexní přenos (Full Duplex - FD). V praxi však nastává problém, využíváme-li pro FD přenos jedno a totéž médium. Zde se jedná světlo a to ať již ve

viditelné nebo IR části spektra.

Vzhledem k samotné podstatě bílého světla zvolených LED diod a jeho spektra, je jasné, že toto bude nežádoucím způsobem ovlivňovat i detektor IR záření z čehož vyplývá, že duplexní provoz by byl poznamenán rušením. Nabízí se tedy několik alternativ řešení.

1. Prvním je použití optických filtrů - toto řešení zajistí možnost použití obou světelných zdrojů pro přenos informace v jeden okamžik a to bez vzájemného ovlivňování.
2. Volba vysoké vlnové délky IR zdroje - tímto zamezíme vzájemného vlivu jednotlivých záření na nežádoucí detektor např. při vlnové délce IR 1350nm se toto na FD pro VIS spektrum již příliš neprojeví, neboť v této oblasti nebude již citlivá a stejně i naopak.
3. Polo Duplexní přenos (Half Duplex - HD) - přenos bude řízen takovým způsobem, aby vysílal, resp. přijímal vždy jen jeden link, tedy v jednom směru.

Řešení optických filtrů a jejich přizpůsobení by zvláště pro VIS bylo značně náročné a rovněž metoda druhá není v tomto případě nejlepší řešení. Obě tyto metody by však bylo vhodné zvážit při realizaci skutečného spoje, kde by HD přenos byl značným omezením a zásadním způsobem by degradoval použitelnost této technologie jako konkurence Wi-Fi a podobných přenosových technologií.

V našich podmínkách a pro testovací účely budu navrhovaný spoj řešit metodou HD. Vyvstává zde však ještě další problém a to je skutečnost, že down-link vysílač funguje zároveň i jako zdroj osvětlení. Lze tedy s jistotou říci, že zde bude neustále přítomna aktivní úroveň signálu, jak vyplývá z navrhovaného řešení v kap. 4.1.2. Navzdory tomu, že signál v případě nepřítomnosti datového toku nebude mít proměnnou frekvenci aktivní resp. pasivní úrovně a jeho vliv na IR přijímač vzhledem k aplikovaným filtrům (horní a doplní propusť) by měl být zanedbatelný resp. žádný, bude tento opatřen obyčejným filtrem v podobě stínítka z dálkového ovládání TV, které by mělo případné nežádoucí dopadající záření dostatečně eliminovat. V praxi by bylo opět vhodnější navrhnout vlastní filtr a dostatečně jej přizpůsobit dané vlnové délce, čímž bychom dosáhli mnohem lepších vlastností.

3.2 Testovací spoj

Vzhledem k omezeným prostorovým možnostem a zároveň z důvodu snazší realizace testovacího spoje budeme tento sestavovat ve výrazně menším měřítku. Po domluvě byl pro spoj vymezen prostor v laboratořích UREL konkrétně v místnosti č. 637 v budově Purkyňova 1.

Po dohodě s vedoucí práce jsme se rozhodli pro jednoduchou "pilotní" koncepci. Spoj nebude jak je popisováno výše připojen přímo na síťové rozhraní čímž odpadá nutnost realizace síťového rozhraní a všech příslušných obvodů. Místo toho využijeme na škole snadno dostupných zařízení v podobě generátoru signálů a osciloskopu. Popřípadě bude k vysílači resp. přijímači připojit vývojové kity osazené mikroprocesorem s vyvedenými bránami (sériový přenos) pomocí příslušných pinů

umístěných i ve vysílači resp. přijímači a vhodně zapojených.

Princip tedy bude takový, že generátor připojíme na vstup LED pole a vysokofrekvenční obdélníkový signál simulující datový tok na lince budeme přivádět přes tranzistor na LED diody, které se budou vysílat na zvolené frekvenci. S ohledem na velikost frekvence tento jev bude lidským okem nepozorovatelný. Ve skutečnosti se koncepce bude velice blížit spoji, jak by mohl vypadat ve skutečných podmínkách neboť pod tímto si lze poměrně snadno představit ON/OFF (tedy zjednodušenou verzi ASK) modulaci kde takovýto signál z eth. rozhraní namodulovaný na vf. signál by v konečném důsledku vypadal stejně jako námi simulovaný signál z generátoru a způsoboval stejné vf. „blikání".

Takto vysílaný signál formou světla emitovaného LED plnící zároveň úlohu zdroje osvětlení bude přijímán na protější straně boxu (v praxi si představme stůl s PC) za pomocí FD. Bude potřeba vyřešit otázku rušení okolními zdroji světla, jakými by mohlo být slunce, jiné zdroj umělého osvětlení a podobně tím se budu zabývat níže v této kapitole. Spolu s FD, na který bude dopadat záření, bude na protějším konci zapojen i osciloskop, který bude sloužit jako přijímač a na němž bude možno provádět kontrolu přijatých dat a porovnávat je s vyslanými a tím vyhodnotit funkčnost nebo případnou nefunkčnost a vysokou chybovost spoje. Vlastnostmi Down-linku jak po elektronické tak po konstrukční a funkční stránce se zabývám v kapitole 3.2.1.

V opačném směru tedy v Up-Linku bude využito IR luminiscenční diody. Důvodů je hned několik, z nichž hlavní již zmíněn byl a je jím absence rušivého vjemu. Zároveň v případě up-linku odpadá nutnost plošného pokrytí prostoru signálem, ale je možné vysílač nasměrovat přibližně na přijímač, jež bude součástí stropního svítidla, v tomto případě LED pole. Pro testovací spoj bude opět využit jako zdroj signálu generátor a na přijímací straně bude osciloskop plnící stejnou funkci jako v předchozím případě. Vlastnostmi Up-linku jak po elektronické tak po konstrukční a funkční stránce se zabývám v kapitole 3.2.2.

Jako alternativa konceptu testování pomocí osciloskopů a generátorů, se nabízí, jak jsem již zmínil, připojení k přípravku vývojových kitů dostupných na škole osazených mikroprocesory s vyvedenými branami a osazenými klávesnicí a LCD displayem. Takto připojený kit na obou stranách spoje nám dá možnost v kombinaci s vhodně napsanou obsluhou pro použité periferie, posílat prostřednictvím spoje jednoduché textové zprávy a funkčnost si tak snadno ověřit na LCD displayi. Další možností je přímo PC.

Ve skutečnosti by bylo potřeba se zabývat mnohými úskalími pro návrh takového spoje pro využití v praxi. Některé problémy a jejich teoretické řešení se snažím nastínit v kap. 3.1. Celý návrh byl průběžně testován pomocí programu PSpice, který sloužil pro simulaci modelových situací s určitými součástkami, na jejichž základě je spoj navržen.

3.2.1 Down-link vysílač (VIS) stanovení parametrů a výběr součástek

Pro spoj jsem vybral výkonovou LED s parametry viz. tab. 3.1 od výrobce *Philips* typ *Luxeon Rebel* konkrétní označení *LXML-PWC1-0050* se světelným tokem *50 lm* při $I_F=0,7\ A$ a $U_F=3,5\ V$. LED září studeným bílým světlem o teplotě *T* okolo *6000 K*. Další důležité parametry viz. tab. 3.1 popřípadě katalogový list na stránkách výrobce Philips [43]. Pro názornost uvažují prostor o rozměrech *100x60x100 cm*. S požadavkem na osvětlení o hodnotě *200lx*. Primárně budu uvažovat čistě bílé stěny bez jakýchkoliv

dalších odrazných ploch nebo jiných materiálů.

Podle postupu z kap. 3.1 si tedy stanovím pro zvolené osvětlení potřebný počet LED, které jsem vybral. Činitel místnosti *m=0,66* dále pak $\Sigma S_i=32000cm^2$, $\Phi K_i=80\%$ a $\Sigma S_i*K_i=2560000$. Pak průměrný koeficient odrazivosti místnosti je *K=80%* což odpovídá světlé místnosti a koeficient *p=50.* Po dosazení do 3.12:

$$P = p.\frac{E_{\max}}{\eta.10}.S = 50.\frac{200}{50.10}0{,}6 = 12[W]. \tag{3.30}$$

Pak počet potřebných zvolených LED *n=12 kusů*. Uvažujeme-li U_F*= 3,2V* a I_F*= 320mA* pak *P=1,02 W*. Výsledek je opět pouze orientační. Provedl jsem simulaci v programu *Relux*, kdy jsem zadal světlo s podobnými parametry, jaké by mohly odpovídat našemu zařízení, a výsledkem bylo osvětlení rovnoměrně rozdělené po celé ploše. Bohužel však nejde o žádné typizované světlo, proto nebylo možné simulaci provést s mými reálnými hodnotami a součástkami, ale pouze orientačně se svítidlem obdobných parametrů.

Stejně jako v případě teoretického spoje jsem provedl výpočet úrovně osvětlení dopadajícího na "stůl" v tomto případě na podložku s přijímačem. Pro testovací spoj bude tedy uvažován box, jak zmiňuji výše. Při uvažování bílého povrchu, odrazivost *ρ=0,8*, stěn a přímé (LOS) i odražené (Diffuse) cesty signálu mezi vysílačem a přijímačem mi podle vzorců 3.13, 3.14, 3.15 vyšly výsledné hodnoty horizontálního osvětlení bodu *Pi(x,y,z)* od zdroje záření viz. níže. Výpočet je orientační a vztahuje se pouze k danému bodu nikoliv jako hodnota úrovně osvětlení v celém prostoru. Pro výpočet je uvažováno celé „svítidlo“v počtu 12 LED jako bodový zdroj tedy jako zdroj vyzařující z jednoho místa a neuvažuji prostorové rozložení svítidla. Pak je-li světelný tok I_F jedné LED roven *50 lm* pak pro 24LED je tento *600 lm* a pak platí po dosazení hodnot uvedených výrobcem:

m=1,

$I_i(\Phi)=181{,}18$ *[lm.sr]; pro* $18{,}44^0$,

$L_i=192$ *[lm/*m^2*] [lx],*

dDi=4,61 dA [lm/m^2*] [lx],*

čímž je splněn požadavek úrovně osvětlení v daném bodě o hodnotě *200lx*. Na obr. C.1.1 v příloze C je změřené spektrum LED. K tomuto měření jsem použil spektrometr Avantes, který je k dispozici v laboratořích .

Zapojení samotného vysílače pro down-link z hlediska elektroniky bude realizováno výše zmíněnými diodami řazenými paralelně v 6 větvích vždy po dvou LED a příslušném odporu R abychom dosáhli odpovídajícího proudu diodou viz. níže a zároveň i potřebného napětí na diodách a na tranzistoru. Diody budou řízeny unipolárním tranzistorem MOSFET. Předpokládaná velikost přiváděného napětí je *U=12 V* a parametry LED viz. tab. 3.1. Velikost zařazeného předřadného rezistoru:

$$R = \frac{\left(U_N - \sum U_{LED}\right)}{I_F} = \frac{(12-3{,}4)}{350.10^{-3}} = 25\ [\Omega], \tag{3.31}$$

obecně platí, že předřadný odpor se do zapojení vkládá pro definování napájecího napětí a proudu LED. Je třeba ale navíc uvažovat napětí U_{DS} požadované tranzistorem aby došlo k otevření, a tento udává výrobce okolo *2 V* viz. příslušné charakteristiky [40]. Uvažujeme-li, navíc tento úbytek napětí pak výsledný odpor R se bude pohybovat okolo *27 Ω* což odpovídá řadě E12. Zároveň bude „gate“ tranzistoru přes diodu spojena s jeho „drain“ vývodem, čímž dosáhneme vždy dostatečného napětí U_{DS} pro otevření. Jak jsem již zmínil, LED pole bude řízeno unipolárním tranzistorem konkrétně modelem IRFZ44N od společnosti Vishay. Jde o unipolární MOSFET tranzistor s N polem nabízený například [40]. Příslušné parametry jsou k dispozici na stránkách výrobce či distributora. Na vstup hradla G bude přiveden signál s amplitudou *5V*, a hradlo G bude zároveň spojeno se svorkou S (source) odporem o velikosti *10 kΩ*, čímž zajistíme zvýšenou odolnost proti statickým výbojům na které je vzhledem k velice slabé vodivostní vrstvě unipolární tranzistor velice náchylný.

Tab.3.1: Parametry LED LXML-PWC1-0050 udávané výrobcem. Kompletní datasheet viz. [42]

Parametr	**Testovací hodnoty**	**Jednotka**	**Poznámka**
Propustný proud I_F	350	mA	max.hodnota=1A
Propustné napětí U_F	3,2	V	typ.hodnota
Spotřeba	1,02	W	maximum
Teplota barvy	6000	K	λ=483nm
Pozorovací úhel	120	deg.	při I_F=350mA
Světelná účinnost	50	lm/W	při I_F=350mA
Světelný tok	50	lm	při I_F=350mA

Vzhledem k tomu, že zapojení bude plnit jak funkci optického vysílače, tak funkci osvětlovací, rozhodl jsem se zařadit do zapojení logické hradlo XOR, které by v součinnosti s například hodinovým signálem mělo zajistit, že i v případě bude-li na datovém vstupu trvale LOG 0, tedy nebudou na vysílač téci data, bude výstupem aktivní úroveň v taktu hodinového signálu, čímž dosáhneme permanentního osvětlení. Nemělo by tedy dojít k situaci, kdy při nevysílaných datech dojde k zániku osvětlení v místnosti. Jediným, avšak velice nepravděpodobným zdrojem takovéto situace by byl případ, kdy by datový zdroj dlouhodobě vysílal stejnou, avšak negovanou posloupnost oproti hodinovému vstupu, kdy by z principu XOR logiky vyplynula LOG 0 na výstupu obvodu. Tato situace je však velice nepravděpodobná zvláště pak z dlouhodobého hlediska. Jako vhodný byl vybrán obvod 74HC86 viz. tab. 3.2, popřípadě katalog prodejce [40], napájený *5 V*. Vstupy logického obvodu budou "hodiny" a datový vstup.

Dalším zařazeným prvkem bude optočlen PC817B resp. HCPL-0501 což je parametricky stejný, avšak rychlejší prvek od společnosti Agilent Technologies [44]. Parametry optočlenu viz. tab. 3.3 popřípadě stránky výrobce. Optočlen uvažuji z důvodu možného nízkého napětí na výstupu XOR, které by nedosahovalo potřebných *5 V* na hradle G. Proto zařadím optočlen s vhodně zvoleným odporem sériově s FD a požadovaným napájecím napětím na svorce kolektoru fototranzistoru, čímž z principu funkce optočlenu získám jednak požadovanou velikost napětí *5V* při aktivní úrovni na výstupu XOR a zároveň obvod galvanicky oddělím a zamezím tak průniku signálu zpět

na vstup resp. na XOR. Zapojení je spolu s DPS uvedeno v příloze A.1, A.3.

Tab. 3.2: Vybrané parametry log. obvodu XOR pro T=25^{0}C. Kompletní parametry viz. [40].

Parametr	Označení	Velikost	Jednotka	Poznámka
Operační napětí	V_{CC}	2 až 6	V	
Vstupní/Výstupní napětí	V_{in}/V_{out}	0 až V_{CC}	V	
Vstupní proud	I_{in}	±20	mA	Na jeden pin
Výstupní proud	I_{out}	±25	mA	Na jeden pin
Minimální vstupní napětí pro H úroveň	V_{IHs}	3,15	V	Při V_{CC}=4,5V
Maximální vstupní napětí pro L úroveň	V_{IL}	1,35	V	Při V_{CC}=4,5V
Minimální výstupní napětí H úroveně	V_{OH}	3,98	V	Při V_{CC}=4,5V
Maximální výstupní napětí L úroveně	V_{OL}	0,1	V	Při V_{CC}=4,5V
Maximální přenosové/přechodové spoždění	t_{PLH}, t_{PHL} / t_{TLH}, t_{THL},	20 / 15	ns	Při V_{CC}=4,5V

Tab. 3.3: Vybrané parametry optočlenu PC817B pro T=25^{0}C. Kompletní parametry viz. [40].

Parametr	Označení	Velikost	Jednotka	Poznámka
Vstupní napětí	U_F	1,2	V	Při I_F=20mA
Temné proudy kolektoru	I_{CE0}	0,1	μA	Při U_{CE}=20V
Výstupní napětí emitor-kolektor	U_{ECout}	6	V	maximální
Výstupní napětí kolektor-emitor	U_{CEout}	60	V	maximální
Výstupní proud kolektorem	I_{Cout}	50	mA	maximální
Doba náběžné/sestupné hrany	t_{rise} / t_{fall}	4 / 3	ns	Při U_{CE}=2V, I_C=2mA, R_L=100Ω
Proudový převod (minimální)	CTR	50	%	Při U_{CE}=2V, I_C=5mA

Vysílač bude připojen na generátor signálů, pomocí kterého budeme simulovat datový tok (0/1). Připojení jak "datového" tak "hodinového" vstupu bude realizováno BNC konektory a díky odporu $R_{Stah.}$ o velikosti cca *1 MΩ* bude možné připojit na vstup *clk* (hodinový) generátor signálů a druhý vstup, datový, ponechat neaktivní popřípadě na něj připojit druhý generátor (byla by zde ovšem potřebná synchronizace) popřípadě další obvod např. s procesorem simulujícím datový tok prostřednictvím např. rozhraní

UART nebo podobným viz kap. modulace.

Zapojení bude dále osazeno napěťovým měničem LF50 CDT, pomocí kterého zaručím přivedení napětí jak 12V z napájecího laboratorního zdroje pro LED diody, tak 5V pro LO a další prvky. Připojení "hodinového" signálu bude navíc oddělitelné pomocí "jumpperů" abych pro poloduplexní provoz zajistil, že hodinový signál nebude přiveden na v tu chvíli nepoužívaný vysílač.

Z koncepčního hlediska bude vysílač pro Down-link resp. přijímač pro Up-link a příslušné řídící obvody osazen na jedné DPS a vysílací část v podobě LED a IR FD bude osazená na druhé DPS připojené k řízení pomocí 5ti žílového kabelu viz. přílohy A.1, A.3.

3.2.2 Down-link přijímač (VIS)

Pro příjem signálu použiji fotodiodu a to konkrétně typ BPW21 [40] s parametry viz. tab. 3.4 nebo na stránkách výrobce. Případně mohu použít alternativu C30822E s parametry tab. 3.5 nebo na stránkách výrobce [48].

Fotodioda je optoelektronickou součástkou založenou na fotoelktrickém jevu, kdy světlo resp. fotony dopadají na aktivní snímací plochu fotodiody, kde se střetává s elektrony ve valenční vrstvě atomu a dojde k předání energie. Po tomto jevu má elektron dostatek energie pro opuštění valenčního pásma a přechod do pásma vodivostního, čímž vzniká volný elektron a tedy volný nosič náboje a volné nosiče náboje vedou ke zvýšení vodivosti polovodiče (FD). Tedy po dopadu světla úměrně jeho množství vzniká tzv. fotoproud. [41]

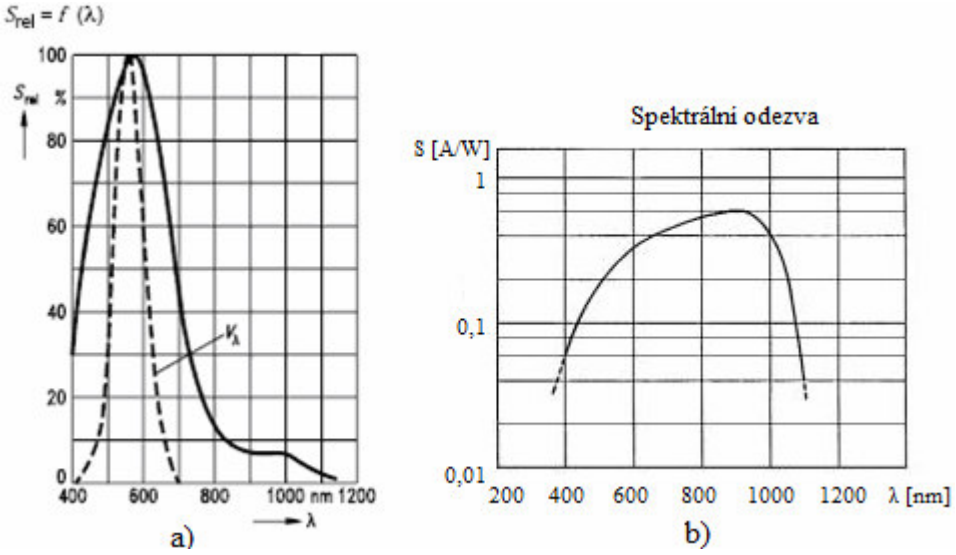
Takto přijatý a převedený signál je potřeba zesílit. Ještě před samotným zesílením je však potřeba zvážit zda intenzita přijatého signálu bude dostatečná a bude-li dostatečně převyšovat intenzitu okolních rušivých vlivů jako např. sluneční svit a podobně. V případě, že bychom FD použili samostatně jako vstup OZ. Tedy fotoproud by byl výstupní veličinou FD a vstupní veličinou OZ, pravděpodobně bychom narazili na problém, kdy by tento byl výrazně zašuměn v okolních signálech. Abychom této nežádoucí možnosti předešli, je vhodné FD napájet a na vstup OZ tak přivádět napětí viz. zapojení v příloze A.2. Takto budeme FD provozovat v tzv. fotovodivostním režimu kdy se součástka chová jako odpor citlivý na úroveň dopadajícího osvětlení.

Tab. 3.4: Vybrané parametry FD BPW21 výrobce Siemens, prodejce [40].

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Závěrné napětí	V_R	10	V
Výkonové ztráty	P_{tot}	250	mW
λ max. sensitivity	$\lambda_{S,max}$	550	nm
Spektrum citlivosti	λ	350-820	nm
Aktivní plocha	S	7,34	mm^2
Temný proud	I_R	2	nA (při V_R=5V)
Sensitivita	S_λ	0,34	A/W
NEP	NEP	$7{,}2x10^{-14}$	W/√Hz
Kvantová účinnost	η	0,80	el./phot.
Náběžná/sestupná hrana	t_r, t_f	1,5	μs (V_r=5V)

Tab. 3.5: Vybrané parametry FD C30822E výrobce PerkinElmer. [48]

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Závěrné napětí	V_R	100	V (max.)
λ max. sensitivity	$\lambda_{S,max}$	900	nm
Spektrum citlivosti	λ	400-1100	nm
Aktivní plocha	S	20	mm^2
Temný proud	I_R	10	nA (při V_R=10V)
Sensitivita	S_λ	0,6	A/W
NEP	NEP	$2x10^{-13}$	W/√Hz
Kvantová účinnost	η	0,83	el./phot.



Obr. 3.6: a) Spektrální sensitivita BPW21 [40]. Spektrální resp. C30822 [48].

Podle zapojení na obr. A.1.3 bude na diodu přivedeno napájecí napětí o velikosti 5V přes odpor R_{nap}, kterým napájecí napětí přizpůsobíme U_R fotodiody. Na vstup OZ bude tedy přivedeno napětí úměrné dopadajícímu světlu na FD a toto je potřeba dostatečně zesílit. Jako vhodné se jeví použití operačního zesilovače R2R OZ ADA4692-2 (napájený nesymetricky) viz. níže. Na jehož vstupu bude z výše zmíněných důvodů horní propust HP na frekvenci *500 Hz* (CR derivační článek). Signál za obvodem HP musíme vhodně upravit, aby na kladný vstup OZ nevstupoval signál symetrický podle nuly, což by způsobila právě HP ze své podstaty principu kondensátoru. Pravděpodobně by takovýto signál způsobil nekorektní chování OZ. Z toho důvodu ještě před přivedením signálu na OZ tento přizvednu na úroveň 2,5V za pomocí napěťového děliče s vhodně zvolenými odpory $R_{1,2}$= *2kΩ* s ohledem na parametry propusti viz. níže.

Vzhledem k tomu, že na FD bude dopadat i okolní záření od okolních zdrojů umělého osvětlení, slunce a podobně. Kde například běžná žárovka, umístěná např. ve

stolní svítilně v blízkosti detektoru, "blikající" s frekvencí *50Hz* by mohla mít negativní vliv na výsledný zpracovávaný signál. Z tohoto důvodu, bude tedy před OZ, zařazena horní propusť (HP) f_0*=500 Hz*. Návrh propusti je popsán níže.

Dále je nutno vzít v úvahu vliv šumů jednotlivých prvků přijímače na zpracovávaný signál, jehož hladina již sama o sobě nebude nikterak výrazná. Proto bude vhodné pro zesílení použít nízkošumový, rail to rail zesilovač. Zvoleným OZ je prvek od Analog Devices [46] typ ADA4692-2 s parametry viz. stánky výrobce. Vzhledem k tomu, že jde o dvojitý OZ využiji druhou část jako komparátor viz. níže. u kterého pro zlepšení rozhodování o dosažení komparační úrovně zlepšíme hysterezí. Nízkošumový zesilovač bude zapojen se zápornou zpětnou vazbou řešenou přes tyristor, kterým bude možno regulovat zesílení v závislosti na intenzitě rušivého pozadí v rozsahu 1-10x (*1kΩ - 10kΩ*). Půjde o neinvertující zapojení, kde navíc v zapojení ZV bude použit pevný odpor *100Ω*, aby nedošlo k situaci, kdy trimr bude nastaven na nulovou hodnotu a proud ze vstupu OZ by se dostal přes ZV na výstup.

Dalším stupněm bude obvod dolní propusti (DP) navržen podle 3.32 pro odpovídající zvolenou frekvenci vysílače. Byla zvažována možnost přeladitelnosti, nicméně z praktického hlediska je vhodnější navrhnout pevnou DP, na dostatečné frekvenci abychom získali dostatečnou šířku přenášeného pásma pro variabilní testování a zároveň zohlednili rychlost LED diod ve vysílači. Popis návrhu jak filtru HP, tak DP je popsán níže.

Filtr HP (RC derivační článek):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}[Hz], \tag{3.32}$$

$$A_U = 20\log\frac{U_{IN}}{U_{OUT}}[dB]. \tag{3.33}$$

Z praktického důvodu je vhodné zvolit nejprve kapacitu použitého kondensátoru z důvodu nižší rozmanitosti možných použitých velikostí kapacity a pro příslušnou hodnotu dopočítat odpovídající odpor. Zvolená zlomová frekvence propustnosti je *500 Hz* při poklesu *-3 dB*.

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C_{zvol}} = \frac{1}{2\pi.500.150.10^{-9}} = 2022[\Omega]. \tag{3.34}$$

Tento dopočítaný odpor nejlépe odpovídá odporu z řady E24 o hodnotě 1k6 [Ω].

FILTR DP (RC integrační článek):

Pro tento platí stejné rovnice, jako pro HP pouze se liší zapojení a dílčí vlastnosti. V tomto případě bude maximální přenášená frekvence f_0*=1MHz*. Z praktického hlediska je vhodnější stanovit hodnotu kapacity a hodnotu odporu dopočíst proto uvažuji kapacitu $C_{zvol.}$*=100 pF*. K takto zvolené kapacitě pak dopočítaná hodnota odporu R:

$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C_{zvol}} = \frac{1}{2\pi.10^6.100*10^{-12}} = 1591{,}6[\Omega]. \tag{3.35}$$

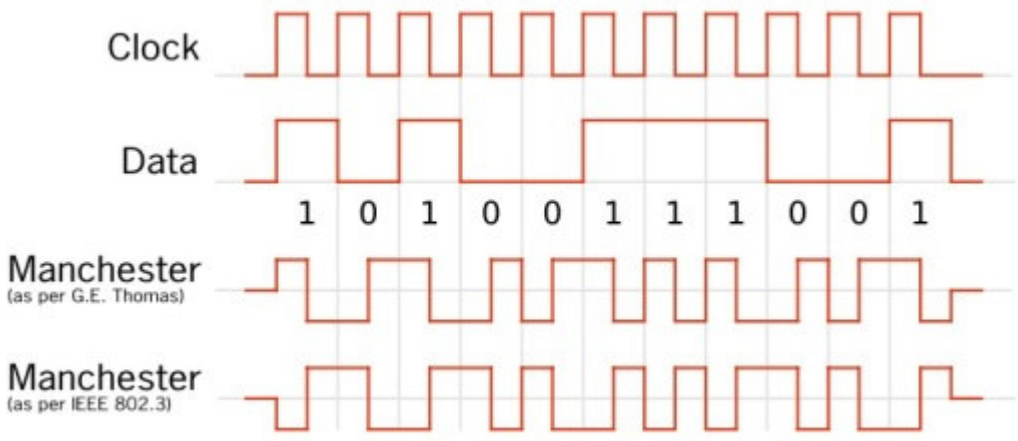
Takto dopočítaný odpor nejlépe odpovídá odporu z řady E24 o hodnotě 2k [Ω]. Tímto máme navrženy filtry pro přijímač ve viditelné části spektra.

Následovat bude komparátor, kde bude porovnáván vstupní signál spolu s napětím z napěťového děliče, který nám dává možnost zvolit rozhodovací úroveň pro vyhodnocení příjmu aktivní úrovně signálu. Na komparační vstup bude přes dělič přiveden signál s úrovní 12V (5V). Dále již pomocí odporu resp. zenerovy didoy upravíme amplitudu signálu na velikost 5V a signál necháme upravit pomocí Schmittova KO typ 7414. Tento zaručí vyhlazení přechodových hran signálu. V případě nutnosti bude použito několikanásobné zapojení Schmittova KO.

Posledním stupněm bude přivedení signálu ze Schmittova KO opět na XOR, kde bude obnovena nesená informace.

Výstup signálu bude vyveden na BNC konektor a zapojen na osciloskop, na němž bude možno sledovat přijatý signál a tento porovnávat se signálem vysílaným a to přímo na osciloskopu pujde-li o dvoukanálový přístroj. Nebo bude možné stejně, jak je popisováno výše u vysílače připojit vhodně osazenou desku s mikroprocesorem a potřebnými periferiemi (LCD, Klávesnice, sériové rozhraní).

Pokud bude při vysílání přítomen i hodinový signál bude přenos defakto zabezpečen jednoduchým linkovým kódem. Hodiny, budou přiváděny s dvojnásobnou frekvencí oproti datovému signálu, což zajistím prostým zapojením s D KO v zapojení děliče kmitočtu 2 a 4. Čímž získám, ze signálu jednoho generátoru, potencionálně 6 signálů pro zapojení přípravku což omezí nutný počet zdrojů signálu. Koncepce kódu Manchaster je patrná z průběhů převzatých z [7] na obr. 3.7.



Obr. 3.7: Ukázka linkového kódu Manchaster. [7]

Zapojení IR vysílače resp. VIS přijímače je v příloze A.2 na obr. A1.3. DPS je v tomto případě řešená oboustrannou variantou viz. příloha A.4 obr. A.1.6 resp. A.1.7.

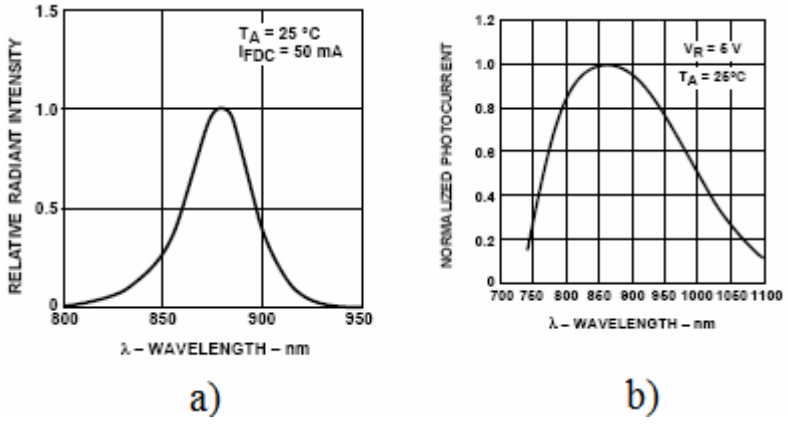
3.2.3 Vysílač a přijímač v IR oblasti

Vzhledem ke shodnému principu funkce vysílání optického signálu v obou použitých částech spektra, bude možné stávající zapojení z kap. 3.2.1 a 3.2.3 pro vysílač a přijímač využít i pro signály v oblasti IR. Změnou bude samozřejmě vysílací a přijímací prvek s patřičnou vlnovou délkou. Zapojení je nakresleno v příloze A.2 na obr. A.1.3 a DPS bude v tomto případě oboustranná varianta viz. příloha A.4 obr. A.1.6 (Top) a A.1.7 (Bottom). Zvolenými prvky budou. Pro vysílací část půjde o IR LED diodu HSDL-4220 od společnosti HP. Vlnová délka vybrané diody je *875 nm* a jde o klasické pouzdro T-$1_{3/4}$. Graf závislosti intenzity záření na vlnové délce je na obr. 3.8 a příslušné parametry vybrané IR LED jsou uvedeny v tab. 3.6 popřípadě na stránkách výrobce [49] resp. prodejce [40]. Diody budou zapojeny v matici 2x2 s příslušným předřadným odporem stejně jako v kap. 3.2.1. jak jsem již řekl, koncepce bude zcela totožná. Lišit se bude pouze vysílací (optická) část a koncepce DPS.

Tab. 3.6: Vybrané parametry HSDL-4220 výrobce HP. [49]

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Propustné napětí	V_F	1,67	V (typ.)
Propustný proud	I_F	100	mA
Vlnová délka	λ	875	nm
Výkonové ztráty	P_{max}	260	mW (max.)
Vyzářený opt. výkon	P_O	38	mW (při IF=100mA)
Zářivost	I_E	76	mW/sr
Šířka pásma	BW	9	MHz
Vyzařovací úhel	$2\Theta_{1/2}$	30	Deg.
Náběžná/sestupná hrana	t_r, t_f	40	ns (IF=50mA)

Pro detekci záření IR LED na *λ=875nm* jsem zvolil FD od společnosti Agilent Technologies [44] konkrétně typ HSDL-5420#011. Jde defakto o párovou součástku, ke zvolené IR LED. Proto lze očekávat dobré parametry při požití těchto součástek v rámci jednoho spoje.



Obr. 3.8: a) graf závislosti intenzity záření na vlnové délce [49], b) graf závislosti normalizovaného fotoproudu na vlnové délce.[44]

Zapojení bude opět totožné jako v případě přijímače pro VIS část spektra pouze s dílčími úpravami v zapojení viz. příloha A.1 obr. A.1.1 resp. A.1.2. DPS bude opět společná pro VIS a IR vysílač resp. přijímač a je v příloze A.3 obr, A.1.4 resp. A.1.5. V tomto případě nejde o oboustrannou DPS ale o dvoudílný přípravek spojený 5-ti žílovým kabelem. Vybrané parametry detektoru jsou v tab. 3.7 a další pak na stránkách výrobce [44]. Na obr. 3.8 je pak graf závislosti citlivost FD na záření různých vlnových délek resp. normalizovaná hodnota fotoproudu v závislosti na λ záření. Z grafů IR LED a IR FD lze očekávat dobrou součinnost vzhledem k tomu že obě zařízení budou pracovat v části spektra pro kterou jsou primárně určena.

Tab. 3.7: Vybrané parametry HSDL-5420#011 výrobce HP. [49]

Parametr	**Symbol**	**Hodnota**	**Jednotka**
Závěrné napětí	V_R	5	V (max.40V)
Výkonové ztráty	P_{tot}	250	mW
λ max. sensitivity	$\lambda_{S,max}$	875	nm
Spektrum citlivosti	λ	770-1000	nm
Aktivní plocha	S	0,15	mm^2
Temný proud	I_R	1	nA (při V_R=5V)
Sensitivita	S_λ	0,5	A/W
NEP	NEP	$7{,}2x10^{-14}$	W/√Hz
Kvantová účinnost	η	0,7	el./phot.
Náběžná/sestupná hrana	t_r, t_f	7,5	μs (V_r=5V, λ=875nm,R_L=1k)
FOV	$2\Theta_{1/2}$	110	Deg.
Šířka pásma	BW	50	MHz (V_r=5V, λ=875nm,R_L=1k)

4 PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

V této kapitole se pokusím co nejpřehledněji shrnout výsledky série měření prováděných na navrženém spoji. Měření bylo prováděno v rámci laboratoří optoelektroniky za použití níže uvedených přístrojů. V grafech zobrazené průběhy byly interpretovány z naměřených hodnot pomocí programu Excel 2003, díky kterému jsou průběhy přehlednější. V některých případech bylo však vhodnější pro názornost využít přímo grafických průběhů vyexportovaných z použitého osciloskopu.

V příloze E je na několika fotografiích ukázáno pracoviště pro ilustraci testovacích podmínek.

4.1 Měření

Zde jsou shrnuty výsledky měření na navržených modulech vysílače a přijímače. Snažil jsem se o co nejvěrohodnější reprezentaci výsledků a pokud možno provést vždy několik měření s odlišným signálem resp. jeho frekvencí nebo například s různou vzdáleností obou modulů a podobně. Mimo jiné jsem otestoval sériový přenos pomocí modulů viz. kap. 4.1.5

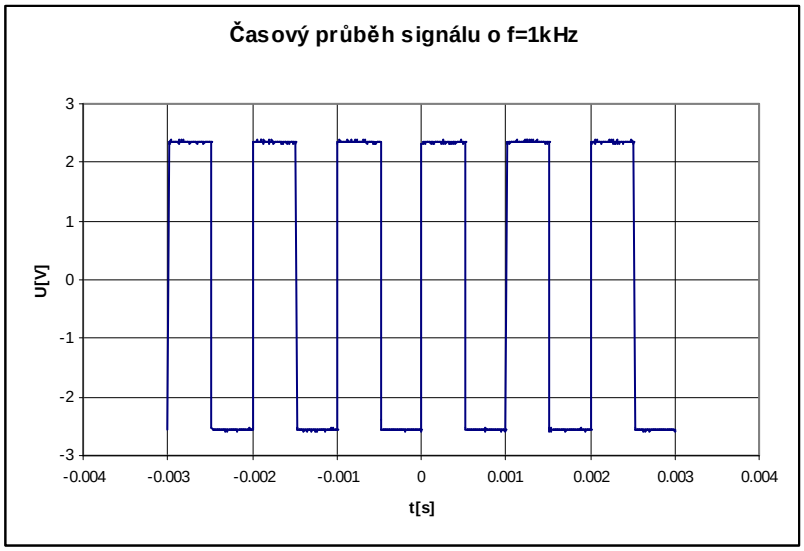
Použité přístroje:

- Osciloskop Agilent - DSO3102A,
- Zdroj - Diametral P230R51D,
- Generátor - Agilent 33220A,
- PC se sériovým rozhraním RS232 2x
- Spektrální analyzátor - Rhode & Schwartz,
- Osciloskop Tektronix - TDS 3032B,
- Multimetr - Agilent 34405A,
- Spektrální analyzátor - Avantes - AvaSpec 3648.

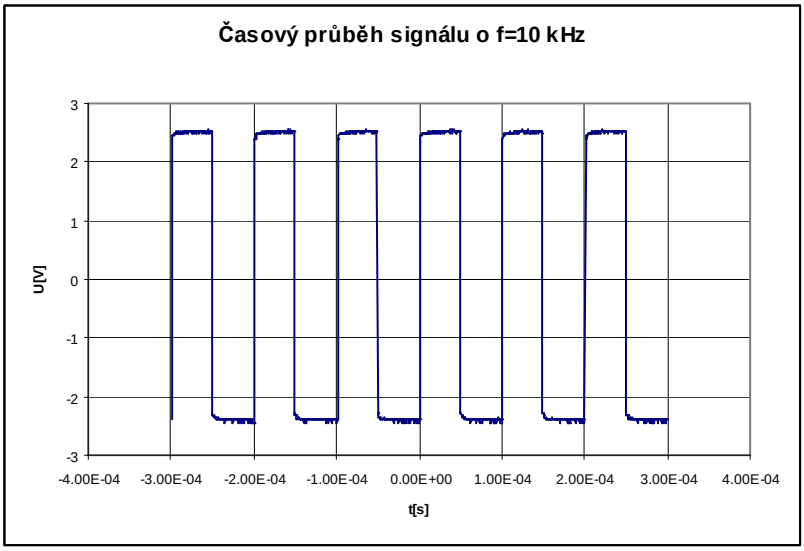
U jednotlivých měření jsou vždy poznámky upřesňující podmínky za kterých bylo měření prováděno.

4.1.1 Maximální dosažitelná frekvence

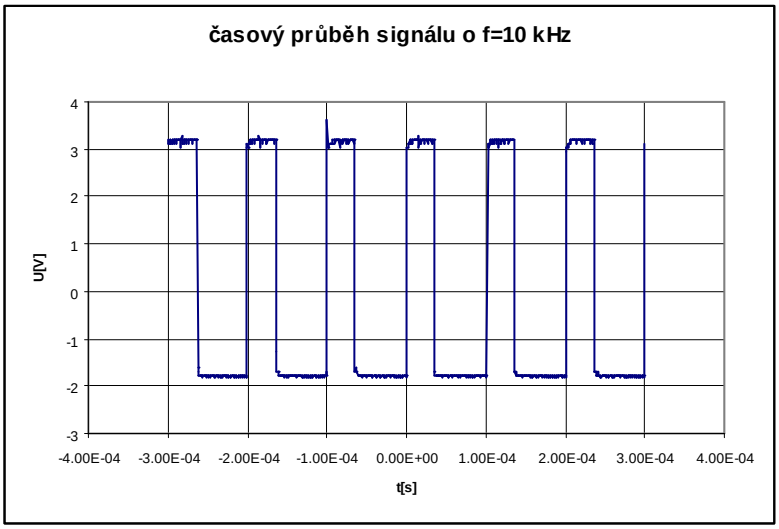
Měření při kterém jsem testoval maximální dosažitelnou přenosovou frekvenci v závislosti na vzdálenosti obou modulů a střídě signálu generátoru. Pro testování byl používán obdélníkový signál s amplitudou *U=5V*. Kromě maximální dosažitelné frekvence získáme i informaci o šířce kanálu BW (band width) použitelné s tímto spojem.



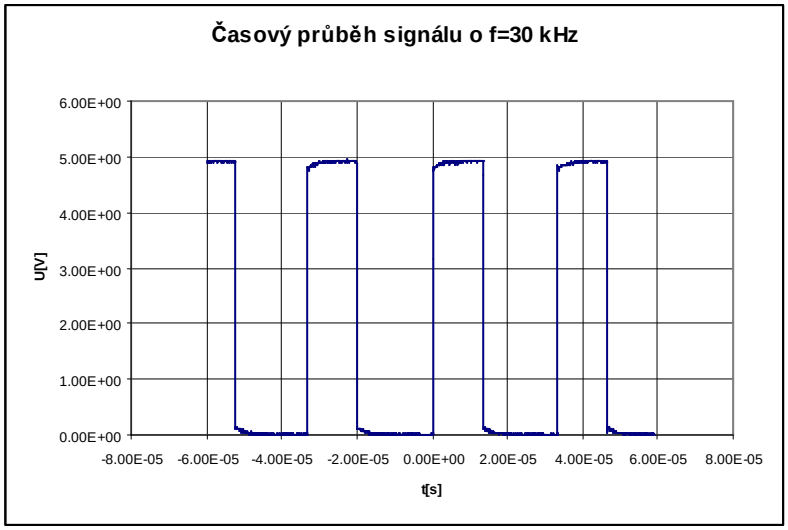
Obr. 4.1: f=10kHz, d=1m, DC=50%.



Obr. 4.2: f=10kHz, d=1m, DC=50%.

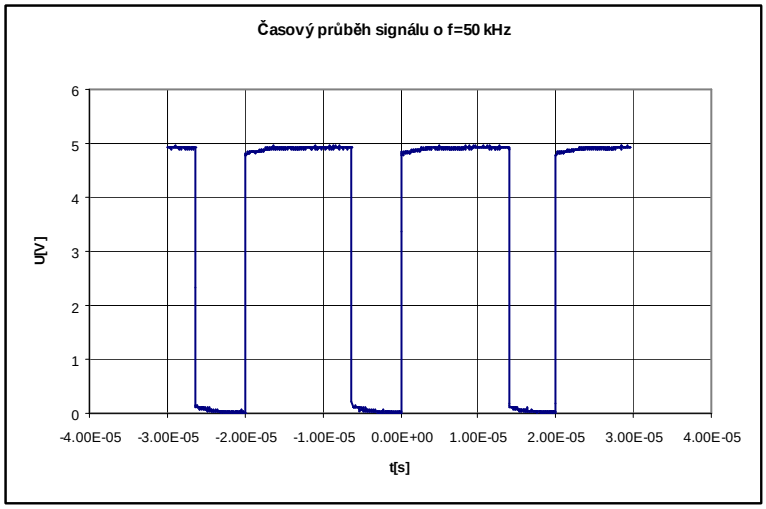


Obr. 4.3: f=10kHz, d=2m, DC=50%.

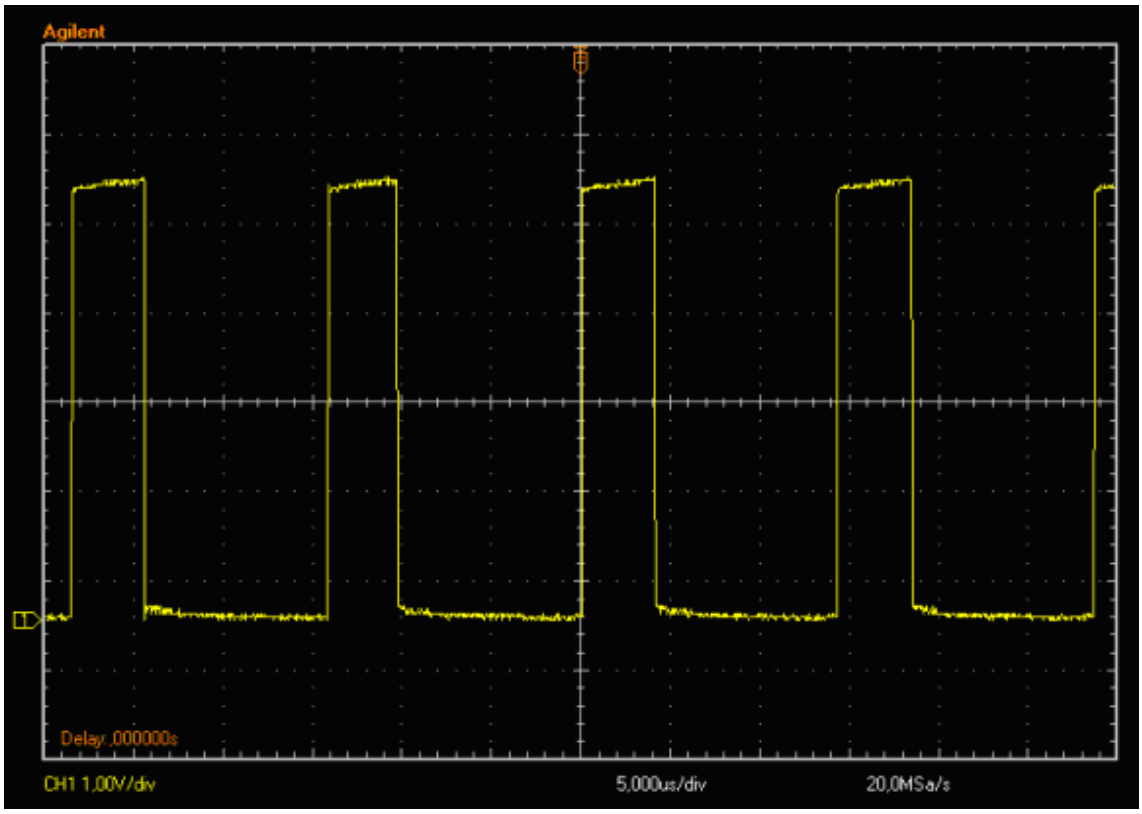


Obr. 4.4: f=30kHz, d=1,5m, DC=50%.

V následujících měřeních bylo potřeba vzhledem k nízké úrovni vysílaného výkonu vlivem rostoucí frekvence signálu a tím klesajícího proudu na LED, změnit střídu signálu vysílaného. Tímto bylo dosaženo dostatečného výkonu dopadajícího na FD. V předchozích případech bylo dostatečné detekovaný signál zesílit na vhodnou úroveň a podle této nastavit komparační úroveň. Tyto dva kroky jsou řešeny pomocí trimrů vzhledem k potřebě variability vlivem různých testovaných podmínek. Použité zapojení splňuje vše potřebné a umožňuje dobrou variabilitu při měření. Navzdory tomuto by bylo možné nastavování zesílení řídit pomocí dalšího OZ v příslušném zapojení ve ZV a tím docílit automatického nastavování A_U.



Obr. 4.5: f=50kHz, d=0,5m, DC=30%.



Obr. 4.6: f=80kHz, d=0,5m, DC=20%.

Maximální dosažená frekvence je tedy 80kHz a to na vzdálenost 0,5m a se střídou 20%. Naproti tomu například při frekvenci *f=10kHz* je použitelná vzdálenost obou modulů více než 2m. Na obr. 4.3 je časový průběh výsledného přijatého signálu právě na tuto vzdálenost. Nejdelší vzdálenost na jakou jsem byl schopen signál detekovat a dostatečně dobře nastavit zesílení a komparační úroveň byla 2,8m. Je možné, že tato by mohla být o něco větší nicméně vzhledem hrubosti trimru v referenci komparátoru jsem nebyl schopen nalézt komparační úroveň pro malý zesílený signál.

Tato série měření nám rovněž poskytla informaci o použitelné šířce pásma, která je dána rozmezím horního a spodního kmitočtu. Šířka pásma celého systému je tedy *BW=79kHz.* Je nutné zdůraznit, že jde o šířku pásma celého systému nikoliv pouze šířku pásma vysílacích LED nebo přijímací FD jako aktivních prvků.

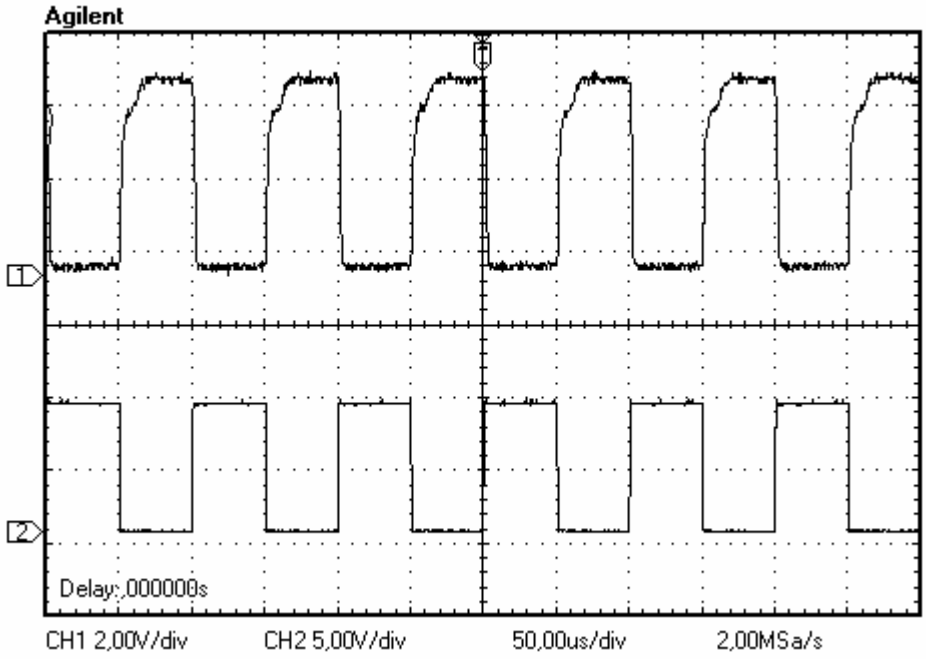
4.1.2 Přijímaný vs. vysílaný signál

V této kapitole jsou pro názornost uvedeny průběhy signálu vysílaného a přijímaného v různých fázích detekce a zpracování. Veškerá tato měření jsou realizována při frekvenci *f=10kHz* a na vzdálenost *d=2m.* Na obr. 4.7 je průběh signálu, kde průběh č.2 je průběh signálu vysílaného z generátoru a průběh č.1 je signál přiváděný na hradlo (gain) tranzistoru který řídí LED.

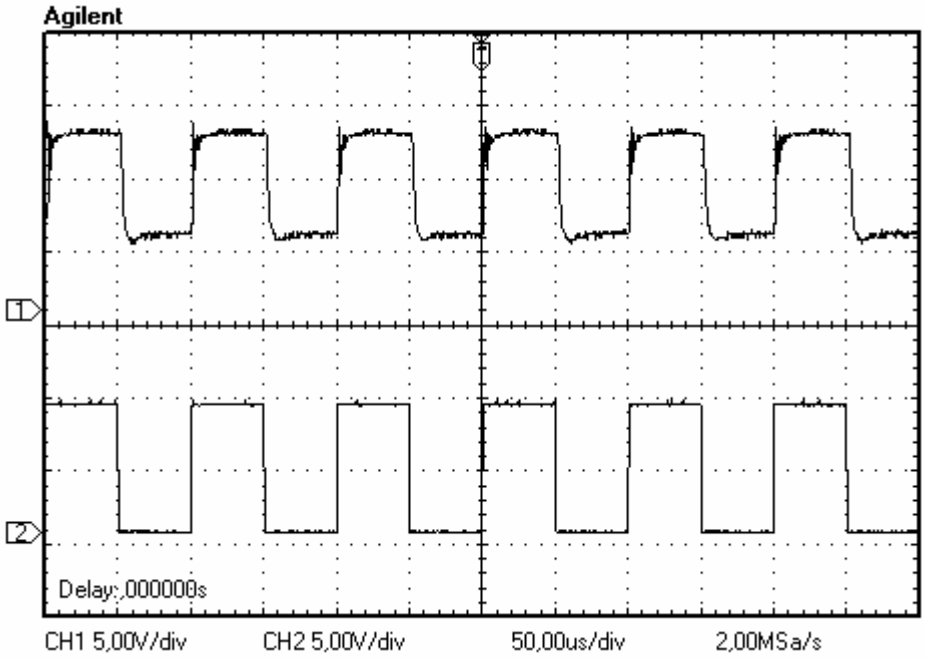
Signál přiváděný na gain tranzistoru je invertovaný což je zapříčiněno funkcí optočlenu zařazeného do vysílacího obvodu. Tento efekt je však ve výsledku kompenzován na straně přijímače.

Na obr. 4.8 je pak signál přiváděný přímo na vysílací diody v porovnání se signálem generovaným.

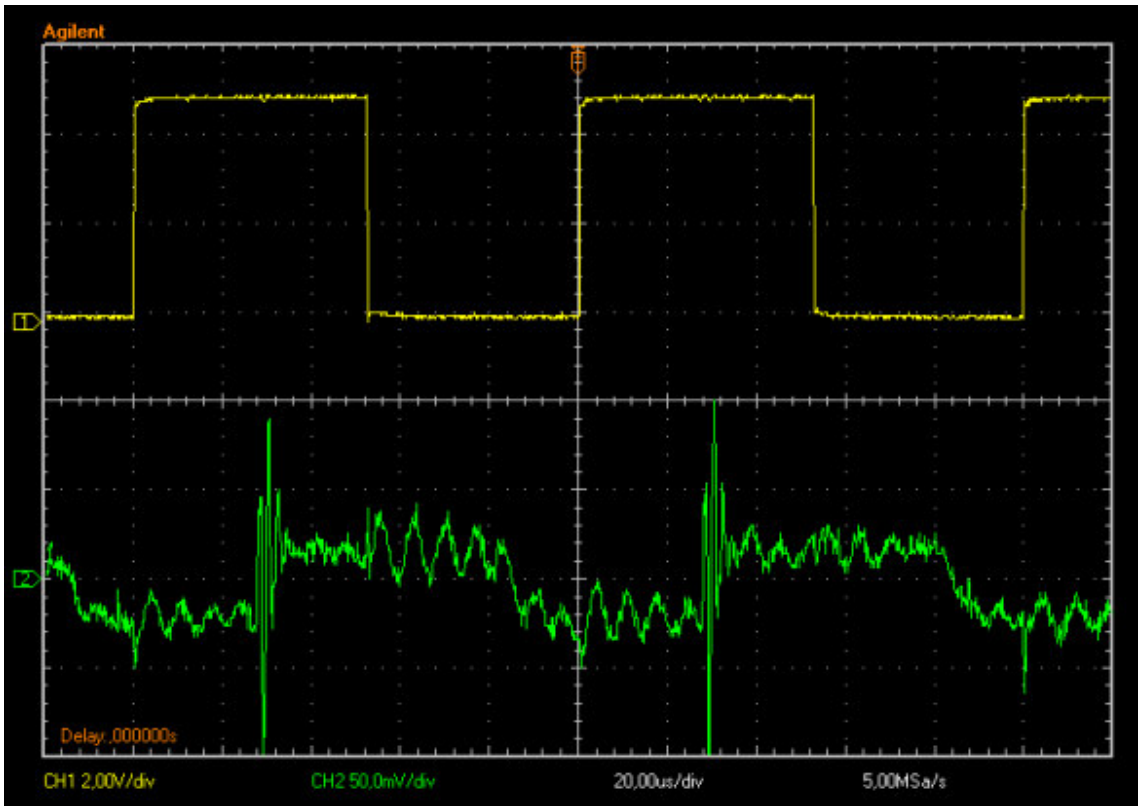
Na obr. 4.9 je signál po detekci přijímací fotodiodou a následném zesílení OZ (nastavené zesílení 5x). Je zde stále patrný invertovaný charakter signálu. Na následujícím obrázku je signál již zpět invertován avšak je patrný fázový posuv přejímaného signálu vůči signálu přijímanému resp. zpracovanému. Fázový posuv se při přenosu projevuje velice výrazně a porto jej dále popisuji a měřím v kap. 4.1.3.



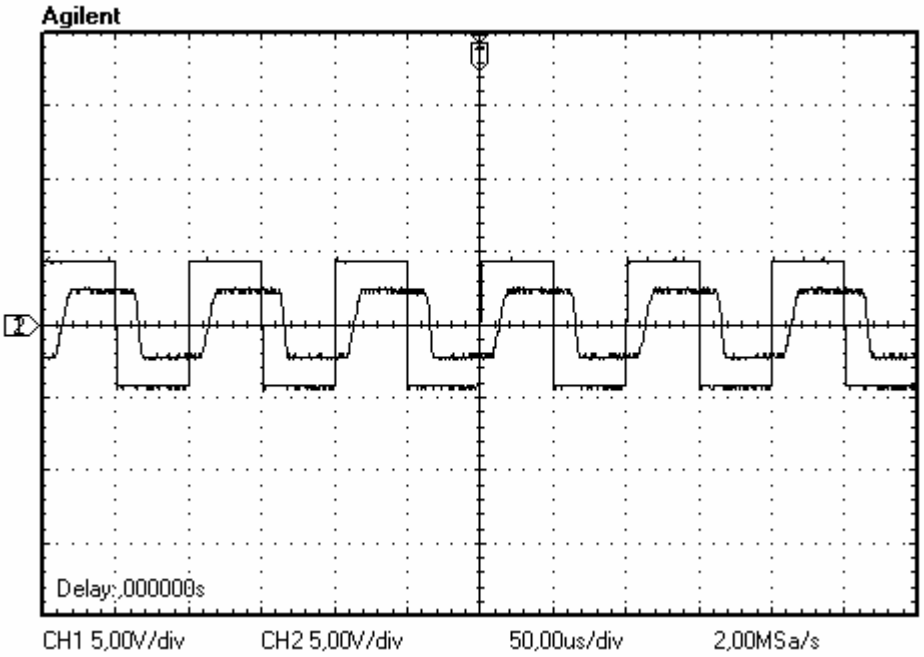
Obr. 4.7: Časová reprezentace signálu generovaného do systému a signálu na hradlu (gain) tranzistoru.



Obr. 4.8: Časová reprezentace signálu generovaného do systému a signálu přiváděného na LED.



Obr. 4.9: Časová reprezentace signálu generovaného do systému a na výstupu OZ na straně přijímače.



Obr. 4.10: Časová reprezentace signálu generovaného do systému a signálu na výstupu komparátoru v přijímacím modulu.

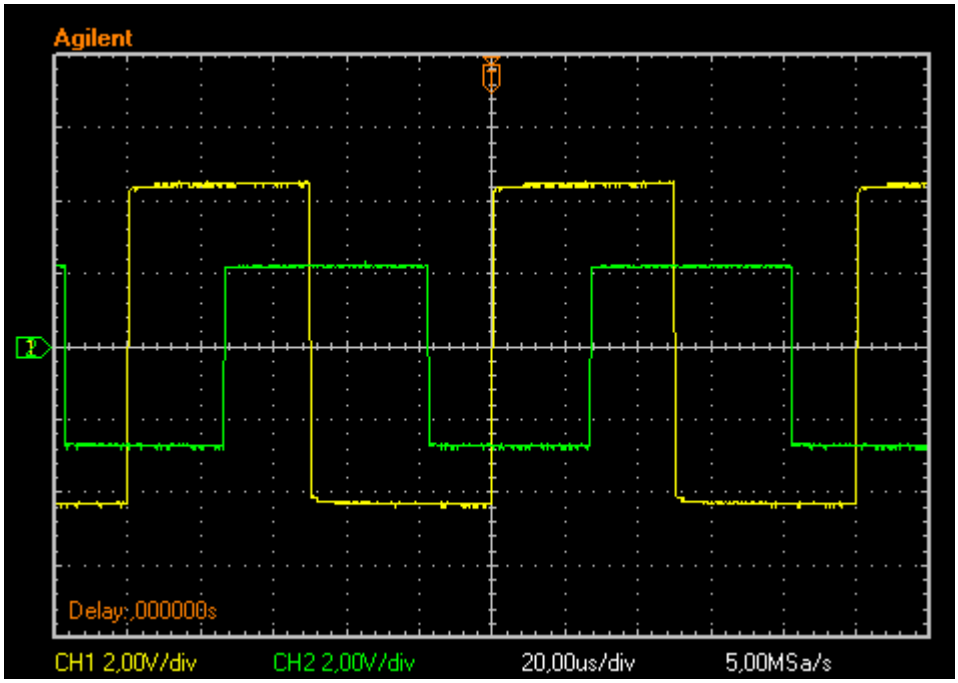
4.1.3 Fázový posuv detekovaného signálu a vliv nepřímého šíření

Již z předchozí kapitoly je patrné, že vlivem šíření signálu dochází k jeho fázovému posuvu. Tento jev se při mém testování velice negativně projevil například u sériového datového přenosu. Proto jsem mu věnoval samostatnou kapitolu.

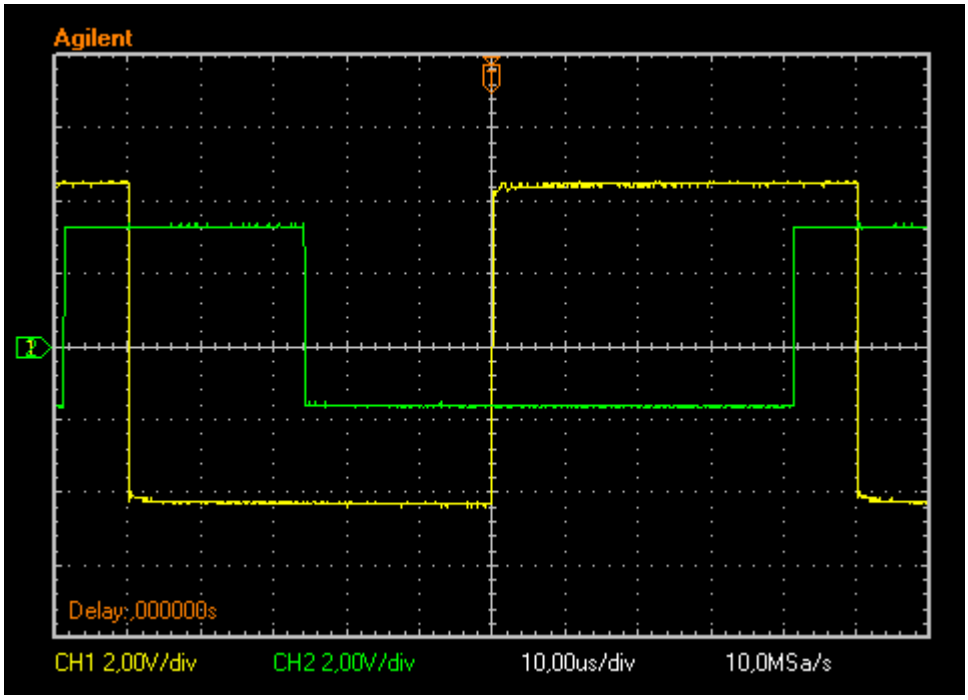
Na šíření signálu volným prostorem mají vliv, mimo jiné, i odrazy od okolních ploch. Při šíření signálu volným prostorem bez samotných odrazů dochází k posuvu fáze mezi přijatým a vyslaným signálem a to podle vztahu 4.1.

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}.r\,[^0] \tag{4.1}$$

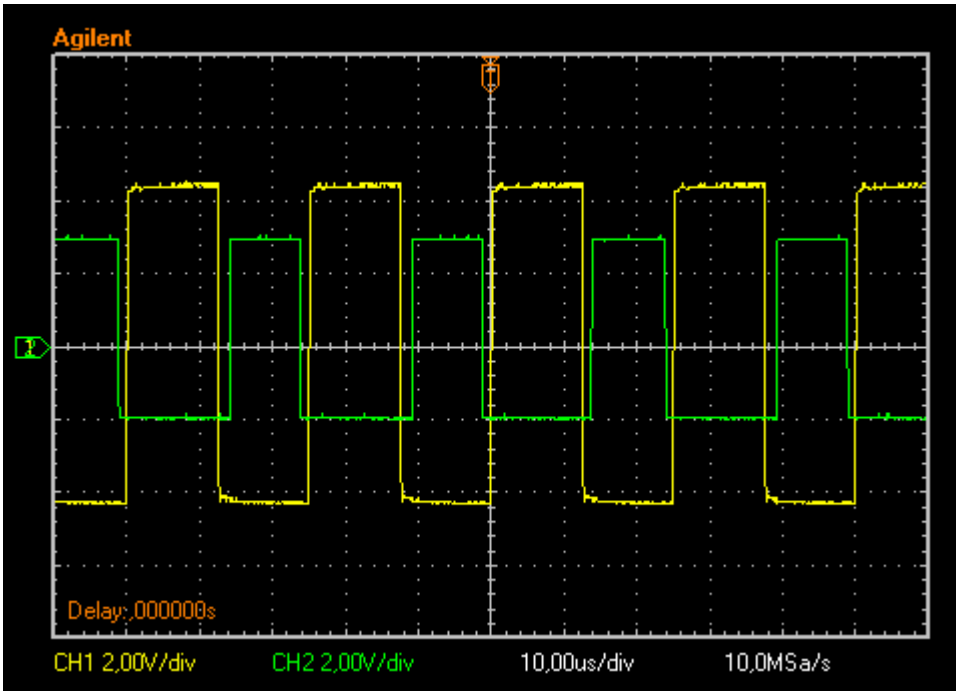
Avšak vzhledem k tomu, že se na šíření uplatní i vliv odrazů, bude tento fázový posuv výrazně větší. Pro tato měření jsem opět pracoval s frekvencí *f=10kHz* resp. *40* a *80kHz* na vzdálenost *d=1,5m*. Tentokrát jsem se však zaměřil na vliv různých odrazných ploch a různého natočení vysílače a přijímače v rozmezí α*=0-90*^{o} a to každého jednoho. Tedy pro přímou viditelnost až po šíření bez přítomnosti LOS cesty šíření. Vysílač i přijímač byly umístěný každý ve výšce *h=0,3m*. Signál v kanálu CH2 je signál na výstupu přijímače.



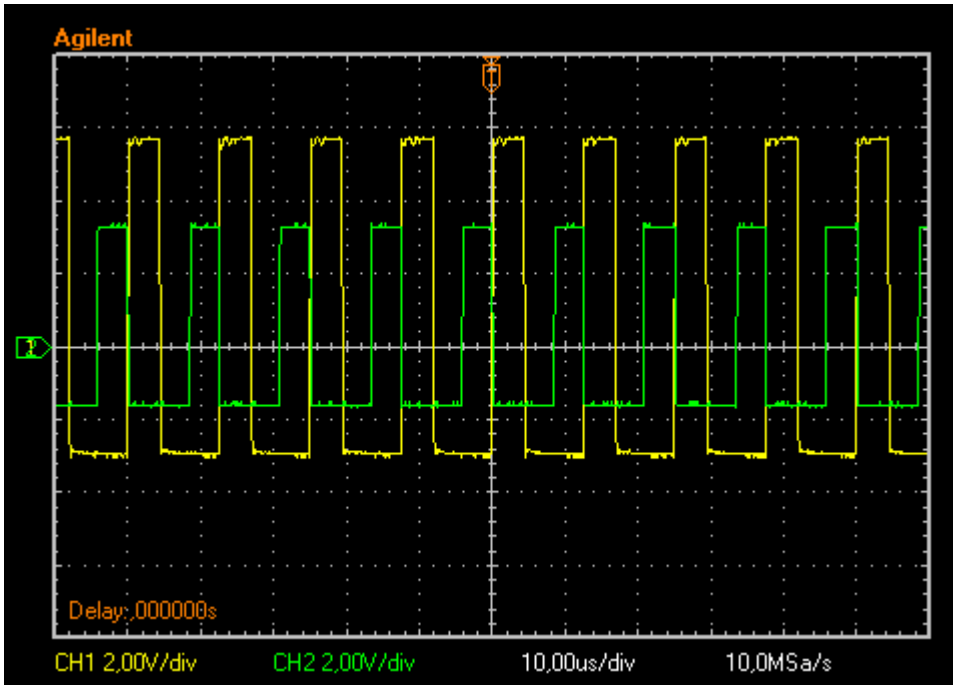
Obr. 4.11: Nepřímé šíření pro α=45° a f=10kHz při d=1,5m. Odrazná plocha - polystyrén.



Obr. 4.12: Nepřímé šíření pro α=45° a f=10kHz při d=1,5m. Odrazná plocha - bílý papír.



Obr. 4.13: Přímé šíření pro α=0° a f=40kHz při d=1m.



Obr. 4.14: Přímé šíření pro α=0° a f=80kHz při d=0,5m. Se střídou 35%.

Naměřený fázový posuv na osciloskopu Tektronix je uveden v tab. 4.1 a tab. 4.2 pro různé frekvence signálu a pro dvě vzdálenosti *d=0,5 a 1m*. Jde vždy o posuv přijímaného vůči vysílanému signálu.

V praxi je tento jev velice nepříjemný a jak zmiňuji níže je potřeba jej řešit. Obzvláště při synchronním přenosu signálu by nebylo možno využít například referenčních hodin jelikož vlivem právě fázového signálu by výsledný rekonstruovaný signál byl zcela nepoužitelný a získaná informační hodnota by byla znehodnocena. Pro tento účel se používá několik metod. Původní metodou kterou jsem zamýšlel je použití jednoduchého linkového kódu, avšak tento je vzhledem k výraznému fázovému posuvu nepoužitelný. Další metodou je využití zapojení umožňujících obnovení hodinového signálu ze signálu přijatého pomocí oscilátoru s fázovým závěsem. S tímto však má práce nepočítá proto shledávám synchronizaci přenosu jako v tomto případě nepoužitelnou a nutnou k řešení.

Tab. 4.1: Tabulka hodnot fázového posuvu přijatého vůči vysílanému signálu pro d=0,5m.

Frekvence [kHz]	**Fázový posuv [^{o}]**
1	-3
10	-50
15	-75
20	-109
25	-144
30	-178

Tab. 4.2: Tabulka hodnot fázového posuvu přijatého vůči vysílanému signálu pro d=0,5m.

Frekvence [kHz]	**Fázový posuv [^{o}]**
1	-3
10	-40
15	-64
20	-88
25	-115
30	-135

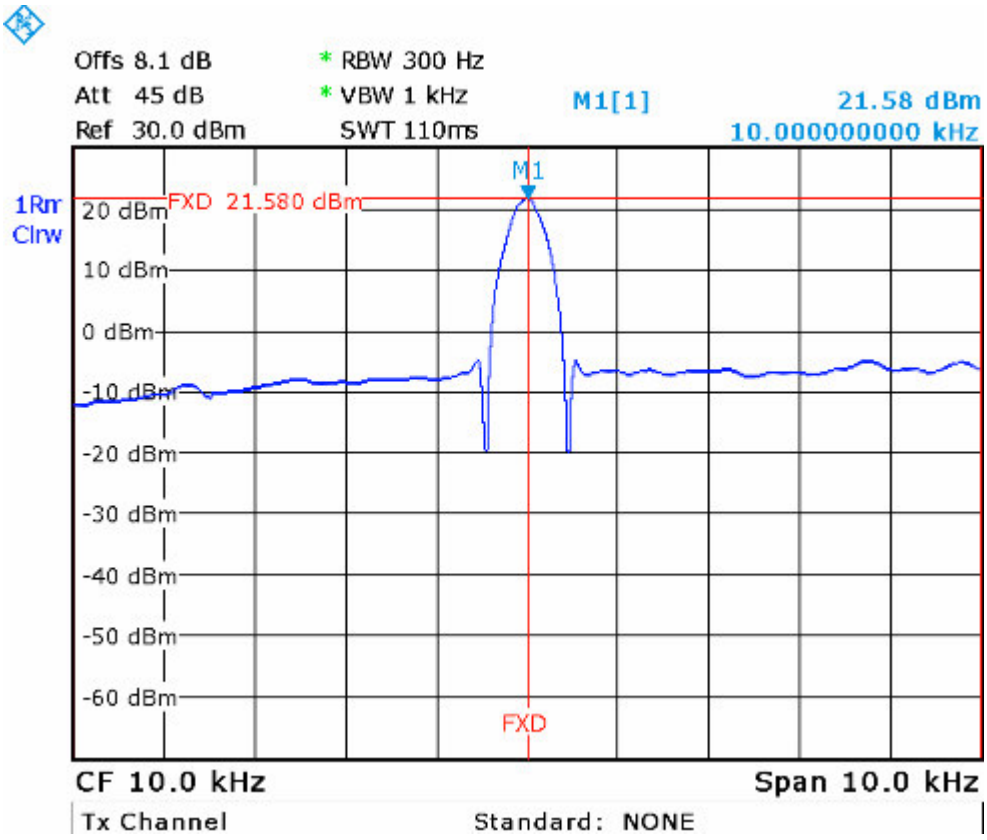
Pokud se vrátím k nepřímému šíření signálu a vlivu absence LOS na jeho rekonstrukci je potřeba říci, že signál nepotřebuje přímou cestu šíření. Jak jsem zmínil již v úvodu kapitoly a jak je patrné z průběhů, byla provedena série měření pro různé úhly vzájemného natočení vysílače a přijímače a pro různé odrazné plochy a bylo zjištěno, že signál je detekovatelný i v případě, že na detektor dopadá ryze signál šířící se non-LOS trasou tedy signál čistě odražený a to i v případě vzájemně rovnoběžně umístěného vysílače a přijímače. Záleží samozřejmě na vzdálenosti odrazné plochy a na použité frekvenci nicméně tento fakt je pro praktické použití pozitivní. Tato skutečnost, že signál odražený výraznou měrou přispívá k celkovému výkonu dopadajícímu na FD, potvrzuje teoretický předpoklad, který jsem nastudoval a zmínil v kap. 2.1.11.

Rovněž přítomnost odrazné plochy má na úroveň detekovaného signálu pozitivní vliv co do jeho úrovně a výrazně zvětšuje jeho úroveň a tím i dosah spoje. Viz výše.

Ovšem jako výrazné negativum se zde projevuje fázový posuv šířícího se signálu.

4.1.4 Výkonová úroveň zpracovaného signálu

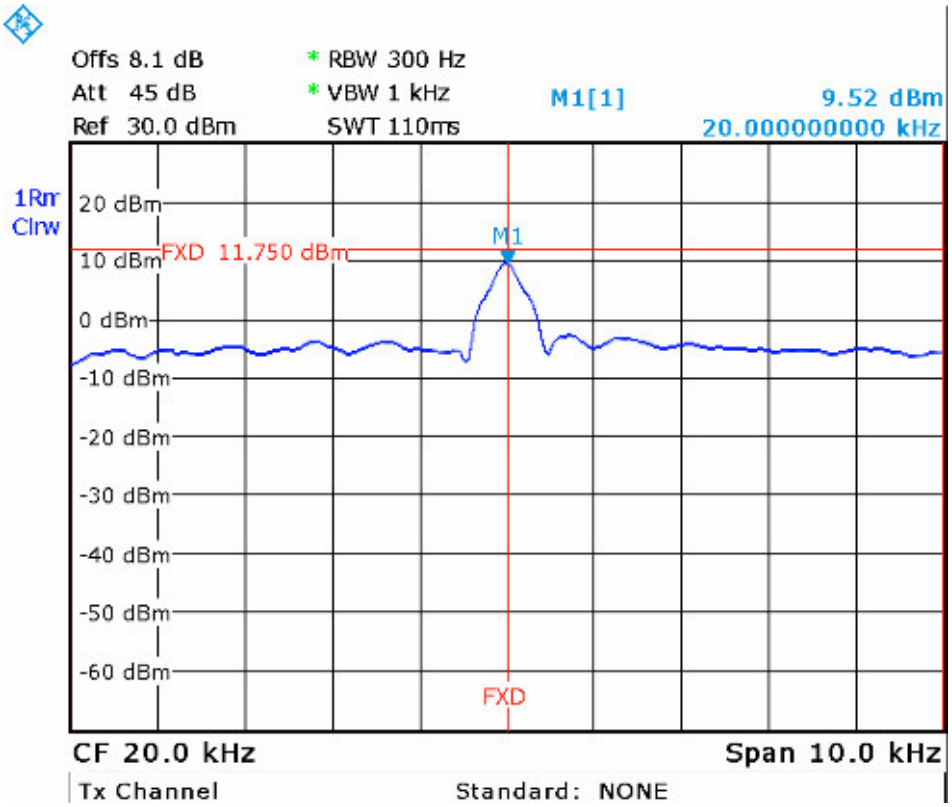
Následující průběhy reprezentují výkonovou úroveň signálu a šumu pozadí. Odstup těchto dvou hodnot zůstává dostatečný, nicméně zjištěná výkonová úroveň klesá spolu s rostoucí frekvencí signálu. Měření bylo provedeno na spektrálním analyzátoru Rhode & Schwarz pro frekvence *f=10, 20, 50 a 80 kHz*. Výsledky reprezentují signál na výstupu přijímacího modulu, tedy již zpracovaný signál.



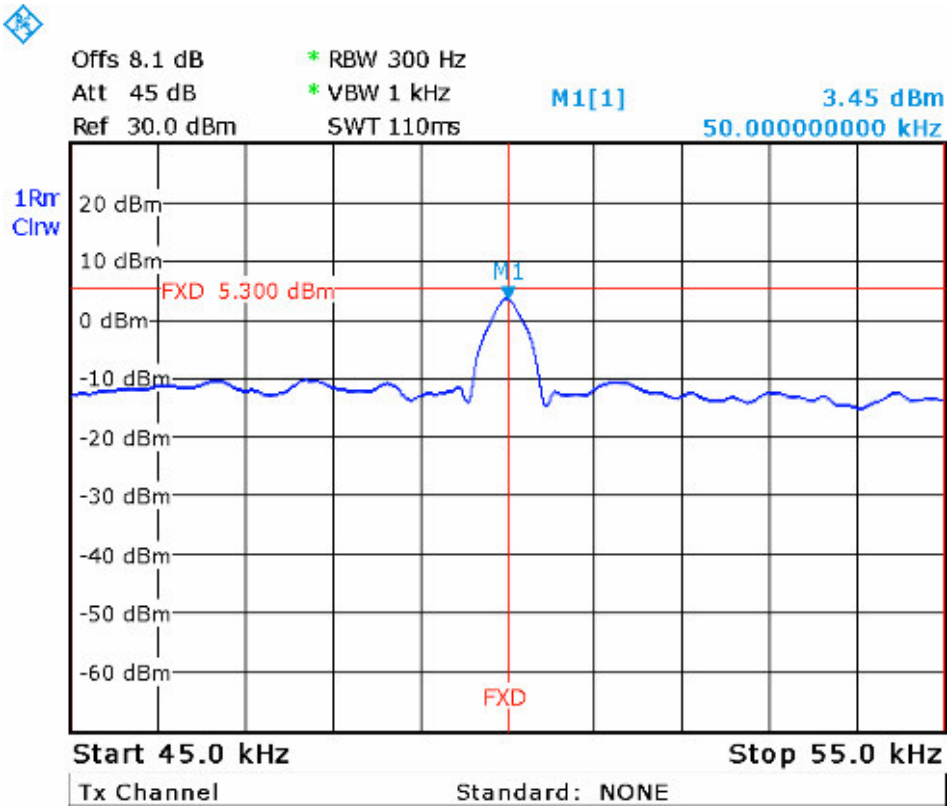
Obr. 4.15: Výkonové spektrum signálu na výstupu přijímače pro f=10kHz.

Pro jednotlivé frekvence jsou naměřené hodnoty signálu: *21,58dB pro f=10kHz; 9,52dB pro f=20kHz; 3,45 pro f=50kHz a 0dB pro f=80kHz.*

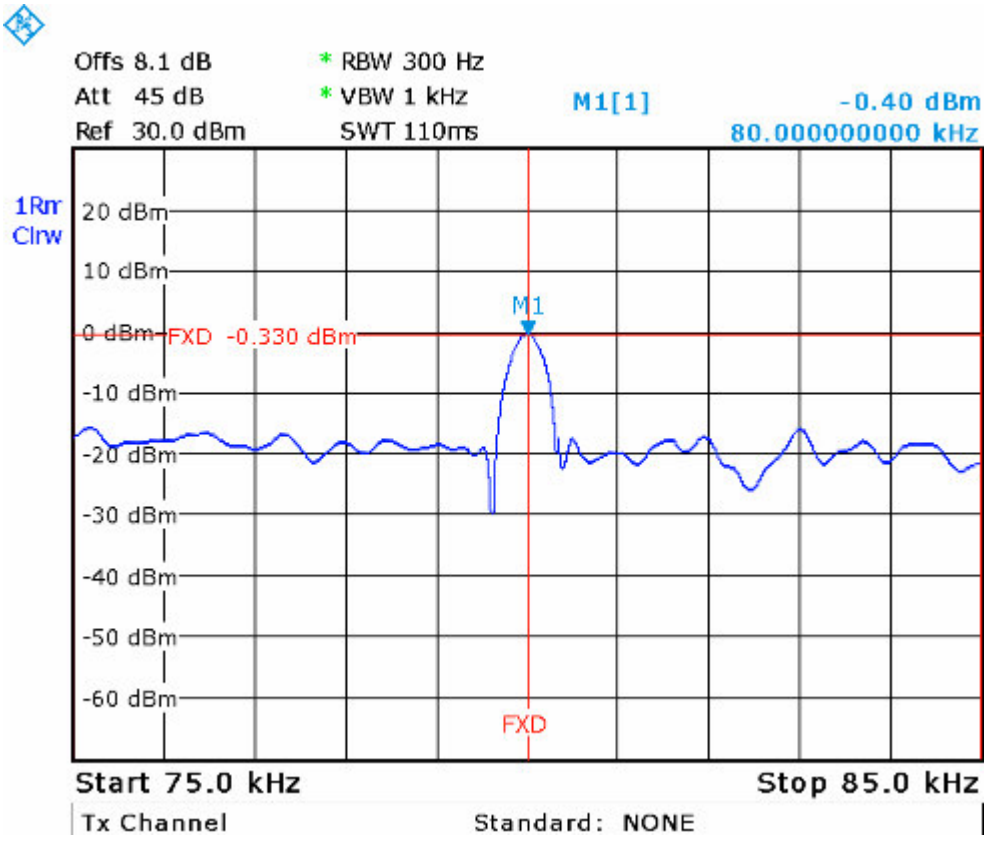
Ze zjištěných hodnot je patrný odstup výsledného signálu, po zpracování přijímacím modulem, od šumu. Tento odstup se liší podle frekvence signálu, což je způsobeno mimo jiné detekovaným signálem na fotodiodě. Vzhledem ke snižující se úrovní vyzářeného resp. detekovaného výkonu klesá i rozdíl výkonové složky signálu a šumu na pozadí přenášeného signálu. Problematika odstupu signálu od šumu tzv. SNR resp. CNR jedná-li se o odstup modulovaného signálu, je přiblížen v kap. 3.1.4.



Obr. 4.16: Výkonové spektrum signálu na výstupu přijímače pro f=20kHz.



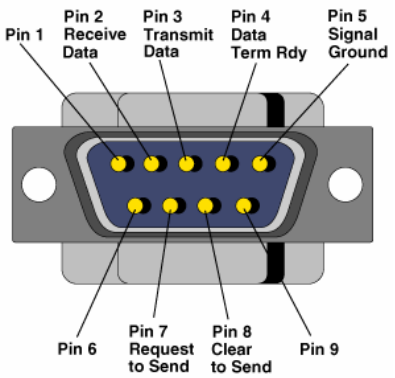
Obr. 4.17: Výkonové spektrum signálu na výstupu přijímače pro f=50kHz.



Obr. 4.18: Výkonové spektrum signálu na výstupu přijímače pro f=80kHz.

4.1.5 Sériový přenos

Aby byla potvrzena i praktická funkčnost návrhu rozhodl jsem se při jeho realizaci zakomponovat výstupy pro připojení pinů určených pro sériovou komunikaci. K těmto měřením jsem využil PC a NB se spuštěným komunikačním rozhraním *Hyperterminal*, který je přímo určený pro sériovou komunikaci prostřednictvím COM portu. Na obr. 4.19 je zapojení portu s vyznačenými vysílacími (TX) a přijímacími (RX) piny.



Obr. 4.19: Popis pinů COM portu použitého pro sériovou komunikaci. [7]

Jde o pin 2,3 a 5, který reprezentuje GND. Vysílaný signál byl nejprve testován v asynchronním přenosu a později také s využitím hodinového signálu.

Asynchronní přenos

První zmiňovaný umožnil při testování komunikace na vzdálenost *l=1m* využít celý použitelný rozsah komunikačních rychlostí provozovatelných po sériovém rozhraní tedy R_B*=110 - 19200 [bps]*. Další nastavení použitá pro testování byla parita, počet start a stop bitů. Testován byl přenos jak textu kdy rozhraní bylo využíváno jako komunikační kanál, tak pro přenos např. textových souborů. Přenos probíhal bez problémů a to ve všech možných kombinacích nastavení aplikace hyperterminal. Vzhledem k povaze testování zde neuvádím žádný přímý výstup, avšak v příloze je k dispozici video v němž je zaznamenán jeden z testů.

Synchronní přenos

Synchronní přenos je možný díky vstupům sloužícím jako hodinový signál vysílacího potažmo přijímacího modulu. Vzhledem k charakteru přenosu jak je patrné z kap. 4.1.4 dochází při přenosu signálu k jeho fázovému posuvu. Velikost tohoto posuvu je dána:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}.r \ [^0], \tag{4.2}$$

Mým původním záměrem bylo pro testování využít hodinového signálu generátoru tak, že oba moduly budou mít přivedený společný signál. Avšak vzhledem ke zmíněnému, není možné takto synchronní přenos realizovat, neboť přivedený referenční hodinový signál není ve fázi se signálem vysílaným který nese součin signálu hodinového a datového. Obnovená informace v přijímači není věrohodná. K tomuto účelu by bylo zapotřebí využít např. obvodů fázového závěsu pro obnovu hodinového signálu. Tyto však nebyly do návrhu zakomponovány proto je sériový synchronizovaný přenos v této konfiguraci nerealizovatelný.

Nevýhodou zapojení je nutnost změn rozhodovacích úrovní komparačního obvodu pro různé frekvence, jelikož určité nastavení zpravidla pracuje v určitém frekvenčním rozsahu což je způsobeno poklesem doby po jakou je na diodě přítomen signál v aktivní úrovni. Úměrně s touto dobou klesá proud na diodách a tím tedy i jejich vyzářený výkon což se právě nepříznivě projevuje na úrovni detekovaného signálu.

4.2 Shrnutí

Na základě provedených měření je možné do jisté míry potvrdit teoretické předpoklady zmiňované v rámci kap.2. Na detekovaný signál má velký vliv odražený signál tedy přítomnost nepřímého směru šíření. Na jeho základě je možné dosáhnout lepších parametrů detekovaného signálu právě v blízkosti odrazných ploch. Rovněž různé materiály se na tomto faktu podílejí různou měrou. Jako negativum je však nutné vnímat vliv fázového posuvu takto šířícího se signálu, který je právě vlivem odrazů od různých povrchů značný. Toto je však skutečnost, kterou bylo možné s ohledem na všesměrový charakter spoje do jisté míry předpokládat. Avšak rozsah vlivu tohoto jevu mne zaskočil.

Vliv odrazu, jak je teoreticky popsáno v rámci kap. 2.1.11, je rovněž závislý na vzájemné vzdálenosti vysílače a přijímače, na existenci resp. neexistenci LOS a na blízkosti odrazných ploch. Např. při absenci okolních odrazných ploch kdy z žádné strany nebyla poblíž žádná plocha od níž by se záření odráželo směrem k přijímači, došlo k úplnému rozpadu spoje. Naproti tomu pokud byl spoj umístěn tak, že přímá cesta sice neexistovala avšak v jeho okolí bylo větší množství souvislých odrazných ploch, pak spoj byl provozuschopný byť detekovaný signál byl velice slabý. Po jeho zesílení jsem byl schopen najít vhodnou komparační úroveň a signál zrekonstruovat. Což hraje významnou roli právě při použití v in-door komunikaci kde se budou odrazy na přenosu podílet velkou měrou. Spolu s nimi bude však nutné vyřešit právě fázový posuv signálu, vliv inter-symbolové interference a mnoho dalšího plynoucího právě z takto šířícího se vlnění.

Naproti tomu se navzdory předpokladům jen velice málo projevil vliv okolního umělého osvětlení. Chování spoje za výše uvedených podmínek, bylo prakticky totožné při absenci i přítomnosti umělého osvětlení od zářivek, žárovek či jiných zdrojů. Do jisté míry byl jejich vliv omezen filtrem nicméně ani jako šum na pozadí signálu neměly na spoj větší dopad.

Daleko více se však projevuje vliv slunečního záření dopadajícího na FD a to zejména při testování IR části spoje. Toto záření mělo za následek úplné zarušení spoje a signál nebylo možné v šumovém pozadí vůbec detekovat.

Pozitivní byl i zjištěný výkon signálu v porovnání s výkonem šumového pozadí. Tento rozdíl se téměř neustále pohyboval nad hranicí 13 dBm což je pozitivní pro použitelnost spoje.

5 ZÁVĚR

V diplomové práci je v jejím úvodu zapracován princip komunikace pomocí optického signálu využívající jako nosné médium světelnou vlnu. Byla provedena kategorizace používaných technologií a stručný úvod do jejich principu činnosti a oblasti používání. Dále jsem zavedl stručný úvod do oblasti šíření světla a definoval si základní veličiny.

V druhé kapitole jsem se věnoval atmosférickým vlivům působícím na optický signál. Byť se může zdát, že pojem atmosférické jevy jde mimo oblast in-door optických spojů, je potřeba si uvědomit, že jako atmosféru je nutné chápat i prostředí uvnitř budov. Z tohoto hlediska jsem se snažil poměrně detailně charakterizovat možné vlivy působící na in-door spoje a tyto aplikovat na svou práci. Vzhledem k absenci literatury zabývající se přímo in-door optickými spoji a okolními vlivy jsem se snažil hledat paralely právě u spojů out-doorových. Některé z těchto vlivů, mají na in-door spoj pouze zanedbatelný dopad v porovnání s out-door spoji, některé se však mnohem intenzivněji projeví právě v oblasti in-door spojů, jako je například zarušení pevnou překážkou. Největší pozornost je věnována odrazivosti prostředí a vlivu existence resp. neexistence přímé a nepřímé cesty šíření signálu.

Další kapitola je zaměřena na návrh samotného optického spoje. Na základě nashromážděných informací jsem navrhl vhodné zapojení vysílače a přijímače optického signálu. Byly stanoveny potřebné parametry použitých součástek. Na základě tohoto návrhu byl spoj realizován a následně testován. Je nutno říci, že návrh není ideální a s odstupem času a po nabytých zkušenostech bych mnohé části řešil jiným způsobem. Zároveň však zapojení splnilo svůj účel a spoj byl zprovozněn a funkční pro testovací a měřící účely. Součástí práce je tedy i potřebná dokumentace pro možnost opětovné realizace přípravku. V práci jsem zpětně zhodnotil některá negativa a navrhl jiné řešení než s jakým bylo při testování pracováno.

Krátká kapitola je věnována i obecné problematice bezdrátové komunikace a mechanismům používaných pro její zabezpečení, dobrou dostupnost a spolehlivost.

V poslední kapitole se věnuji testování parametrů spoje. Pro tyto měření bylo sestaveno pracoviště a cílem měření bylo zjistit maximální možnou vzdálenost na jakou je možné spoj v dané konfiguraci provozovat, maximální frekvenci na níž je spoj schopen pracovat a otestovat některé vlivy popisované v kap.2. Především pak odrazivost prostředí a její vliv na spoj. Výsledky jsou shrnuty v rámci kap.4 nicméně maximální dosažená provozní vzdálenost byla *r=2,85m* při *f=10kHz a DC=20%*. Maximální dosažená pracovní frekvence byla *f=80kHz* na vzdálenost *r=0,5m.* Šířka pásma systému *BW=79kHz*. Byl testován vliv odrazivosti a v rámci testování jsem se setkal s velmi výrazným jevem v podobě posuvu fáze signálu. Byť jsem tento jev očekával, nepředpokládal jsem, že se projeví až takovou měrou viz. kap.4. na tento jev měla vliv nejen frekvence vysílaného signálu, ale i umístění spoje v prostoru, kdy právě odrazy se na fázovém posuvu podílely největší měrou. V praxi by bylo potřeba tento jev důkladně ošetřit a to především z důvodu synchronizace spoje. Pozitivním zjištěním však byl vliv odrazu signálu na velikost detekovaného výkonu. Zde se potvrdily předpoklady z kap. 2.1.11 a je jasné, že vliv odraženého signálu má pro nesměrové spoje zásadní význam neboť zlepšuje úroveň detekovaného signálu řádově o jednotky dB. Opět bylo provedeno několik měření v závislosti na vzájemném odklonu a typu odrazné plochy. Výsledky jsou opět shrnuty v kap.4.

Jako poslední bylo prováděno testování sériového přenosu prostřednictvím spoje. Zde jsem se potýkal se zmíněným problémem v podobě fázového posuvu signálu. Prvotní záměr spočíval ve využití společného generátoru hodinového signálu pro oba moduly nicméně vzhledem k fázovému posuvu se tento záměr stal nerealizovatelný a získaná přenesená informace byla zcela znehodnocena po zpracování přijímačem. Avšak v případě nesynchronního přenosu byl spoj plně funkční a za podmínek pospaných v kap. 4.1.5 jsem realizoval sériový přenos všemi dostupnými rychlostmi pro sériový port a přenos probíhal bez chyb. Rovněž s různou konfigurací zabezpečení dat paritními bity a podobně. Testování probíhalo formou "chatu" mezi dvěma počítači resp. formou přenosu textových souborů mezi těmito.

LITERATURA

[1] WILFERT O., KOLKA Z. *Optické (laserové) bezdrátové spoje*. VUT Brno, UREL [online], [cit. 1.2.2010]. Dostupné z <*http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Wilfert_Kolka_opticke_spoje.pdf*>

[2] SLOVÁČEK A., SEVERA P. *RONJA - optické pojítko*. Brno 2007. [online], [cit. 1.2.2010]. Dostupné z <*http://soc.nidm.cz/data/2007/10-2.pdf*>

[3] Encyklopedie Wikipedia (CZE). [online], [cit. 2.2.2010]. Dostupné z <*http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:ElmgSpektrum.png*>

[4] WILFERT O. *Výukové materiály: Základy optických komunikací a optoelektronika, přednáška č.8.* [online], [cit. 12.2.2010]. Dostupné z <*https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/B_EST/prezencni/BOPE/Prednasky/BOPE8_FSO.pdf*>

[5] WILFERT O. *Fotonika a optické komunikace*. VUT Brno, UREL. [online], [cit.16.2.2010]. Dostupné z <*https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/M_EST/MFOK/Fotonika%20a%20opticke%20komunikace.pdf*>

[6] BURIAN J., HRB J., MYSLÍK V. *Optická pojítka*. [online], [cit. 19.2.2010]. Dostupné z <*http://czechlight.cesnet.cz/export/sites/default/publications/free-space-optics/2004/CZF-Opticke_komunikace.ppt*>

[7] Encyklopedie Wikipedia (ENG). [online], [cit. 6.2.2010]. Dostupné z <*http://www.wikipedia.org*>

[8] Český hydrometeorologický ústav. [online], [cit. 6.2.2010]. Dostupné z <*http://www.chmi.cz/meteo/ok/infklim.html*>

[9] WILFERT, O., KASAL, M. *Interoperabilita optických a družicových spojů*. In Sborník příspěvků celostátní konference Multimediální radiokomunikace. Pardubice 2000, s. 29-48. [cit. 11.2.2010].

[10] G. Oppenhäuser *A world first: Data transmission between European satellites using laser light*. ESA news, European Space Agency, 22 November 2001. [online], [cit. 18.2.2010]. Dostupné z <*http://www.esa.int/esaCP/ESASGBZ84UC_index_0*>

[11] Japan Aerospace Exploration Agency. *Successful Optical Communication Experiment between the NICT Optical Ground Station and the Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite*. April 2006. [online], [cit. 30.1.2010]. Dostupné z <*http://www.jaxa.jp/press/2006/04/20060407_kirari_e.html*>

[12] HORWATH, J., KNAPEK, M., EPPLE, B., BRECHTELSBAUER, M., WILKERSON, B. *Broadband Backhaul Communication for Stratospheric Platforms: The Stratospheric Optical Payload Experiment*. In Proceedinds of the SPIE, Vol. 6304, 2006. [cit. 11.4.2010].

[13] HENNIGER, H., EPPLE, B., GIGGENBACH, D. *Mobil FSO activities in Europe and fading mitigationapproaches*. In Proceedings of the RADIOELEKTRONIKA 2007. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2007. [cit. 20.3.2010].

[14] ESA. *Another world first for Artemis: a laser link with an aircraft*. ESA news, European Space Agency, 18.12.2006. [online], [cit. 25.3.2010]. Dostupné z <http*://www.esa.int/esaCP/SEMN6HQJNVE_Benefits_0.html*>.

[15] Majumdar, Arun K.; Ricklin, Jennifer C. *Free-Space Laser Communications*. 2008, s. 418. ISBN: 978-0-387-28652-5. [cit. 18.3.2010].

[16] Al NABOUSLI[1,2] M., SIZUN H.[1], de FOMEL F.[2]. *Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere.* [1] France Telecom, 6, Avenue des usines, BP382-90007 BELFORT Cédex, France, [2] Université de Bourgogne, 9, Avenue Alain Savary, BP47870-21078 DIJON Cédex, France [cit. 29.3.2010].

[17] LAVEN P. *MiePlot computer program*. [online], [cit. 22.2.2010]. Dostupné z <*https://www.philiplaven.com*>

[18] ISAAC I. K., McARTHUR B., KORREVAR E. *Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications.* Optical Access Incorporated 10343 Roselle Street San Diego, CA 92121. [cit. 13.4.2010].

[19] MUHHAMAD, S.S. KOHLDORFER, P. LEITGEB, E. *Channel modeling for terrestrial free space optical links.* Inst. of Broadband Commun., Graz, Austria , 2005. ISBN 0-7803-9236-1. [cit. 15.4.2010].

[20] NESVATBA P. *Bezdrátové Komunikace*. [online], [cit. 15.4.2010]. Dostupné z <*http://www.proficomms.cz/my_files/download/A07-MODnet-bezdratove_komunikace.pdf*>

[21] CARRUTHERS J.B., KANNAN P. *Iterative site-based modeling for wireless infrared channels*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation , vol. 50, pp. 759- 765, Květen 2002. [online], [cit. 8.3.2010]. Dostupné z <*http://iss.bu.edu/bwc/irsimit/*>

[22] McDONNELL J.T.E., SPILLER T.P., WILKINSON T.A. *RMS Delay Spread in Indoor LOS environments at 5.2 GHz.* HP Laboratirie Bristol, Duben 1998. [online], [cit. 11.3.2010]. Dostupné z <*http://www.hpl.hp.com/techreports/98/HPL-98-63.pdf*>

[23] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. *Laser Beam Propagation through Random Media*. Bellingham: SPIE, 1998.

[24] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. *Fundamentals of Photonics*. New York: John Wiley, 1991.

[25] SMITH, F. G., KING, T. A., WILKINS, D. *Optics and Photonics*. New York: John Wiley, 2007.

[26] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington: Spie Press, 2001.

[27] SALEH, B.E.A., TEICH, M.C. *Základy fotoniky*. Praha: MATFYZPRESS Praha, 1994. ISBN 80-85863-00-6.

[28] HŮLOVÁ H. *Paprsková optika*. [online], [cit. 19.4.2010]. Dostupné z <*www.gsosfm.cz/projektfyzika/3rocnik/paprskovaoptika.ppt*>

[29] Výukový text MFF UK. *Kvantová optika a optoelektronika*. [online], [cit. 25.4.2010]. Dostupné z <*http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_305.pdf*>

[30] Výukový text MFF UK. *Gaussovské svazky*. [online], [cit. 28.4.2010]. Dostupné z <*http://physics.mff.cuni.cz/kchfo/ooe/pdf/praktika_gauss.pdf*>

[31] RAIDA Z. a kol. *Elektromagnetické vlny Mikrovlnná technika*. Multimediální učebnice. FEEC VUT Brno 2010. [online], [cit. 3.5.2010]. Dostupné z <*http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php*>

[32] WANG Rui, DUAN Jing-yuan, SHI An-cun, WANG Yong-jie, LIU Yu-liang. *Indoor optical wireless communication system utilizing white LED lights*. Optoelectron. Syst. Lab., Chinese Acad. of Sci., Beijing, China, 2009. ISBN 978-1-4244-4784-8. [cit. 28.5.2010].

[33] KOMINE, T., NAKAGAWA, M., *Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white LED lightings*. Dept. of Inf. & Comput. Sci., Keio Univ., Yokohama, Japan , 2004. ISBN 0-7803-8623-X. [cit. 4.6.2010].

[34] Lustry Svítidla. [online], [cit. 13.6.2010]. Dostupné z <*http://www.lustry-svitidla.cz*>

[35] BYSTŘICKÝ, Václav; KAŇKA, Jan. *Osvětlení*. Praha : ČVUT, 1997. 128 s. [cit. 6.6.2010].

[36] Farnell. [online], [cit. 25.6.2010]. Dostupné z <*http:// cz.farnell.com/*>

[37] Siemens Research News. [online], [cit. 12.7.2010]. Dostupné z <*httphttp://www.siemens.com/innovation/en/news_events/ct_pressreleases/e_research_news/2010/e_22_resnews_1002_1.htm*>

[38] Osram. [online], [cit. 22.7.2010]. Dostupné z <*http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?act=showBookmark&favOid=000000000000010100010023&lang=en&catId=EN*>

[39] Výukový text FT UTB. *Záření absolutně černého tělesa*. [online], [cit. 28.7.2010]. Dostupné z < *http://fyzika.ft.utb.cz/prednasky/24%20zareni%20cerneho%20telesa.pdf*>

[40] GMelectronics. [online], [cit. 30.8.2010]. *Katalog*. Dostupné z <*http://www.gme.cz/cz/*>

[41] BRANČÍK, L. *Elektrotechnika 1*. Brno: VUT, 2004. 135 s. ISBN 80-214-2607-1. [cit. 8.9.2010].

[42] Relux. [online], [cit. 15.8.2010]. *Software ReluxSuite 2011.1*. Dostupné z <*http://www.relux.biz/*>

[43] Philips. [online], [cit. 24.8.2010]. *Katalog*. Dostupné z <*http://www.philipslumileds.com/*>

[44] Agilent. [online], [cit. 3.9.2010]. *Katalog*. Dostupné z <*http://www.agilent.com/*>

[45] FRÝZA, T., FEDRA, Z., ŠEBESTA, J. Mikroprocesorová technika. Počítačová cvičení. Elektronické skriptum. VUT v Brně, 2009, 80 stran. [online] [cit. 8.9 2010]. Dostupné z < *http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza*/>.

[46] Agilent. [online], [cit. 3.9.2010]. *Katalog*. Dostupné z <*http://www.agilent.com/*>

[47] DOBEŠ, Josef; ŽALUD, Václav. *Moderní radiotechnika* . 1. Praha : BEN, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.

[48] Perkinelmer. [online], [cit. 15.10.2010]. *Optické detektory*. Dostupné z <*http://www.perkinelmer.com/Family/Family/KeyName/PRO_SE_FAM_PIN%20Photodiodes%20for%20Industrial%20Applications_066*>

[49] HawlletPackard. [online], [cit. 23.10.2010]. *IR Optické prvky*. Dostupné z <*http://www.agilent.com/home/avagotechnologies.shtml*>

SEZNAM PŘÍLOH

A návrh zapojení a desek plošných spojů 104

A.1 Zapojení vysílače ve VIS části spektra/IR přijímače 104

A.2 Zapojení IR vysílače / VIS přijímače 106

A.3 DPS vysílače ve VIS části spektra/ IR přijímače 107

A.4 DPS IR vysílače / VIS přijímače 108

A.5 DPS děliče kmitočtu (f, f/2, f/4) 109

A.6 Schéma zapojení Tx/Rx 110

B Seznam součástek 111

B.1 Seznam ad. obr. A.1.4 111

B.2 Seznam ad. obr. A.1.5 112

B.3 Seznam ad. obr. A.1.8 112

B.4 Seznam ad. obr. A.1.6 a A.1.7 113

C Doplňující dokumentace 114

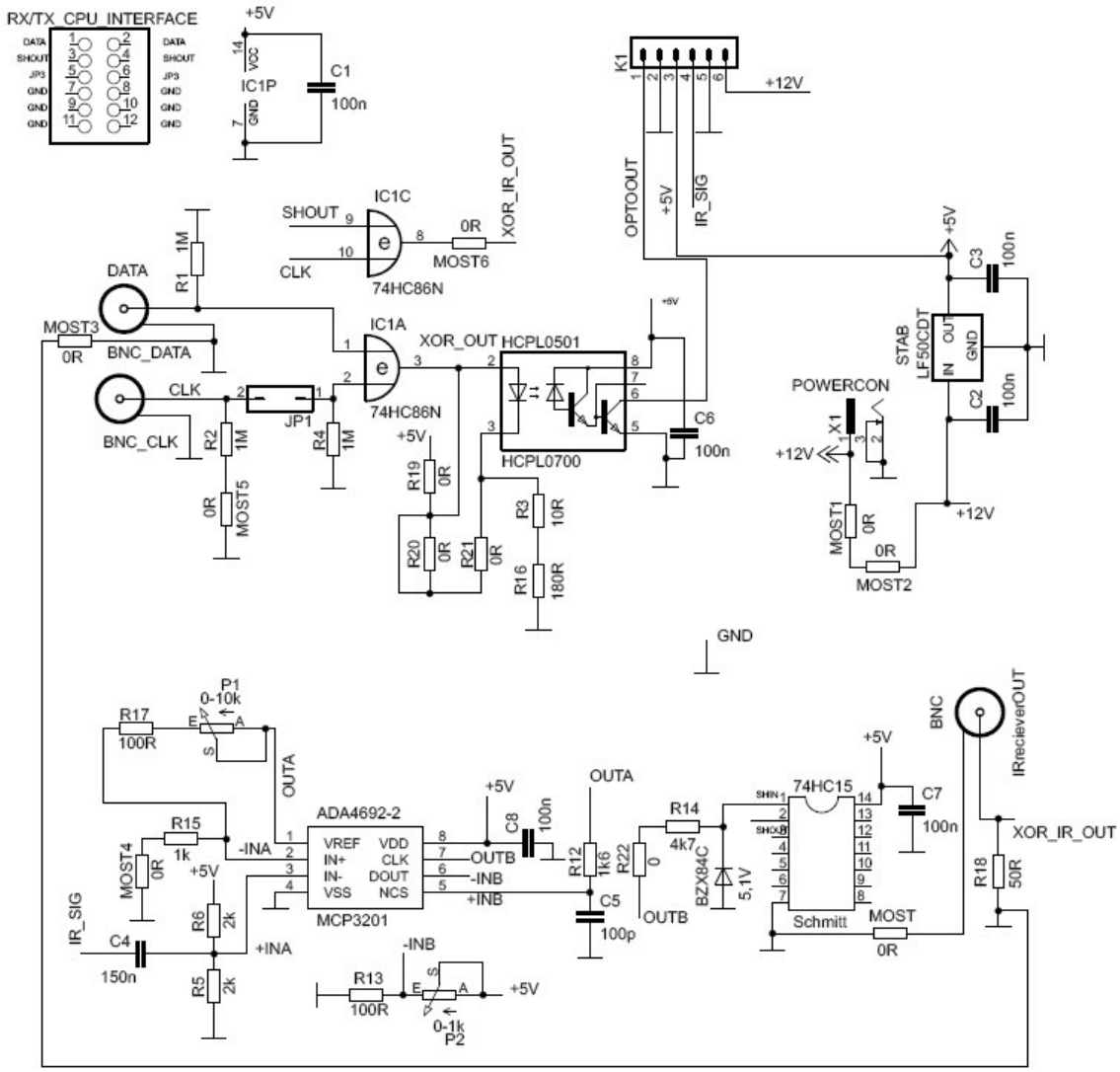
C.1 Spektrum LED Luxeon Rebel 114

D Výpočet osvětlení 115

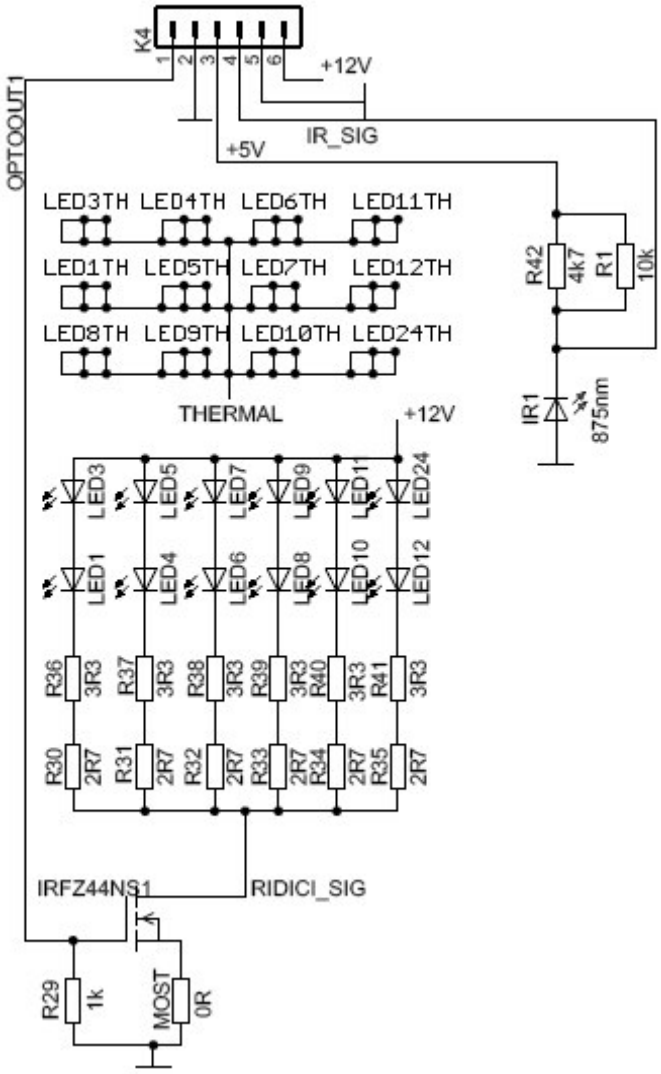
E Fotodokumentace 118

A NÁVRH ZAPOJENÍ A DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

A.1 Zapojení vysílače ve VIS části spektra/IR přijímače

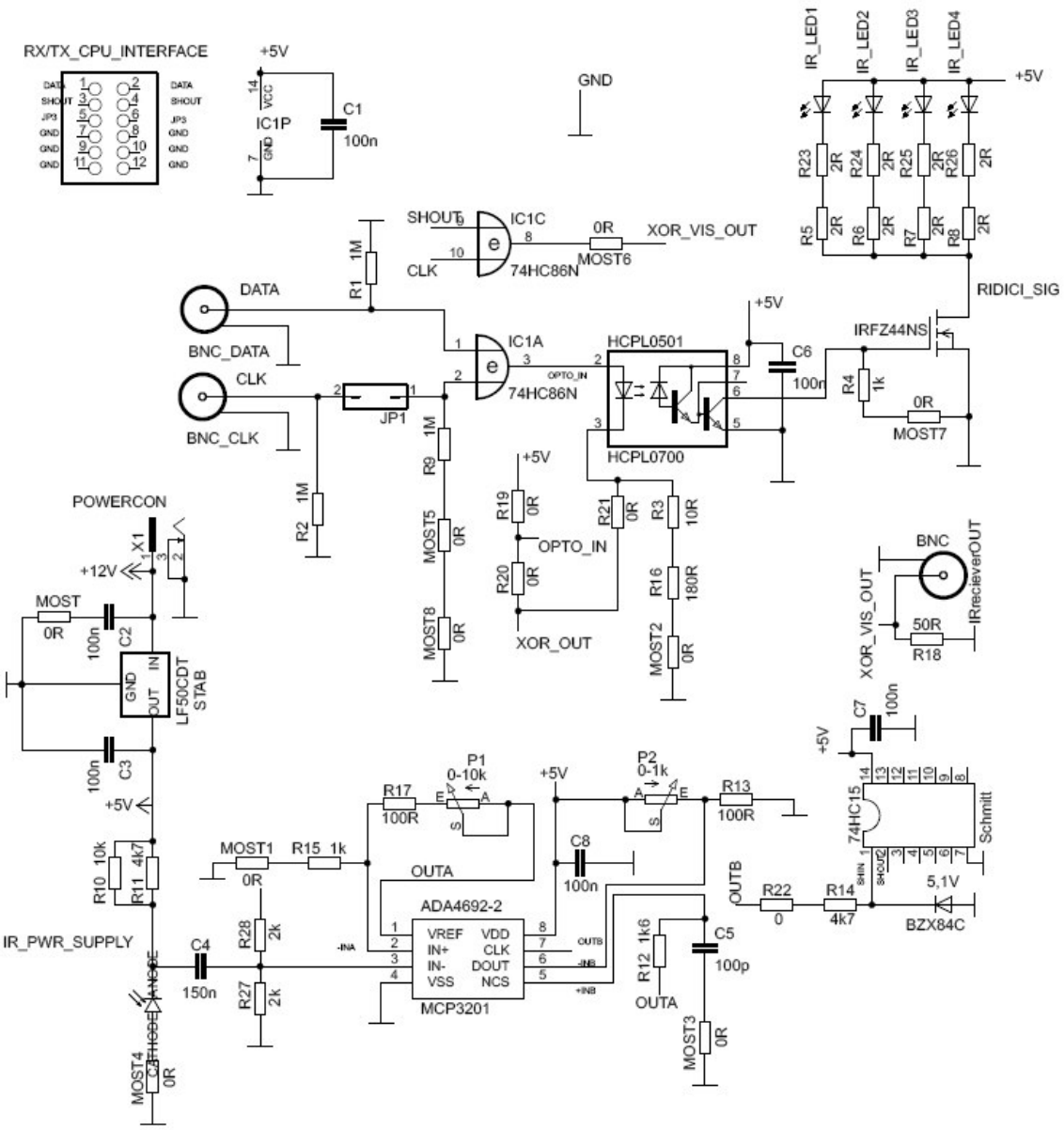


Obr. A.1.1: Zapojení řídící části vysílače VIS / přijímače IR.



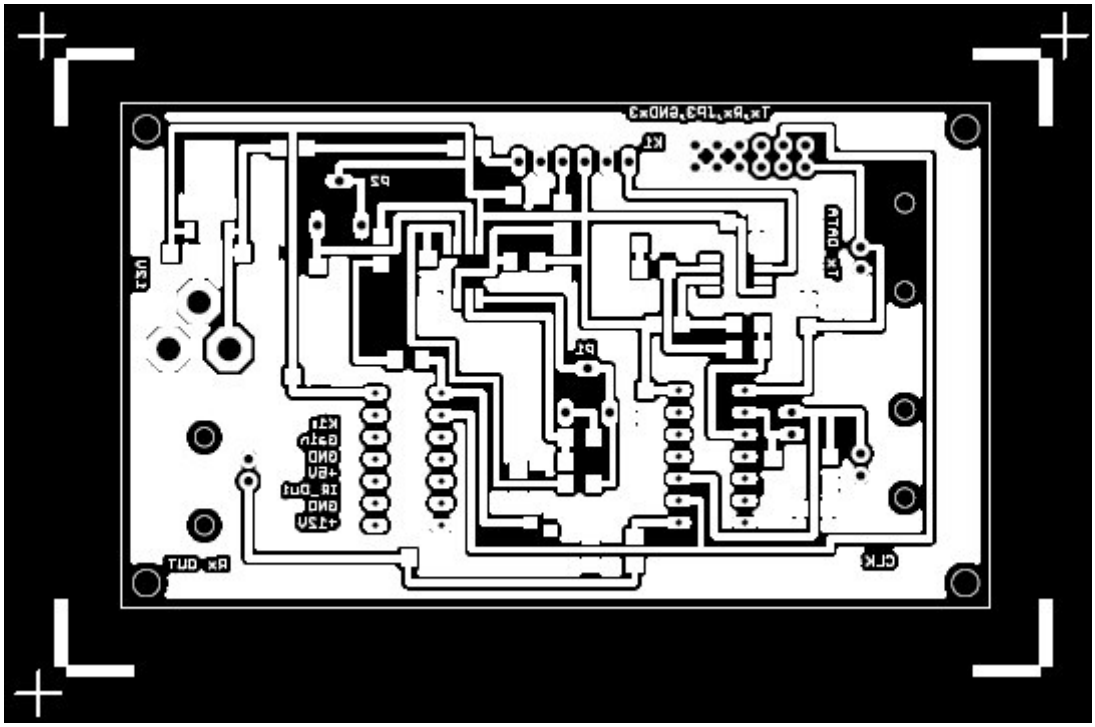
Obr. A.1.2: Zapojení optické části vysílače VIS / přijímače IR.

A.2 Zapojení IR vysílače / VIS přijímače

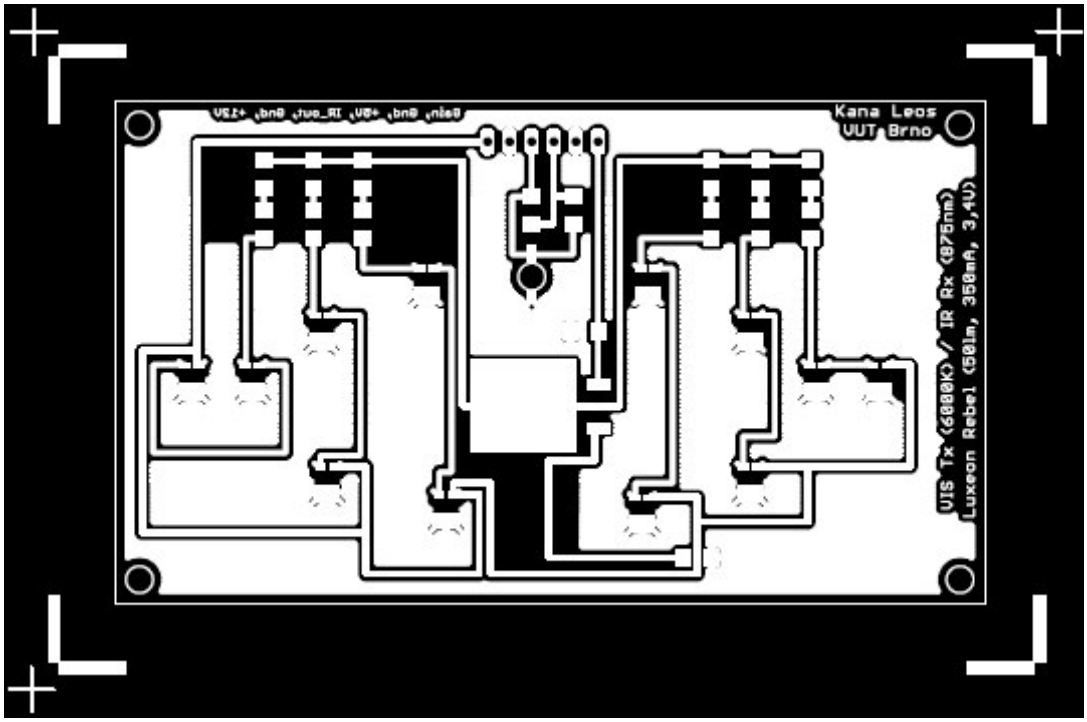


Obr. A.1.3: Zapojení řízení a optické části IR vysílače / VIS přijímače.

A.3 DPS vysílače ve VIS části spektra/ IR přijímače

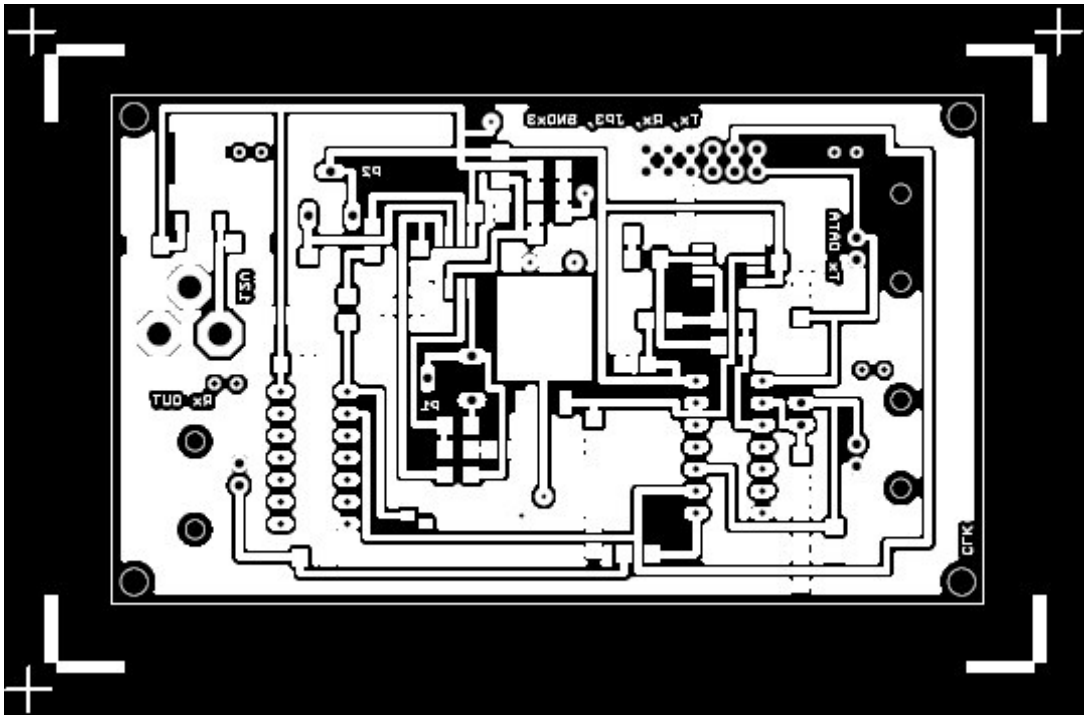


Obr. A.1.4: Deska plošných spojů řídící části VIS Tx / IR Rx (Top).

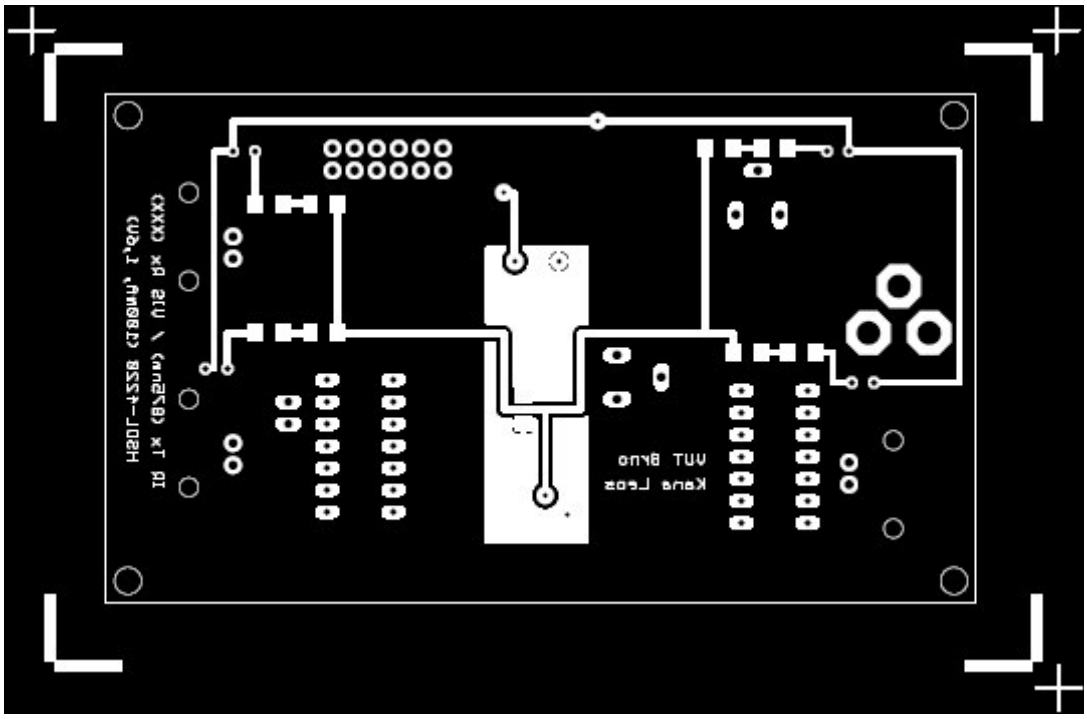


Obr. A.1.5: Deska plošných spojů optická část VIS Tx / IR Rx (Top).

A.4 DPS IR vysílače / VIS přijímače

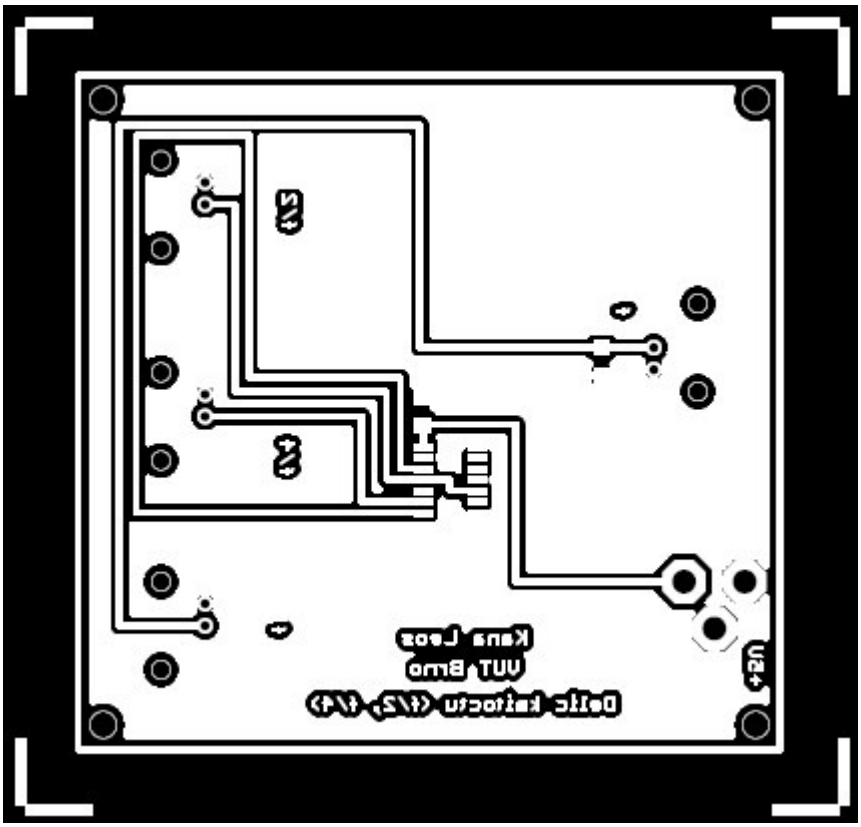


Obr. A.1.6: Deska plošných spojů řídící části VIS Rx / IR Tx - oboustranná (Top).



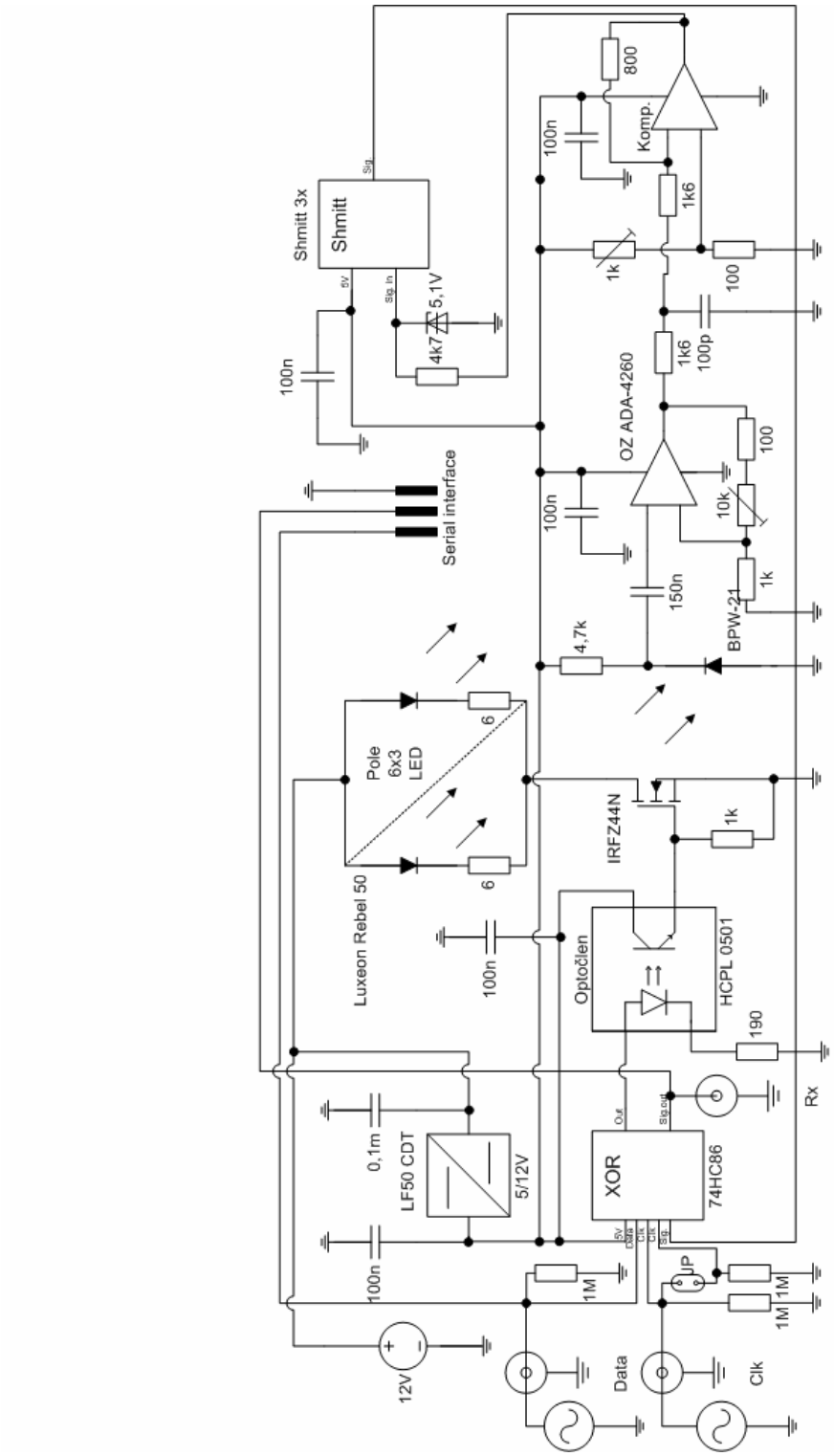
Obr. A.1.7: Deska plošných spojů optická část VIS Rx / IR Tx - oboustranná (Top).

A.5 DPS děliče kmitočtu (f, f/2, f/4)



Obr. A.1.8: DPS dělič kmitočtu (f, f/2, f/4) pomocí D-KO.

A.6 Schéma zapojení Tx/Rx



Obr. A.1.9: Schéma zapojení vysílače a přijímače v rámci modulu vysílajícího ve VIS.

B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Seznam ad. obr. A.1.4

Part	Value	Package
74HC15	Schmitt	DIL14
ADA4692-2		SO-8
BNC	IRrecieverOUT	BNC-DPS-90
BNC_CLK	CLK	BNC-DPS-90
BNC_DATA	DATA	BNC-DPS-90
BZX84C	5,1V	SOT23
C1	100n	1206
C2	100n	1206
C3	100n	1206
C4	150n	1206
C5	100p	1206
C6	100n	1206
C7	100n	1206
C8	100n	1206
HCPL0501	HCPL0700	SOIC08
IC1	74HC86N	DIL14
JP1		JP1
K1		PSH02-06W
MOST	0R	1206
MOST1	0R	1206
MOST2	0R	1206
MOST3	0R	1206
MOST4	0R	1206
MOST5	0R	1206
MOST6	0R	1206
P1	0-10k	PT6V
P2	0-1k	PT6V
R1	1M	1206
R2	1M	1206
R3	10R	1206
R4	1M	1206
R5	2k	1206
R6	2k	1206
R12	1k6	1206
R13	100R	1206
R14	4k7	1206
R15	1k	1206
R16	180R	1206
R17	100R	1206
R18	50R	1206
R19	0R	1206
R20	0R	1206
R21	0R	1206
R22	0R	1206
RX/TX_CPU_INTERFACE		2X06
STAB	LF50CDT	DPACK
X1	POWERCON	POWERCON

B.2 Seznam ad. obr. A.1.5

Part	Value	Package
IR1	875nm	LED3MM-D
IRFZ44NS1		TO263
K4		PSH02-06W
LED1	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED3	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED4	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED5	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED6	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED7	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED8	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED9	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED10	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED11	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED12	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
LED24	LUXEON_REBEL	LUXEON_REBEL
PREMOSTENI	0R	1206
R1	10k	1206
R29	1k	1206
R30	2R7	1206
R31	2R7	1206
R32	2R7	1206
R33	2R7	1206
R34	2R7	1206
R35	2R7	1206
R36	3R3	1206
R37	3R3	1206
R38	3R3	1206
R39	3R3	1206
R40	3R3	1206
R41	3R3	1206
R42	4k7	1206

B.3 Seznam ad. obr. A.1.8

Part	Value	Package
C1	100n	1206
IC1	74AC74D	SO14
R1	1M	1206
X1		BNC-DPS-90
X2	POWERCON	POWERCON
X3		BNC-DPS-90
X4		BNC-DPS-90
X5		BNC-DPS-90

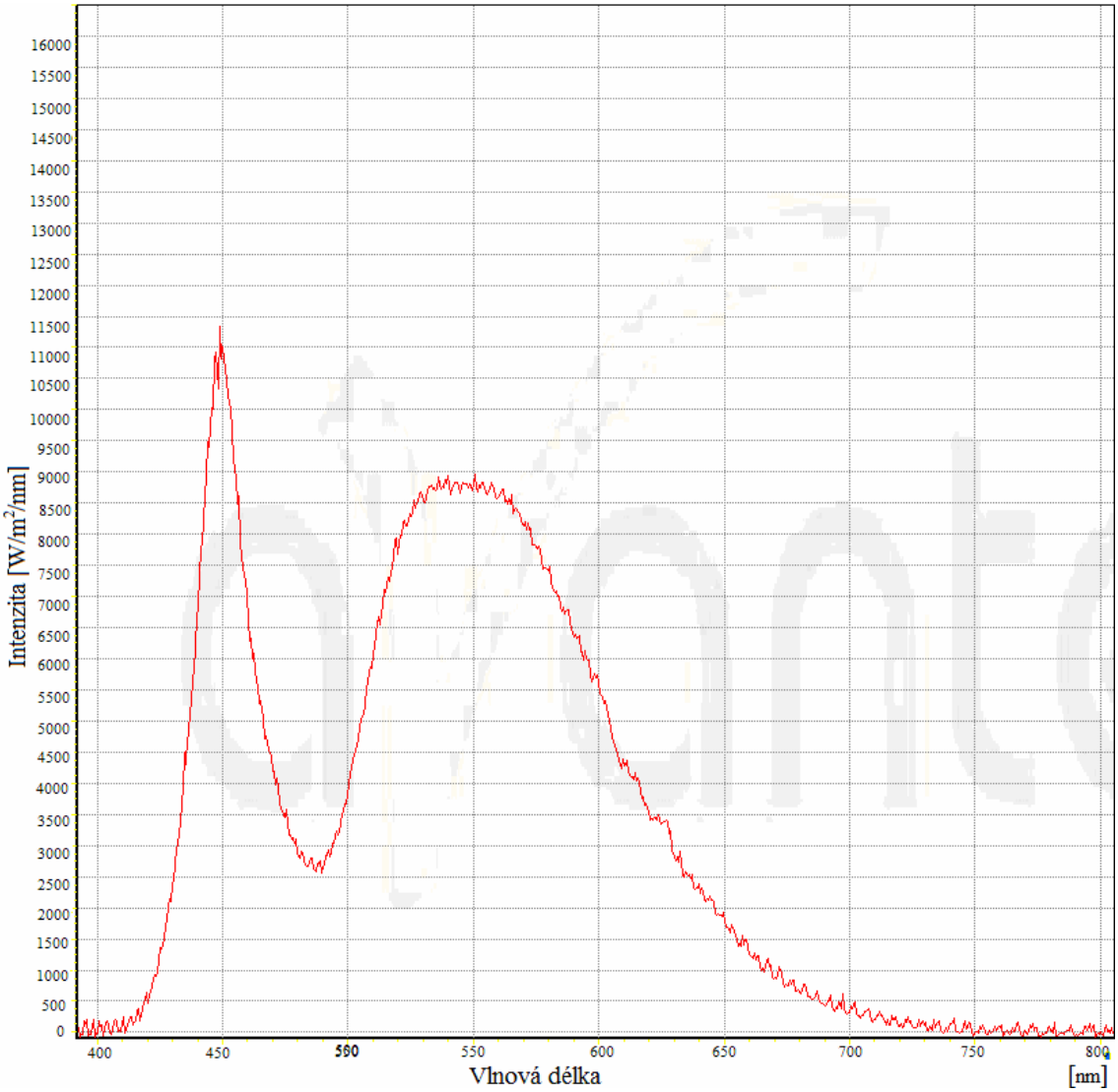
B.4 Seznam ad. obr. A.1.6 a A.1.7

Part	Value	Package
74HC15	Schmitt	DIL14
ADA4692-2	MCP3201	SO-8
BNC	IRrecieverOUT	BNC-DPS-90
BNC_CLK	CLK	BNC-DPS-90
BNC_DATA	DATA	BNC-DPS-90
BZX84C	5,1V	SOT23
C1	100n	1206
C2	100n	1206
C3	100n	1206
C4	150n	1206
C5	100p	1206
C6	100n	1206
C7	100n	1206
C8	100n	1206
HCPL0501	HCPL0700	SOIC08
IC1	74HC86N	DIL14
IRFZ44NS		TO263
IR_LED1		LED5MM
IR_LED2		LED5MM
IR_LED3		LED5MM
IR_LED4		LED5MM
JP1		JP1
P1	0-10k	PT6V
P2	0-1k	PT6V
PREMOSTENI	0R	1206
PREMOSTENI1	0R	1206
PREMOSTENI2	0R	1206
PREMOSTENI3	0R	1206
PREMOSTENI4	0R	1206
PREMOSTENI5	0R	1206
PREMOSTENI6	0R	1206
PREMOSTENI7	0R	1206
PREMOSTENI8	0R	1206
R1	1M	1206
R2	1M	1206
R3	10R	1206
R4	1k	1206
R5	2R	1206
R6	2R	1206
R7	2R	1206
R8	2R	1206
R9	1M	1206
R10	10k	1206
R11	4k7	1206
R12	1k6	1206
R13	100R	1206
R14	4k7	1206
R15	1k	1206
R16	180R	1206
R17	100R	1206
R18	50R	1206
R19	0R	1206
R20	0R	1206
R21	0R	1206

R22	0	1206
R23	2R	1206
R24	2R	1206
R25	2R	1206
R26	2R	1206
R27	2k	1206
R28	2k	1206
RX/TX_CPU_INTERFACE		2X06
STAB	LF50CDT	DPACK
FD		BPW21-TO-5

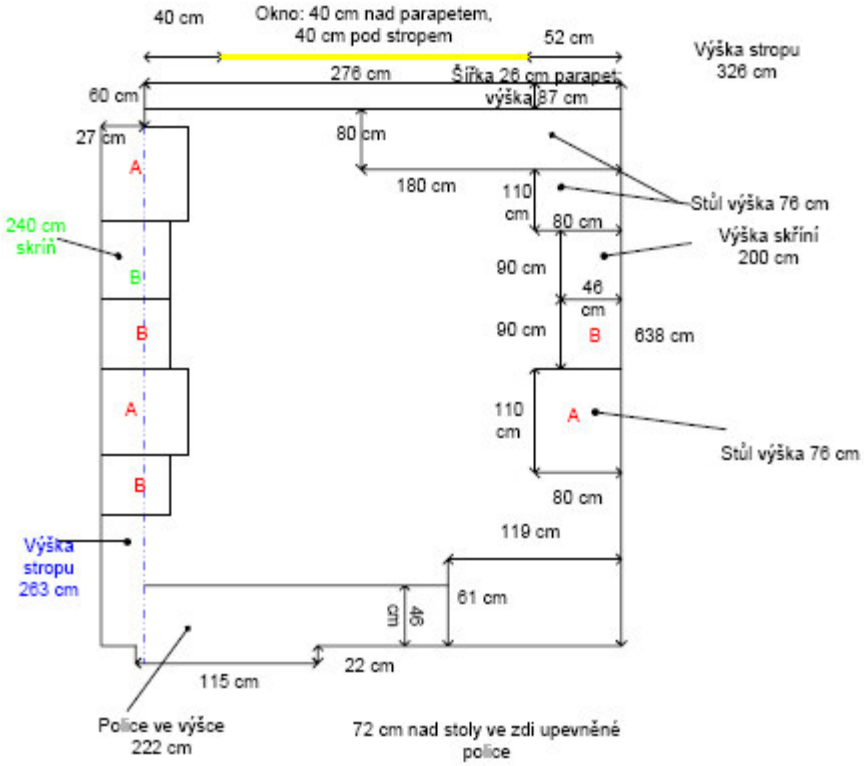
C DOPLŇUJÍCÍ DOKUMENTACE

C.1 Spektrum LED Luxeon Rebel



Obr. C.1.1: Spektrum LED Luxeon Rebel s dominantní vlnovou délkou λ=450 resp. 540nm

D VÝPOČET OSVĚTLENÍ



Obr. D.1.1: Náčrt půdorysu místnosti č. 546. Není v měřítku.

Pro přehlednost jsou níže uvedeny rozměry místnosti:

a= 2,76 resp. 3,03m

b= 6,38 resp. 5,78m

v= 3,26m

Po dosazení do vztahů 3.1 - 3.12 dostáváme pro LED s parametry viz. tab. D.3.1.

$$S = a * b = (6{,}38 * 2{,}76) + (0{,}27 * 5{,}78) = 19{,}1694 m^2 \quad \text{(D.1)}$$

$$m = \frac{a}{h} = \frac{2{,}76}{2{,}4} = 1{,}15 \quad \text{(D.2)}$$

$$P = U * I = 3{,}1 * 20E^{-3} = 62[mW] \quad \text{(D.3)}$$

$$\eta_{opt} = \frac{P_{1W} . \phi_{typ}}{P_{typ}} = \frac{1.0,32}{0,064} = 5,16[lm/W_{el}] \quad (D.4)$$

$$P_{opt} = \frac{1}{683} . \frac{1}{y} = \frac{1}{683} . \frac{1}{0,6708} = 2,182[mW] \quad (D.5)$$

$$K = \frac{(\Sigma K_i * S_i)}{\Sigma S_i} = \frac{51941460}{776864} = 66,86\% \approx 67\% \quad (D.6)$$

$$P = P_m * (\frac{E_{pož.}}{10 * \eta}) * S = 5 * (\frac{500}{10 * 6}) * 19,17 = 790W_{el} \quad (D.7)$$

A potom pokud má jedna LED příkon *80mW* potažmo *62mW* bude pro normované osvětlení místnosti na hodnotu 500lx potřeba *n≈9500* kusů LED diod. Pokud by však místnost měla být osvětlena 300lx bylo by zapotřebí *n≈5500* kusů LED diod.

Parametr	**Mezní hodnoty**	**Jednotka**	**Poznámka**
Propustný proud I_F	20	mA	mA
Propustné napětí U_F	3,1	V	typ.hodnota
Spotřeba	80	mW	$T_A=25^0C$
Teplota barvy	5600	K	
Vyzařovací úhel	40	deg.	
Světelná účinnost	6	lm/W	při I_F=10mA
Svítivost	180-450	mcd	při I_F=10mA
Světelný tok	320	mlm	při I_F=10mA
Pouzdro	3	mm	T1

Tab. D.1.1: Parametry LED LW 3333 udávané výrobcem. Kompletní datasheet viz. [38]

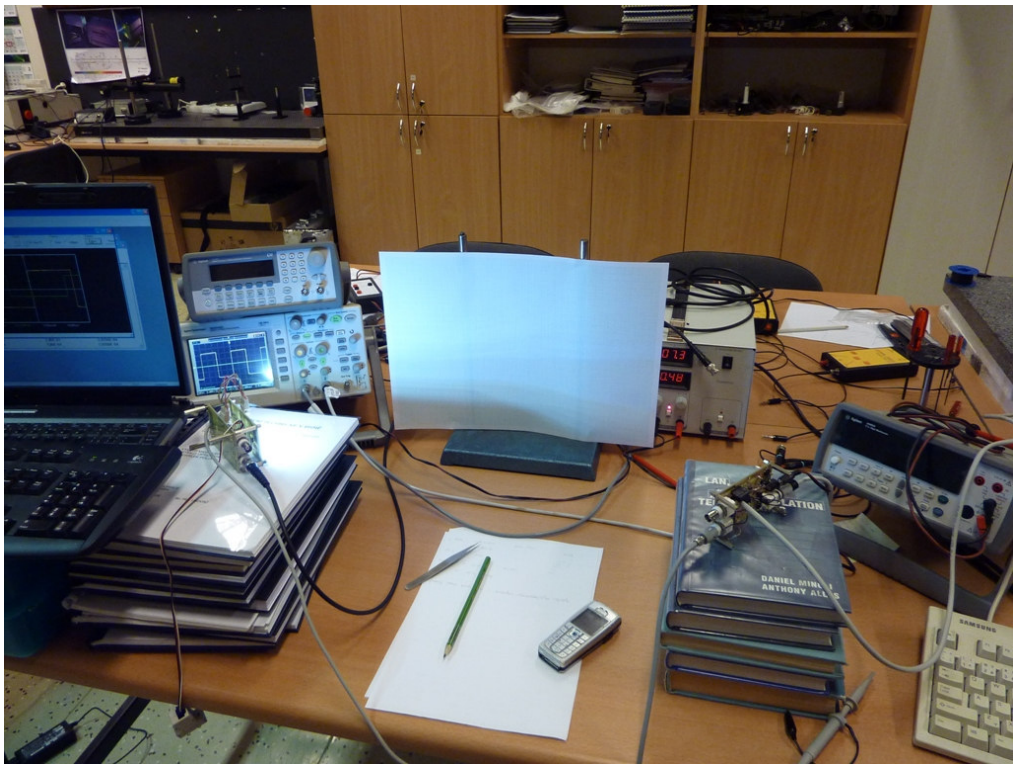
	Rozměr (š x v)	**Plocha Si [cm2]**	**Koeficient odrazivosti [34]**	**Koef. * plocha Σ(Ki*Si)**	**Poznámka**
Stěna č.1					
Celkem	276 x 326	89976			
Okna	184 x 160	29440	7%	206080	čiré sklo
Stůl	180 x 76	13680	40%	547200	světlé dřevo (překližka)
Volná plocha		46856	80%	3748480	bílá barva
Stěna č.2					
Celkem	578 x 326	188428			
Stůl 2x	(110 x 76)x2	16720	45%	752400	světlé dřevo (překližka)

Skříň 2x	(90 x 200)x2	36000	40%	1440000	světlé dřevo
Skříň	90 x 240	21600	40%	864000	světlé dřevo
Police 2x	(100 x 240)x2	8000	20%	160000	světlé dřevo + uvažováno zaplnění knihami
Volná plocha		106100	80%	8488000	bílá barva
Stěna č.3					
Celkem	638 x 326	207988			
Stůl	190 x 76	14440	45%	649800	světlé dřevo (překližka)
Stůl	110 x 76	8360	45%	376200	světlé dřevo (překližka)
Skříň 2x	(90 x 200)x2	36000	40%	1440000	světlé dřevo
Police 2x	(100 x 40)x2	8000	10%	80000	světlé dřevo + uvažováno zaplnění knihami
Police	61 x 50	3050	40%	122000	světlé dřevo + uvažováno zaplnění knihami
Volná plocha		138138	80%	11051040	bílá barva
Stěna č.4					
Celkem	303 x 326	98778			
Dveře	115 x 200	23000	45%	1035000	světlé dřevo
Police	119 x 50	5950	10%	57500	světlé dřevo + uvažováno zaplnění knihami
Police	157 x 50	7850	80%	628000	světlé dřevo + uvažováno zaplnění knihami
Volná plocha		61978	80%	4958240	bílá barva
Strop	(276x638)+27.58	191694	80%	15335520	bílá barva
		Σ 776864	**Φ≈48%**	**51941460**	

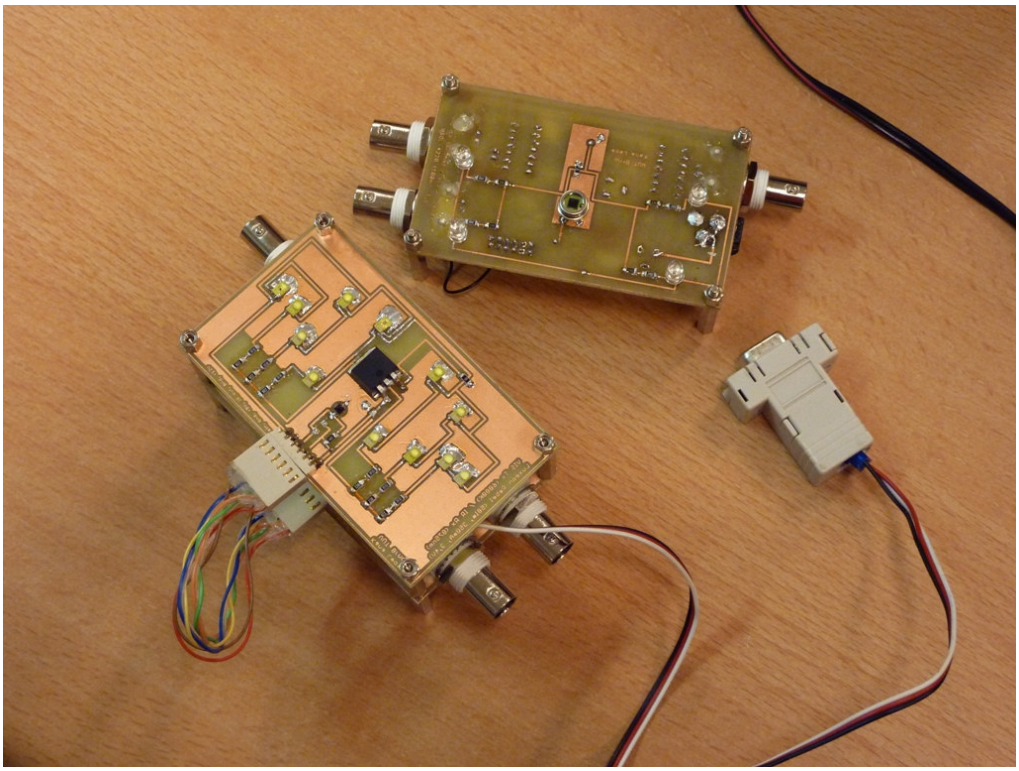
Tab. D.1.2: Analýza odrazivosti ploch místnosti č. 546 adresa Purkyňova 118, Brno 612 00.

Je nutno zdůraznit, že výpočet je pouze orientační a v praxi se používají mnohem sofistikovanější postupy zahrnující široké vlivy okolí a podobně. Výpočet je tak mnohem komplexnější a jak jsme již zdůraznil, zpravidla je realizován návrhovými programy, které tyto všechny parametry uvažují. Já jsem tento orientační výpočet provedl pouze s ohledem na to, že nepoužívám žádné typizované svítidlo s garantovanými charakteristikami a parametry, tak aby bylo možno jej umístit do vývojového prostředí návrhového programu. Volil jsem tedy tuto cestu.

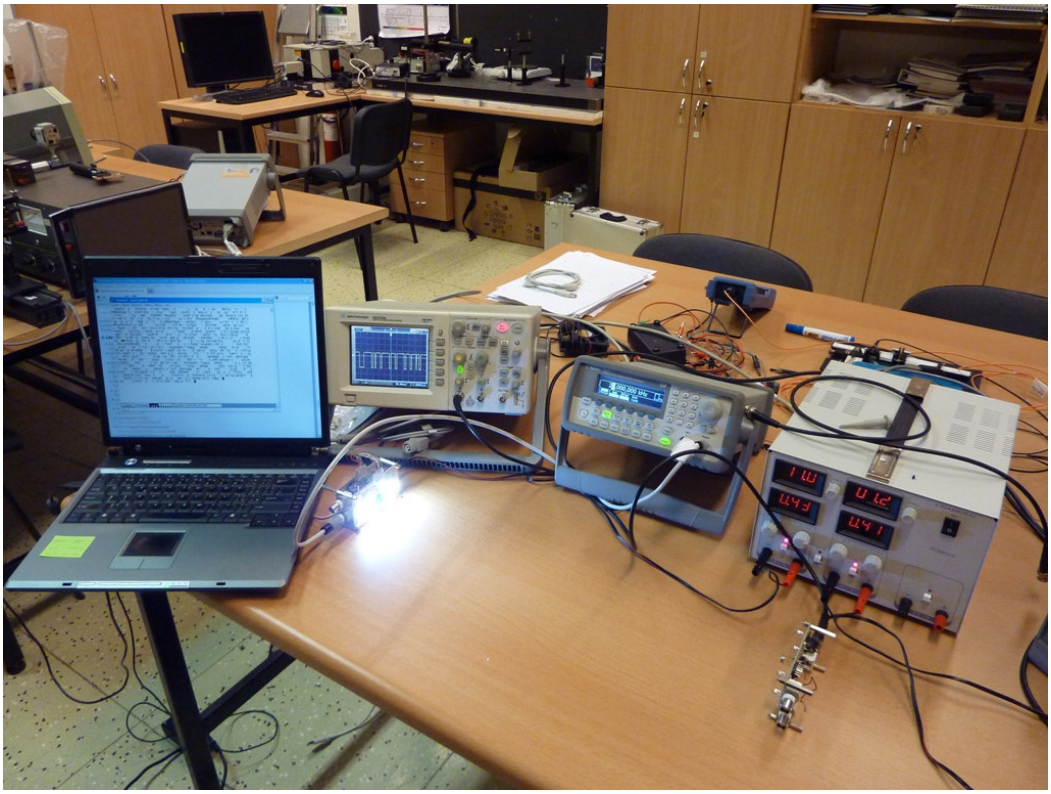
E FOTODOKUMENTACE



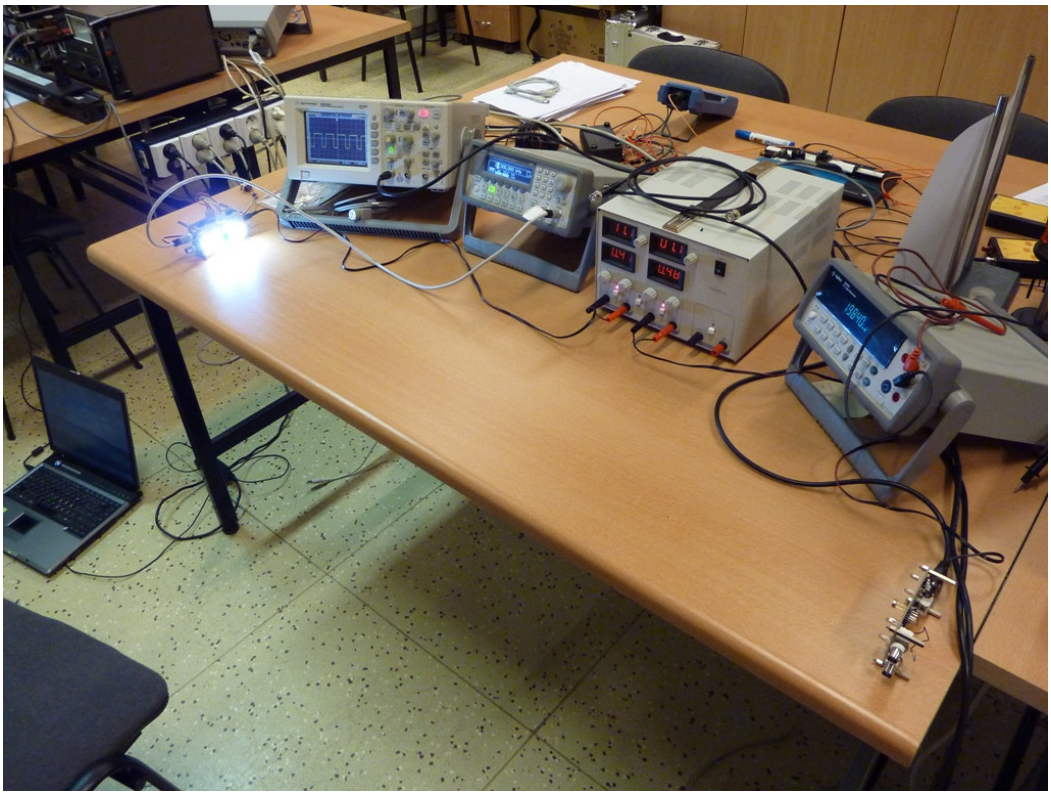
Obr. E.1.1: Měření spoje pro přímou a nepřímou cestu šíření.



Obr. E.1.2: Moduly vysílače a přijímače.



Obr. E.1.3 Sériový přenos. N pozadí je na osciloskopu zastaven průběh detekovaný na výstupním BNC konektoru.



Obr. E.1.4: Přenos signálu na vzdálenost 1,7m.