

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Tomáš Marčák



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

CHARAKTERISTIKA ATMOSFÉRY MARSU PRO OPTICKOU KOMUNIKACI

CHARACTERISTICS OF THE ATMOSPHERE OF MARS FOR OPTICAL COMMUNICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Marčák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Tomáš Marčák

ID: 221040

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Charakteristika atmosféry Marsu pro optickou komunikaci

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a detailně popište vlastnosti, parametry a časovou a prostorovou charakteristiku atmosférického přenosového prostředí Marsu. Zaměřte se na složení této atmosféry, definujte atmosférická okna propustnosti. Prozkoumejte charakteristiku aerosolů a zaměřte se na meteorologické vlastnosti této atmosféry. Stanovte vliv přenosového prostředí Marsu na optický svazek. Navrhněte matematický aparát pro kvantifikaci interakce mezi atmosférou Marsu a optickými svazky. Určete vhodné vlnové délky optického záření pro komunikační účely. Vytvořte program pro výpočet časových, prostorových a energetických vlastností optického svazku, který se bude šířit po vámi definované trase na Marsu. V programu umožněte definici charakteristiky vysílače a přijímače a příjímacího místa (např. výška umístění jednotek nad povrchem) a nastavení parametrů vysílače a přijímače (např. vlnová délka, velikosti čoček).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE, 1998.
- [2] MAJUMDAR, A. K., RICKLIN J. C. Free - Space Laser Communications: Principles and Advantages, New York: Springer, 2008.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 1.6.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou a skúmaním atmosféry Marsu pre optickú bezdrôtovú komunikáciu. Cieľom tejto práce bolo predstaviť atmosférické prenosové prostredie planéty Mars a stanoviť možné vlnové dĺžky, ktoré by sa dali využiť pri prípadnej komunikácii. V práci je prvotne predstavená optická komunikácia a základné fakty o atmosfére planéty. Jadro práce je venované podrobnejšiemu rozboru zloženia atmosféry, vplyv zloženia atmosféry na prenos žiarenia a výsledky výpočtov s charakteristikami atmosférického prenosového prostredia Marsu. Ďalej je spracovaná základná teória o rôznych optických vysieláčoch a ich rozdeleniu. Následne je práca venovaná programu pre výpočet časových, priestorových a energetických vlastností optického zväzku.

Kľúčové slová

atmosféra, Mars, planéta, priepustnosť atmosféry, optická komunikácia, prenosové spektrum, absorpcia, rozptyl, atmosférický útlm

Abstract

The bachelor thesis is focused on the issue and research of atmosphere of the planet Mars for optical communication. The main goal of this thesis was to introduce the transmission through the atmosphere of the Mars and define possible wavelengths which could be used as possible communication. This thesis mainly introduces the optical communication and facts about the atmosphere of the planet. The main chapter presents more detailed analysis of composition of the atmosphere, the impact of the composition that is used for the radiation transmission. Lastly there are presented the results of the calculations and characteristics of the transmission through the Mars atmosphere. The next chapter is focused on theory of optical transmitters and its division. Subsequently, thesis describes the program for calculation of temporal, spatial and energetic characteristics of optical beam.

Keywords

atmosphere, Mars, planet, atmospheric permeability, optical communication, transmission spectrum, absorption, scattering, atmospheric attenuation

Bibliografická citácia

MARČÁK, Tomáš. *Charakteristika atmosféry Marsu pro optickou komunikaci* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141510>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Lucie Hudcová.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Tomáš Marčák*

VUT ID studenta: *221040*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: *Charakteristika atmosféry Marsu pro optickou komunikaci*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce 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:

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcej mojej bakalárskej práce pani doc. Ing. Lucii Hudcovej, Ph.D. za účinnú odbornú a pedagogickú pomoc, motiváciu, podnetné návrhy, trpezlivosť a povzbudivé slová počas riešenia tejto práce.

V Brne dňa:

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	11
ÚVOD	12
1. PRINCÍPY OPTICKEJ KOMUNIKÁCIE.....	13
1.1 TEÓRIA OPTICKEJ KOMUNIKÁCIE.....	13
1.2 OPTICKÉ BEZDRÔTOVÉ SPOJE SÚČASNOSTI.....	14
1.3 ATMOSFÉRICKÉ PRENOSOVÉ PROSTREDIE	16
1.3.1 Útlmy v atmosfére	16
1.3.2 Rozptyly v atmosfére	17
1.3.3 Šumy.....	19
1.3.4 Atmosférická turbulencia	20
1.4 ATMOSFÉRICKÉ OKNÁ PRIEPUSTNOSTI	21
1.5 ZHRNUTIE KAPITOLY	22
2. ATMOSFÉRA MARSU.....	23
2.1 FYZIKÁLNE VLASTNOSTI PLANÉTY MARS	23
2.2 ROZDELENIE A MODEL VRSTIEV ATMOSFÉRY MARSU	24
2.3 ZLOŽENIE ATMOSFÉRY MARSU	26
2.4 POROVNANIE ATMOSFÉRY MARSU A ZEME.....	27
2.5 METEOROLOGICKÉ VLASTNOSTI ATMOSFÉRY.....	29
2.6 ZHRNUTIE KAPITOLY	31
3. PRENOSOVÉ PROSTREDIE MARSU.....	32
3.1 KONCENTRÁCIA MOLEKÚL V ATMOSFÉRE	32
3.2 PRENOSOVÉ SPEKTRUM ATMOSFÉRY MARSU A URČENIE VHODNÝCH VLNŮVÝCH DĹŽOK	34
3.3 ZHRNUTIE KAPITOLY	37
4. OPTICKÉ VYSIELAČE	40
4.1 LASER	40
4.2 TYPY LASEROV.....	41
4.3 LASEROVÉ DIÓDY	44
4.4 PREHEAD TYPOV LASEROVÝCH DIÓD.....	45
4.5 APLIKÁCIE LASEROVÝCH DIÓD V PRAXI.....	46
5. NÁVRH PROGRAMU PRE VÝPOČET ENERGETICKEJ BILANCIE OPTICKÉHO SPOJA V PROSTREDÍ MARSU	47
5.1 NÁVRH OPTICKÉHO BEZKÁBLOVÉHO SPOJA.....	47
5.2 PROGRAM PRE NÁVRH ENERGETICKEJ BILANCIE OPTICKÉHO SPOJA.....	50
5.2.1 Jednotlivé časti programu.....	50
5.2.2 Matematický výpočet energetickej bilancie optického spoja.....	54
5.3 MODELOVÁ SITUÁCIA NÁVRHU 1	56
5.4 MODELOVÁ SITUÁCIA NÁVRHU 2	60
6. ZÁVER.....	64

LITERATÚRA.....	66
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	73
ZOZNAM PRÍLOH.....	76

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Porovnanie odchýlky komunikácie. Na obrázku je zobrazené porovnanie odchýlky laserového zväzku pri optickej a rádio-frekvenčnej komunikácii. Na prvý pohľad je zrejmé, že optická komunikácia je o niečo presnejšia [1], [4].....	14
1.2	Všeobecné poukázanie na rozptyl svetla na častici. Je zobrazený smer šírenia svetla, ktorý narazí na časticu a následne sa rozptýli [17].....	18
1.3	Rozptyl častíc Nasledujúci obrázok poukazuje vo všeobecnosti na Rayleighov a Mieov rozptyl častíc. Ilustrácia ukazuje smer šírenia žiarenia a približný teoretický rozptyl na častici [18].	19
1.4	Vyžiarený optický zväzok so zmenou trasy z dôvodu turbulencie.....	20
1.5	Atmosférická okná priepustnosti a ich opis. Horná vrstva zemskej atmosféry je schopná blokovat' Gamma žiarenia, Röntgenové žiarenia a väčšinu ultrafialového svetla. Zaujímavosťou je, že viditeľné svetlo prechádza voľne atmosférou [28].	22
2.1	Porovnanie z hľadiska rozdelenia atmosféry podľa výšky a ich súčasti. Je zrejmé že atmosféra Marsu je niekoľko násobne tenšia ako atmosféra Zeme [16], [40].	25
2.2	Zobrazenie možného cyklu a vzniku metánu v atmosfére Marsu. Ako už bolo spomenuté, metán je pravdepodobne vytváraný mikróbmi alebo geologickou činnosťou na povrchu Marsu [45], [50]. ..	27
2.3	Porovnanie Zemskej atmosféry Marsu, na ktorej je zobrazená percentuálna koncentrácia hlavných molekúl atmosféry a ostatné súčasti atmosfér [43].....	28
2.4	Porovnanie intenzity slnečného žiarenia na Zemi a Marse [44].	29
2.5	Obrázok poukazuje na prachovú búrku, ktorá bola zachytená sondou Mars Global Surveyor (MGS) v roku 2001. Z obrázka sa dá vyčítať ako časom búrka naberala na sile a postupne zakrývala celú planétu. Z tejto série snímok sa dá určiť približná teplota a množstvo prachu, ktoré bolo prítomné. Modrá farba reprezentuje pomerne čistú oblohu a červená farba poukazuje už na zvýšené množstvo prachových častíc [38], [49].	30
3.1	Zjednodušený obrázok prenosu signálu cez optické filtre, ktoré sú zobrazené ako molekuly prvkov, ktoré sú prítomné v atmosfére.	34
3.2	Teoretické predpoklady transmitancie oxidu dusnatého, ktorý neprepúšťa hlavne vlnové dĺžky od 4 do 6 μm . Ďalšie menšie vrcholy, ktoré by mohli narušiť komunikáciu sa nachádzajú v oblasti okolo 8 μm [35], [53].	35
3.3	Transmitančné spektrum oxidu uhličitého. Modrou farbou je naznačená priepustnosť samostatného oxidu uhličitého a oranžovou farbou je zobrazený oxid uhličitý spolu s prachovými časticami, ktoré sú taktiež v atmosfére Marsu prítomné. Najväčším absorpčným pásmom sa z charakteristiky javí približne 15 μm [35], [52], [54].	36
3.4	Celková priepustnosť atmosféry Marsu [3], [35], [38], [52], [53], [54].	37
3.5	Celkové transmitančné spektrum atmosféry Marsu [35].	38
3.6	Celkové transmitančné spektrum atmosféry Marsu [55], [56].	39
4.1	Časti laseru a jeho zloženie [60].	41
4.2	Všeobecný prehľad laserov a vlnových dĺžok [64].	42
4.3	Rozdelenie laserov podľa aktívnej látky [3], [58], [59], [61].	44
4.4	Svetelná charakteristika laserovej diódy [69].	45
5.1	Schéma vysielačnej jednotky a zobrazenie α_{L-TL} útlmu na väzbe laser – vysielačnica šošovka, α_{TL} útlm na vysielačnej šošovke a α_{CW} útlm na vysielačnom krycom skle [3], [72], [75].	48
5.2	Schéma prijímacej jednotky a zobrazenie α_{CW2} útlmu na krycom skle, α_{RL} útlm na prijímacej šošovke, α_{IF} útlm na interferenčnom filtre a α_{PD-RL} útlm na prijímacej šošovke a fotodetektoru. Zisk na prijímacej šošovke zobrazuje ρ_{RL} [3], [72], [75].	49
5.3	Vývojový diagram programu pre výpočet energetickej bilancie optického spoja.	50
5.4	Zobrazenie programu spolu s jednotlivými časťami pre okno Manual.	51

5.5	Zobrazenie programu spolu s jednotlivými časťami pre okno Automat.	52
5.6	Legenda popisujúca jednotlivé časti bilančného grafu.	53
5.7	Legenda popisujúca graf pre prenos prostredím.	53
5.8	Tlačidlá na zobrazenie jednotlivých transmitancií.	53
5.9	Tlačidlá Plot, Clear a Close v manuálnej časti.	54
5.10	Tlačidlá Plot, Clear, Close a Load values v automatickej časti.	54
5.11	Zadané vstupné hodnoty pre optický vysielač.	56
5.12	Zadané vstupné hodnoty pre optický prijímač.	57
5.13	Zadané hodnoty pre prenos.	57
5.14	Výstupné hodnoty získané programom.	58
5.15	Grafické spracovanie návrhu.	59
5.16	Okno celého programu pri návrhu optického spoja.	59
5.17	Automatický výber vstupných hodnôt.	61
5.18	Útlmy krycieho skla vysielačieho a prijímacieho a útlm IF filtra s doplnenými hodnotami.	61
5.19	Hodnoty pre prenos zväzku.	62
5.20	Výsledné hodnoty pre návrh číslo 2.	62
5.21	Grafické spracovanie návrhu číslo 2.	63
5.22	Okno celého programu pri návrhu optického spoja číslo 2.	63

ZOZNAM TABULIEK

1.1	Porovnanie zloženia atmosféry Zeme a Marsu [38], [42], [43].....	26
3.1	Porovnanie gravitačného zrýchlenia a povrchového atmosférického tlaku planéty Mars a planéty Zem. Tieto konštanty boli použité pri teoretických výpočtoch koncentrácií molekúl v atmosfére [35], [38], [46].....	33
3.2	Porovnanie koncentrácie molekúl v atmosfére Marsu a Zeme, ktoré boli dosiahnuté podľa teoretických výpočtov z dostupných dát [36], [37], [38], [41], [42], [43].....	33
3.3	Porovnanie základných vlastností medzi planétami, ktoré boli použité a brané do úvahy pri teoretických výpočtoch [35], [38], [36], [46].....	34
4.1	Príklady z dostupných a používaných laserov v optickej komunikácii [4], [67], [68].	43
5.1	Výber vysielacích šošoviek v programe [4], [77], [78], [79].	60
5.2	Výber prijímacích šošoviek v programe [4], [77], [78], [79].	60

ÚVOD

V moderných sieťach poskytuje optická komunikácia enormnú kapacitu, rýchlosť a flexibilitu. Pomerne rýchly rast internetu viedol rôzne spoločnosti k investíciám do širokopásmových optických sietí, ktoré teraz pokrývajú celú planétu. Veľká revolúcia v oblasti komunikácie, predovšetkým optickej komunikácie, viedla k vývoju ďalších nových a podporných technológií. Laserová komunikácia je jednou z oblastí vo voľnom priestore, ktorá môže ťažiť z týchto pokrokov a nových technológií. Tieto komunikačné siete a systémy vo voľnom priestore majú potenciál poskytnúť vysokorýchlostné pripojenie vhodné pre diaľkové medzi satelitné a hlboké vesmírne spojenia. Medzi hlboké vesmírne spojenia sa dá považovať prenos dát na Mesiac, Mars a ešte ďalej za hranice poznania. Tento prenos by mal byť schopný prekonať milióny kilometrov pri prenosových rýchlostiach Mb/s [1].

Hlavnými cieľmi tejto bakalárskej práce je opísať vlastnosti, parametre a časovú a priestorovú charakteristiku atmosférického prenosového prostredia planéty Mars. Veľký dôraz je kladený na zloženie atmosféry, meteorologické vlastnosti a charakteristiku aerosólov v atmosfére. Taktiež je potrebné, z teoretického hľadiska, určiť atmosférické okná priepustnosti, vďaka ktorým by sa dali vybrať vhodné vlnové dĺžky žiarenia na komunikačné účely.

Táto bakalárska práca sa vo všeobecnosti zaoberá vplyvom planetárnej atmosféry na prenos informácií v optických komunikáciách. V prvej kapitole je uvedený teoretický úvod k hlavnej časti práce. Je opísaná optická komunikácia a atmosférické prenosové prostredie. Súčasťou atmosférického prenosového prostredia sú aj určité prekážky, ktoré narúšajú prenos signálu. Kvôli týmto faktom sú ďalej opísané útlmy v atmosfére, ktorých súčasťou je priepustnosť, rozptyl, turbulencie a šumy v atmosfére.

Druhá kapitola je venovaná charakteristike planéty Mars. Opísaná je základná poloha a fakty, rozdelenie, zloženie a meteorologické vlastnosti atmosféry. Záver kapitoly sa venuje porovnaniu základných vlastností planéty Mars a planéty Zem a zloženiu ich atmosfér. Sú uvedené fakty, v ktorých sa planéty podobajú a taktiež, v ktorých sú odlišné.

Tretia kapitola je venovaná prenosovému prostrediu atmosféry Marsu. Je prezentovaná teoretická koncentrácia molekúl, ktorá bola vytvorená pomocou dostupných dát a výpočtov. Na základe tohto súboru dát bolo vytvorené prenosové spektrum atmosféry, taktiež vysvetlené dosiahnuté hodnoty a výsledné charakteristiky.

Štvrtá kapitola sa zaoberá všeobecnou charakteristikou a základným prehľadom optických vysieláčov. Je spomenuté zloženie laserov a ich rozdelenie a taktiež sa kapitola venuje laserovým diódam a ich aplikácii v praxi.

Záverečná kapitola sa venuje návrhu programu pre výpočet energetickej bilancie optického spoja. V prvom rade je prediskutovaná základná štruktúra pri návrhu optických bezkáblových spojov. Ďalšia časť kapitoly opisuje samotný program pre výpočet energetickej bilancie spoja.

1. PRINCÍPY OPTICKEJ KOMUNIKÁCIE

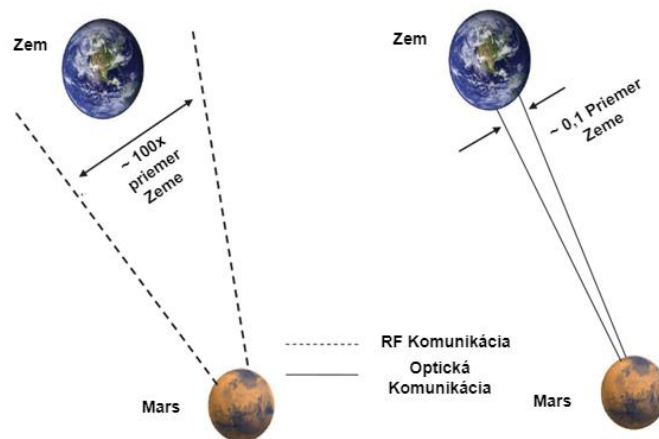
Úvodná kapitola je venovaná optickej bezdrôtovej komunikácii. Je spomenutá základná teória a výhody oproti iným spôsobom komunikácie vo voľnom priestore. Vďaka napredujúcej technike a znalostiam sa ľudia snažia posúvať hranice komunikácie ďalej. Jedným z hlavných cieľov v budúcnosti je zabezpečiť komunikáciu naprieč vesmírom a medzi planétami. Z tohto dôvodu je dôležité objasniť atmosférické prenosové prostredia, útlmy v atmosfére, s ktorými súvisí aj absorpcia a rozptyl žiarenia. Na záver tejto kapitoly bude stručne a vo všeobecnosti objasnené atmosférické prenosové prostredie.

1.1 Teória optickej komunikácie

Optický komunikačný systém voľným prostredím, nazývaný taktiež FSO komunikácia (Free-Space Optical Communication), je komunikácia, ktorá využíva svetlo alebo laserový lúč na prenos dát a informácií vo voľnom priestore [2]. Pri prenose a spracovaní informácií sa využívajú optické nosné vlny, ktoré môžu obsahovať jeden alebo viacero vlnovo delených kanálov. Optický výkon pri danom prenose je sústredený do jedného alebo viacerých optických zväzkov [3].

Vesmírne misie sú čoraz častejšie a sofistikovanejšie na množstvo údajov. Údaje, ktoré sa zbierajú sú enormné. Vďaka tomu optické komunikácie v poslednom období naberajú výrazne na popularite a použití v praxi, pretože sú schopné zozbierať a preniesť veľké množstvo údajov za krátku dobu, radovo sa optická bezdrôtová komunikácia pohybuje v rýchlostiach 10 Gb/s [1]. Týmto fenoménom sa limituje používanie rádiových komunikácií, pretože optické komunikácie sú rýchlejšie, schopné prenášať až o niekoľko Gb/s viac dát ako RF komunikácie, bezpečnejšie, flexibilnejšie, majú širšie prenosové pásmo, majú väčšiu smerovosť zväzku a sú menej náročné na použitie v praxi, keďže pracujú v zatiaľ bezlicenčnom pásme [2], [4]. Ak by mali byť používané rádiové komunikácie na prenos dát pri väčších rýchlostiach a kapacitách, tak by sa to nezaobišlo napríklad bez zvyšovania výkonov rádiových vysielačov alebo ďalšieho zväčšovania veľkosti antén [4]. Práve vďaka rýchlosti, kapacite a ostatným faktorom sú optické komunikácie vo výhode v porovnaní s rádiovým prenosom informácií.

Obrázok 1.1 poukazuje na porovnanie odchýlok medzi týmito druhmi komunikácie vo vesmíre. Je zobrazené zjednodušené porovnanie optickej bezdrôtovej komunikácie s RF komunikáciou. Z obrázku je viditeľné, že optická bezdrôtová komunikácia má väčšiu smerovosť a menšiu rozbiehavosť zväzku. Je to uvedené na príklade možnej komunikácie medzi Zemou a Marsom, kedy by rozbiehavosť zväzku RF komunikácie, podľa teoretických predpokladov, mohla dosiahnuť až 100 násobok priemeru planéty Zem.



Obrázok 1.1 Porovnanie odchýlky komunikácie. Na obrázku je zobrazené porovnanie odchýlky laserového zväzku pri optickej a rádio-frekvenčnej komunikácii. Na prvý pohľad je zřejmé, že optická komunikácia je o niečo presnejšia [1], [4].

1.2 Optické bezdrôtové spoje súčasnosti

Dostatočne rýchla komunikácia vždy bola, je a bude veľmi dôležitým aspektom v ľudských životoch. V súčasnosti je skúmaný značný dopyt po dátach a vcelku zaneprázdnené a preplnené rádio-frekvenčné spektrum sa stáva akýmsi problémom v komunikačných prostriedkoch [1]. Optická komunikácia vo voľnom priestore vykazuje dostatočné napredovanie a mnoho výhod, ktoré naznačujú ďalšie smerovanie technológií a komunikačných systémov ako takých. Tento systém už dlhšiu dobu umožňuje efektívny prenos dát, informácií a videa naprieč atmosférou [2], [3]. Medzi už spomínané výhody sa radia hlavne bezpečnosť komunikácie a prenosu, bezlicenčné frekvenčné pásmo, pomerne malé a účinné rozmery a vysoká prenosová rýchlosť [1], [2], [5]. Práve pre neustále zlepšovanie tejto technológie sa posúvajú aj hranice ľudského poznania.

Dnešné areály podnikov alebo školské kampusy majú náročnú prevádzku sietí, ktorá prevyšuje typické pripojenia [5], [6]. Práve optické bezdrôtové systémy sú schopné pokryť vysoké nároky v tejto oblasti. Zaisťujú prepojenie budov v samotnom areály vysokými prenosovými rýchlosťami a taktiež s dostatočným zabezpečením [6].

Ďalším príkladom je živé vysielanie, ktoré sa už stalo každodennou súčasťou života. Pri vysielaní športových udalostí alebo živých reportáží zo vzdialených oblastí sa prenáša signál z kamier do vysielacieho vozidla, ktoré je prítomné v blízkosti [6]. Samotné vozidlo je pripojené s vysielacou stanicou alebo štúdiom pomocou satelitov. Práve spojenie medzi samotnou kamerou a vysielacím vozidlom je vytvorené pomocou optického bezkáblového spojenia za prítomnosti zachovania vysokej kvality a rýchlosti prenosu [6].

Ďalšou z veľkých výhod je schopnosť nasadiť optické komunikačné systémy dostatočne rýchlo a efektívne [6], [7]. Tieto systémy sa dajú použiť po rôznych prírodných katastrofách, núdzových situácií alebo vojnových útokov. Používajú sa hlavne na obnovenie poškodenej, ale dôležitej miestnej infraštruktúry [7]. Tieto optické komunikačné spoje sa dajú rozmiestniť a čiastočne nahradiť zničenú infraštruktúru dostatočne rýchlo a bezpečne [6], [7].

Vyššie spomenuté príklady sú už takmer neoddeliteľnou súčasťou životov mnohých ľudí. Práve preto použitie optických bezdrôtových komunikácií narastá na popularitu a na samotnom použití v náročnejších technológiách a misiách. Taktiež bolo dokázané, že laserové komunikačné systémy sú ideálne pre použitie v kozmických misiách [5], [6]. Hlavnými dôvodmi sú rozmery týchto systémov, hmotnosť a spotreba elektrickej energie [8]. Všetky uvedené faktory sú veľmi dôležité pri misiách vo vesmíre a hrajú veľkú úlohu pri návrhoch samotných misií. Mnoho svetových spoločností a inštitúcií sa čoraz častejšie prikláňajú k využívaniu optickej bezdrôtovej komunikácie [8], [9].

Spoločnosť NASA sa snaží stále viac tlačiť do používania optickej bezdrôtovej komunikácie, čoho dôsledkom sú rôzne vesmírne misie, ktoré sú čoraz sofistikovanejšie a náročnejšie. Menším míľnikom bol rok 2013, kedy NASA spustila projekt na demonštráciu laserovej komunikácie (LLCD – Lunar Laser Communication Demonstration) [8], [9]. Táto misia spočívala vo vysielaní laserových komunikačných signálov z Mesiaca rýchlosťou približne 600 Mb/s [8], [9]. Ľudia, ktorí sa podieľali na tejto misii skonštatovali, že je to akýsi prvý krok na ceste k budovaniu novej vesmírnej komunikačnej siete.

Ďalšou významnou misiou je misia LCRD (Laser Communications Relay Demonstration). V lete 2021 bola misia LCRD odštartovaná a mala by byť prvou technologickou demonštráciou dvojcestného laserového systému [8], [10]. Misia by mala otestovať laserové schopnosti vo vesmíre, sledovať atmosférické vplyvy a možnosti použitia tejto technológie. Samotné zariadenie bude umiestnené na geostacionárnej dráhe, odkiaľ je schopné podporovať misie v okolí Zeme. Táto misia je rozdelená na rôzne experimentálne fázy. Prvá experimentálna fáza bude využívať a testovať spojenie pozemných staníc. Ďalšie fázy sa presunú do podporovania kozmických misií.

Prvým vesmírnym zákazníkom systému LCRD má byť prístroj ILLUMA-T (Integrated LCRD Low-Earth Orbit User Modem and Amplifier Terminal) [8]. Tento prístroj by sa mal tento rok pripojiť na medzinárodnú vesmírnu stanicu. Systém by sa mal zaoberať zbieraním dát z experimentov a prístrojov na stanici a posielaním ich na zariadenie LCRD rýchlosťou približne 1,2 Gb/s [8], [10]. Takouto rýchlosťou by sa mali dáta posielaním z LCRD na Zem.

Veľkým míľnikom je považovaná misia Psyche [11], [12]. Misia Psyche sa pokúsi o cestu k asteroidu, ktorý je veľmi bohatý na rôzne druhy kovov. Tento asteroid obieha okolo Slnka medzi planétami Mars a Jupiter. Samotná misia Psyche pozostáva zo šiestich hlavných fáz označenými A až F [11]. Tieto fázy sa rozprestierajú od roku 2015 do 2028

a zahŕňujú počiatočné štúdie, stavbu a test prístrojov, štart a prilet na obežnú dráhu asteroidu. V súvislosti s komunikáciou je pre túto prácu najzaujímavejšia časť misie, ktorá sa zaoberá komunikáciou v hlbokom vesmíre. Štart misie je naplánovaný na leto 2022, kedy sa vydá na tri a pol ročnú cestu. Počas prvého roka plánovanej cesty bude testovaná hlboká vesmírna optická komunikácia (Deep Space Optical Communications) proti výrazným vplyvom [12]. Taktiež to bude slúžiť na prieskume hlbokého vesmíru a jeho vplyvu na komunikáciu. V samej podstate by sa malo jednáť o využitie svetelných fotónov k prenosu veľkého objemu dát za určitý čas na dlhé vzdialenosti. Hlavnou úlohou v oblasti komunikácie je radikálne zlepšenie možnosti komunikácie kozmických sond. Práve v oblasti komunikácie sa na túto skutočnosť kladie veľký dôraz, pretože laserová komunikácia je veľmi potrebná pre budúcnosť pri mnohých misiách, medzi ktoré patrí aj výprava na planétu Mars. Pri tejto misii bude potrebná prítomnosť spoľahlivého, bezpečného a rýchleho komunikačného systému s vysokým dátovým tokom [11], [12].

1.3 Atmosférické prenosové prostredie

Atmosférické prenosové prostredie zohráva veľkú úlohu pri optickej bezdrôtovej komunikácii. Optické zväzky v prenosovom prostredí počas prenosu podliehajú všelijakým energetickým zmenám. Atmosférické prostredie je označované ako médium, v ktorom sa šíria rôzne svetelné lúče z rôznych zdrojov svetelného žiarenia. Prostredie sa častokrát označuje ako nehomogénne a nestacionárne [3].

Charakteristika je dostatočne zložitá a náročná, plná rôznych zmien v krátkom časovom okne. Fyzické prekážky ako vtáky na oblohe, stromy alebo iné faktory môžu náhle a krátkodobo narušiť prenášaný signál [13]. Avšak, najväčší vplyv ma prenos signálu má stav a zloženie atmosféry.

Vo všeobecnosti sa v atmosférickom prenosovom prostredí vyskytujú mračná, hmly, dážď, sneh, búrky alebo vetry a prúdy, ktoré narúšajú prenášaný signál prostredím [14]. Ďalším faktorom je teplota a tlak ovzdušia, ktoré sa rôzne menia vzhľadom k priestoru a času. Dôležité je taktiež spomenúť, že atmosféra je zložená z rôznych plynov, molekúl a častíc, ktorých vlastnosti sa menia vzhľadom k výške, koncentrácii častíc, polohe a časovému obdobiu [3].

1.3.1 Útlmy v atmosfére

Ako už bolo spomenuté atmosféra je zložená zo zbierky plynov, atómov, vodných pár a ostatných chemických častíc, ktoré sú uchytené gravitačnou silou planéty. Elektromagnetické vlny, ktoré prechádzajú atmosférou pociťujú výkonové straty a deformáciu vlnoplôch. Sú to práve útlmy v atmosfére, ktoré v podstate tlmia optický zväzok. Fotóny, ktoré letia naprieč atmosférou narážajú na rôzne molekuly a dochádza k absorpcii alebo rozptylu žiarenia rôznymi časticami prítomnými v atmosfére [3], [13].

Priepustnosť atmosféry je spektrálne závislá a je daná Beerov–Lambertovým zákonom [3], [15]

$$\tau(\lambda, L) = \frac{I(\lambda, L)}{I(\lambda, 0)} = e^{[-\gamma(\lambda) \cdot L]}, \quad (1.1)$$

ktorý hovorí, že priepustnosť atmosféry je daná pomerom meranej intenzity o danej vlnovej dĺžke vo vzdialenosti L [$I(\lambda, L)$] a vlnovej intenzity na počiatku [$I(\lambda, 0)$]. Je to matematické vyjadrenie závislosti absorpcie elektromagnetického žiarenia na vlastnostiach materiálu alebo prostredia, cez ktoré žiarenie prechádza [3], [13].

S útlmom v atmosfére úzko súvisí aj koeficient extinkcie, ktorého značka je γ . Tento koeficient je daný vzťahom [1], [3], [15]

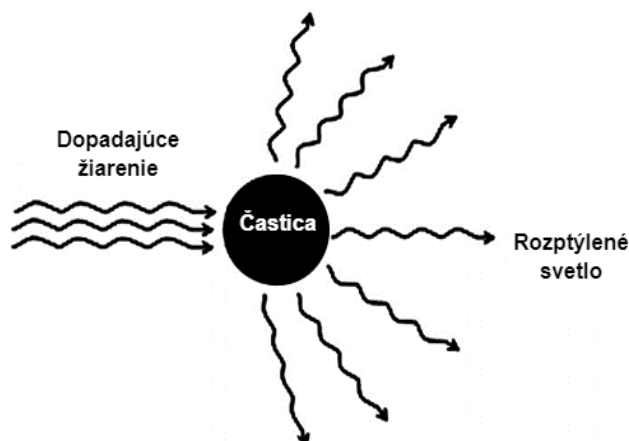
$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda), \quad (1.2)$$

ktorého jednotka je [m^{-1}]. Vzťah je zložený zo štyroch príspevkov. Absorpcia na molekulách [$\alpha_m(\lambda)$] je popísaná letiacim fotónom v atmosfére, ktorý narazí na molekulu a je následne pohltý. Absorpcia na aerosóloch [$\alpha_a(\lambda)$] je sformulovaná ako, napríklad pohltie fotónu na časticiach kvapôčok vody alebo hmly, nazývané aj ako aerosóly. Rozptyl na molekulách [$\beta_m(\lambda)$] je rozptyl elektromagnetického žiarenia na molekulách v atmosfére. Tieto tri príspevky majú trvalú charakteristiku. Jedinou a poslednou charakteristikou, ktorá sa líši od ostatných je rozptyl na aerosóloch [$\beta_a(\lambda)$]. Táto charakteristika sa zásadne líši z miesta na miesto. Tento rozptyl udáva akým spôsobom je elektromagnetické žiarenie rozptýlené vplyvom dažďa, hmly, snehu alebo prachu [1].

1.3.2 Rozptyly v atmosfére

Rozptyl, ako jeden z ďalších príspevkov útlmu atmosféry okrem absorpcie, nastáva pri prechode svetla, respektíve elektromagnetického žiarenia pri prechode prostredím, ktoré obsahuje rôzne objekty (molekuly, častice, predmety) [16]. Ak šírené žiarenie dopadne alebo narazí na objekt, tak výsledné vlny sa šíria v odlišných smeroch od smeru pôvodného.

Obrázok 2.1 poukazuje na všeobecný a teoretický rozptyl svetla, ktorý nastáva na častici v atmosfére. Žiarenie dopadá na časticu a následne sa toto žiarenie (rozptýlené svetlo) rozptýli a odrazí do rôznych smerov.



Obrázok 1.2 Všeobecné poukázanie na rozptyl svetla na častici. Je zobrazený smer šírenia svetla, ktorý narazí na časticu a následne sa rozptýli [17].

Rozptyl, ako parameter dimenzie je daný vzťahom [15], [18]

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (1.3)$$

kde r je veľkosť častice (molekuly, hmly alebo snehovej vločky), na ktorej sa žiarenie rozptyľuje a λ je vlnová dĺžka, ku ktorej sa to vzťahuje [13].

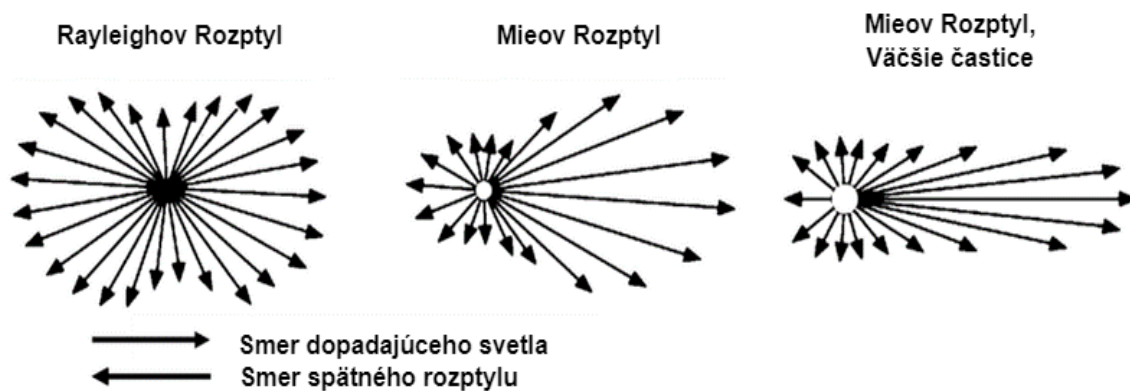
Ak nastane situácia ($r \ll \lambda$), že vlnová dĺžka (λ) je o mnoho väčšia ako veľkosť častice (r), tak sa jedná o Rayleighov rozptyl [3], [15]. Ako príklad sa dá uviesť sfarbenie neba do modra. Daný rozptyl nezávisí úplne na tvare častice. Zaujímavosťou je, že je nemožné predpovedať smer, v ktorom špecifický atóm alebo molekula vyžiari fotón. Samotný výpočet sa udáva pomocou vzorca (1.4), kde λ je vlnová dĺžka, d udáva priemer častíc prítomných v danej atmosfére a n je index lomu prostredia, kde sa odohráva tento druh rozptylu [1], [13], [15].

$$\sigma_R = \frac{2\pi^5}{3} \cdot \frac{d^6}{\lambda^4} \cdot \left(\frac{n^2-1}{n^2+2} \right)^2 \quad (1.4)$$

Pokiaľ veľkosť častice r , na ktorej sa rozptyľuje, je porovnateľná s vlnovou dĺžkou žiarenia (λ) nastáva situácia približnej rovnosti veľkosti častice a vlnovej dĺžky ($r \approx \lambda$) [15]. V tejto situácii sa jedná o Mieov rozptyl [18]. Typickým príkladom pre daný typ rozptylu sú biele mraky [15]. Žiarenie zo Slnka prichádza na mraky z vrchnej strany a prítomné žiarenie sa rozptyľuje v celej oblasti, preto z nášho pohľadu sú mraky zafarbené do biela. Tento typ rozptylu je taktiež dostatočne ovplyvnený tvarom častice. Ak sa jedná Mieov rozptyl, tak sa pre výpočet využíva vzorec (1.5), kde sa počíta integrál od najmenšej (r_1) po najväčšiu (r_2) veľkosť častice, r je veľkosť častice a parameter $N(r)$ je definovaný ako priemer častice, ktorá sa vzťahuje na jednotku objemu [1], [13], [19], [20].

$$\sigma_M = 10^5 \int_{r_1}^{r_2} N(r)K(r, n)r^2 dr \quad (1.5)$$

Pre častice, ktoré sú o mnoho väčšie ako vlnová dĺžka žiarenia (λ) nastáva geometrický rozptyl [15]. Ako príklad je možné uviesť krupobitie alebo veľké dažďové kvapky. Tento rozptyl je neselektívny, pretože na týchto časticiach sa dané optické žiarenie rozptyľuje rovnomerne a nie je závislé na vlnovej dĺžke. Grafické porovnanie rozdelenia rozptylov je zobrazené na obrázku 1.3.



Obrázok 1.3 Rozptyl častíc Nasledujúci obrázok poukazuje vo všeobecnosti na Rayleighov a Mieov rozptyl častíc. Ilustrácia ukazuje smer šírenia žiarenia a približný teoretický rozptyl na častici [18].

1.3.3 Šumy

Medzi ďalší zásadný jav, ktorý narúša optickú komunikáciu je šum. Tento jav je pre samotnú optiku nevýhodný, pretože zhoršuje kvalitu signálu a v konečnom dôsledku sa náš výsledný signál môže v danom šume stratiť. V našom prípade rozdelíme šumy na dva základné typy. Prvým typom šumu je výstrelový šum. Je to súčet optických šumov, ktoré sa prejavujú v prijatom signáli. Medzi tento súčet optických šumov patrí kvantový šum, šum temného prúdu a šum pozadia. Ako ďalší typ šumu je uvádzaný napríklad tepelný (obvodový) šum [13], [15].

Kvantový šum je daný kvantovou podstatou fotónov. V jednoduchosti je to opísané tak, že atmosférou vyšleme určitý počet fotónov. Tieto fotóny môžu dôjsť až do koncového bodu v plnom počte alebo ich môže byť o niečo menej. Špecifickou vlastnosťou je, že každý fotón, ktorý dorazí má o niečo odlišnú vlnovú dĺžku, pretože žiadne žiarenie nie je stopercentne koherentné a taktiež žiadne zo žiarení nemá nekonečne úzku spektrálnu čiaru [15]. Pri prijímaní má každý z fotónov o niečo inú hodnotu energie. Tento jav nie je možné odstrániť.

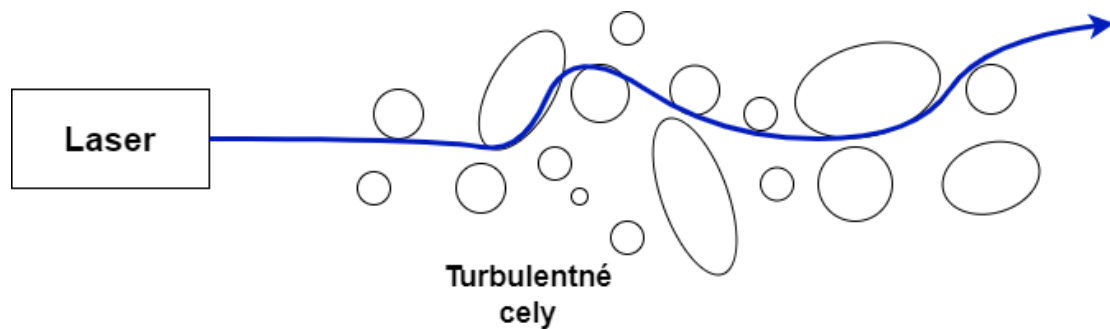
Šum temného prúdu vzniká v prípade, že fotodetektor má určitú teplotu a, okrem prítomných fotónov, ešte vznikajú nadbytočné elektróny. Vznikajú práve vďaka tepelnej aktivite samotného detektoru. Ak by nastala situácia, že do určeného cieľa nedopadne ani

jeden fotón, tak napriek tomu sa degeneruje prúd radovo v jednotkách nano-ampérov. Práve preto tento jav nesie názov šum temného prúdu [15]. Tento šum sa nedá úplne odstrániť, ale je ho možné čiastočne redukovať napríklad výberom vhodného chladenia detektoru.

Šum pozadia, ktorý sa označuje aj ako Background Noise, je daný optickým výkonom šumu [13]. Práve táto časť sa zaoberá tým, že ak prevádzkujeme optické spoje, tak je potrebné rátať s určitým šumom okolitého prostredia. Najznámejším a najrozšírenejším zdrojom šumu takéhoto typu je samotné Slnko. Ďalšie generovanie šumu pozadia môže byť spôsobené okolitým svetelným smogom ako napríklad pouličné lampy a osvetlenie v mestách [15]. Tento typ šumu je možné redukovať interferenčným filtrom alebo priestorovou filtráciou.

1.3.4 Atmosférická turbulencia

Atmosférická turbulencia je jav, ktorý spôsobuje kolísanie prijímaného signálu či samotného žiarenia [19]. Turbulencia sa zvyčajne vzťahuje na chaotické prúdenie vzduchu v zemskej atmosfére s určitou časovou mierkou [19]. V samej podstate je to malý a nepravidelný pohyb molekúl vzduchu prítomných v atmosfére. Na vzniku sa podieľa hlavne slnečné žiarenie, ktoré je schopné vyvolávať náhodné časopriestorové zmeny indexu lomu prostredia [22]. Ďalším faktorom je pohyb atmosféry planéty, ktorá môže byť turbulentná alebo laminárna [22]. S prejavmi turbulencie je možné sa stretnúť pri leteckej doprave, pri premiešavaní dvoch tekutín alebo pri plameňoch ohňa.



Obrázok 1.4 Vyžiarený optický zväzok so zmenou trasy z dôvodu turbulencie.

Atmosférická turbulencia vo všeobecnosti spôsobuje fluktuáciu v teplote, tlaku a indexe lomu prostredia [23]. Hodnota indexu lomu prostredia je závislá na teplote, atmosférickom tlaku, hustote častíc a rýchlosti vetra [24]. Samotný jav turbulencie spôsobuje časovú zmenu prijímaného žiarenia za prítomnosti turbulentných ciel. Takéto turbulentné cely môžu pri komunikácii alebo vysielaní optického zväzku spôsobovať znehodnotenie zväzku, skreslenie optickej vlny alebo zníženie prijímaného optického výkonu.

Zásahy atmosférickej turbulencie pri optických komunikáciách [1], [13], [19], [22], [23]:

- scintilácia signálu
- degradácia optického zväzku
- zmena uhlu dopadu žiarenia
- rozšírenie optického zväzku
- zníženie prijímaného optického signálu
- divergencia vyžiareného lúča
- odklonenie optického zväzku

Ako sa mení atmosféra planét zmenou nadmorskej výšky, prípadne zmenou výšky v závislosti na tlaku alebo iných faktoroch, ktoré sú pre planéty rôzne, niečo podobné platí aj pre oblasť atmosférickej turbulencie. Vo výškach niekoľko stoviek metrov nad hladinou mora nastáva najväčšia turbulencia okolo pravého poludnia [23], [25]. Je to z dôvodu najväčšieho slnečného žiarenia v priebehu dňa. Slnečné žiarenie dopadá na povrch a samotný vzduch sa pri povrchu ohrieva, čo spôsobuje jeho rozpínanie a následne znižovanie hustoty vzduchu [23]. Tento vzduch s nižšou hustotou stúpa smerom nahor a chladnejší vzduch z okolia začína klesať k povrchu. Takýto pohyb vzduchu spoločne s rôznymi prekážkami v atmosfére spôsobuje dostatočnú nepravidelnosť vetra a prúdov [23], [25]. Pri vyšších častiach atmosféry sa samotná atmosférická turbulencia takmer vôbec nevyskytuje. Výnimkou sú však vzdušné víry, ktoré vznikajú napríklad na krídlach lietadiel.

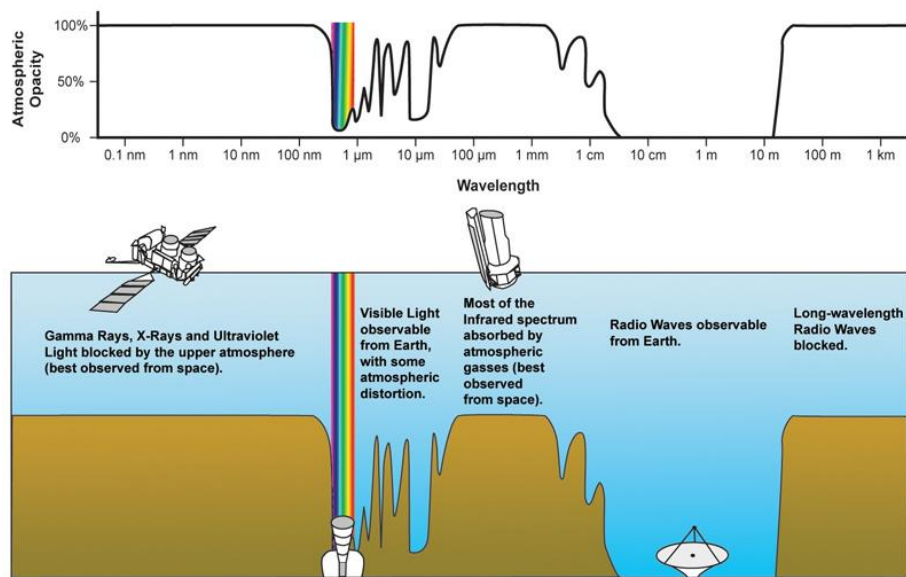
Ďalším pomerne zásadným problémom pre vesmírne misie sú vesmírne turbulencie, ktoré sú spomenuté a presnejšie vysvetlené na odkazoch [25] a [26]. Obdobne ako vo vzduchu, keď sa lietadlo stretne s nepriaznivými prúdmi vetra, tak aj vo vesmíre môže nastať stret satelitu alebo optického žiarenia s vysoko energetickými a nárazovými solárnymi vetrami a časticami. Skupinou vedcov bolo dokázané, že turbulencie sa neobmedzujú len na prostredie Zeme, ale vyskytujú sa aj v celej slnečnej sústave [25], [26]. Hlavným zdrojom týchto kozmických turbulencií je emisia vysoko nábojových častíc, ktoré sú do vesmíru vyžarované Slnkom a jeho žiarením [27]. Šíriace sa vlny môžu dosahovať až niekoľko miliónov stupňov Celzia [26], [27]. Taktiež môžu trvať niekoľko hodín a dosahovať veľkosti násobkov planéty Zem. Vo vesmíre pôsobia aj Alfvenove vlny, ktoré sú charakterizované ako pohyblivé poruchy plazmy a magnetického poľa [27].

1.4 Atmosférické okná priepustnosti

Atmosférické okno priepustnosti atmosféry je určené ako oblasť elektromagnetického žiarenia, v ktorej má samotná atmosféra planéty veľkú priepustnosť žiarenia [3]. Je to určené hlavne nízkou absorpciou hlavných častí, z ktorých sa atmosféra skladá. Väčšia časť žiarenia, ktorá dopadá z vesmíru cez atmosféru neprenikne. Ako už bolo spomenuté žiarenie alebo jeho časť sa absorbuje alebo sa od nej odráža [13]. V celom spektre atmosféry je niekoľko oblastí, v ktorých žiarenie preniká až na samotný povrch. Práve

preto je nutné vybrať vhodnú vlnovú dĺžku zdroja optického žiarenia, ktorá spadá medzi atmosférické okno priepustnosti.

Na obrázku 1.5 je zobrazená zjednodušená závislosť atmosférickej nepriepustnosti vzhľadom k vlnovým dĺžkam. Pri Gamma žiarení a ultrafialovom žiarení je vidieť, že priepustnosť zemskej atmosféry je pomerne nízka až žiadna. Pri týchto vlnových dĺžkach dochádza k blokovaní a pohlcovaniu žiarenia a svetla, ktoré sa dá pozorovať z vesmíru. Ďalšia pomerne pohltená časť vlnových dĺžok atmosférou je časť infračerveného spektra, ktoré je pomerne absorbované v zemskej atmosfére vďaka prítomným atmosférickým plynom. Časť viditeľného spektra využíva atmosférické okná priepustnosti samotnej atmosféry, ktoré sú zobrazené v závislosti na obrázku 1.5. Táto časť je schopná prechádzať atmosférou s miernymi skresleniami, ktoré sú pozorovateľné z vesmíru.



Obrázok 1.5 Atmosférická okná priepustnosti a ich opis. Horná vrstva zemskej atmosféry je schopná blokovať Gamma žiarenia, Röntgenové žiarenia a väčšinu ultrafialového svetla. Zaujímavosťou je, že viditeľné svetlo prechádza voľne atmosférou [28].

1.5 Zhrnutie kapitoly

V úvodnej kapitole bola objasnená teória bezdrôtovej komunikácie spolu s jej výhodami a nevýhodami oproti rádio–frekvenčným komunikáciám. Podstatná časť kapitoly bola venovaná atmosférickému prenosovému prostrediu a jeho negatívnym vplyvom na optickú komunikáciu. Ako negatívne vplyvy boli popísané útlmy v atmosfére ako je absorpcia a rozptyl, s ktorými úzko súvisí aj koeficient extinkcie. Ako ďalšie vplyvy boli spomenuté turbulencie a šumy so základným rozdelením. Záver kapitoly bol venovaný základnému opisu atmosférického okna priepustnosti atmosféry.

2. ATMOSFÉRA MARSU

Nasledujúca kapitola je venovaná jednému z hlavných bodov práce. Atmosféra Marsu a samotná planéta sú stále častejšie prezentované ako cieľom hlbšieho skúmania. Za posledných šesťdesiat rokov sa podniklo na Mars takmer 50 misií a rôzne svetové spoločnosti sa stále pripravujú na ďalšie. Hlavným dôvodom skúmania a pochopenia samotnej planéty pramení z novej kolonizácie v budúcnosti. Veľkú úlohu, okrem iných, v týchto skúmaniach bude zohrávať komunikácia medzi samotnými planétami. Aby bola komunikácia medzi planétami jednoduchšia, rýchlejšia a presnejšia je potrebné preskúmať samotnú atmosféru, jej správanie, zloženie, meteorologické vlastnosti a rôzne ďalšie kľúčové aspekty pre medziplanetárne spojenie [29], [30]. V tejto kapitole bude prediskutovaná hlavne atmosféra Marsu a jej súčasti.

2.1 Fyzikálne vlastnosti planéty Mars

Poradím štvrtá planéta od Slnka, je Mars zároveň aj druhou najmenšou planétou v slnečnej sústave. Povrch Marsu z jednej časti pripomína krátery a údolia Mesiaca. Na strane druhej pripomína púšte a polárne ľadovce Zeme. Povrch je suchý, skalnatý a veľmi chladný. Vďaka svojej pomerne blízkej vzdialenosti a jasnosti je zo zemského povrchu najľahšie pozorovateľná planéta na nočnej oblohe a preto je aj najviac dokumentovanou planétou za posledné tisícročia [31], [32].

Zaujímavosťou je, že planéta Mars má o polovicu menší priemer ako Zem, ale jeho povrch je plochou takmer identický s plochou našej pevniny. Na povrchu nemá aktívnu doskovú tektoniku [32]. Sopky, krátery, čiastočný pohyb kôry planéty a atmosférické podmienky, ako sú prachové búrky a silné piesočné vetry, počas mnohých rokov zmenili krajinu Marsu. Počas tohto obdobia bolo vytvorené jedno z najzaujímavejších topografických prvkov a miest na skúmanie v slnečnej sústave [33].

Ako na Zemi, tak aj na Marse sa nachádza voda. Avšak atmosféra Marsu je príliš riedka a gravitácia príliš slabá na to, aby sa na povrchu mohla tekutá voda dlhšie udržať alebo vôbec existovať. Uvádza sa, že samotná história vody na Marse je jedna z najzaujímavejších častí štúdie slnečnej sústavy, pretože to môže priamo súvisieť s možnou prítomnosťou života na starovekej planéte [32], [33]. V dnešnej dobe sa tam voda nachádza v akejsi forme vodného ľadu, ktorá je tesne pod povrchom v polárnych oblastiach [34]. Taktiež je tu prítomná slaná voda, ktorá sezónne steká po niektorých svahoch a stenách kráterov.

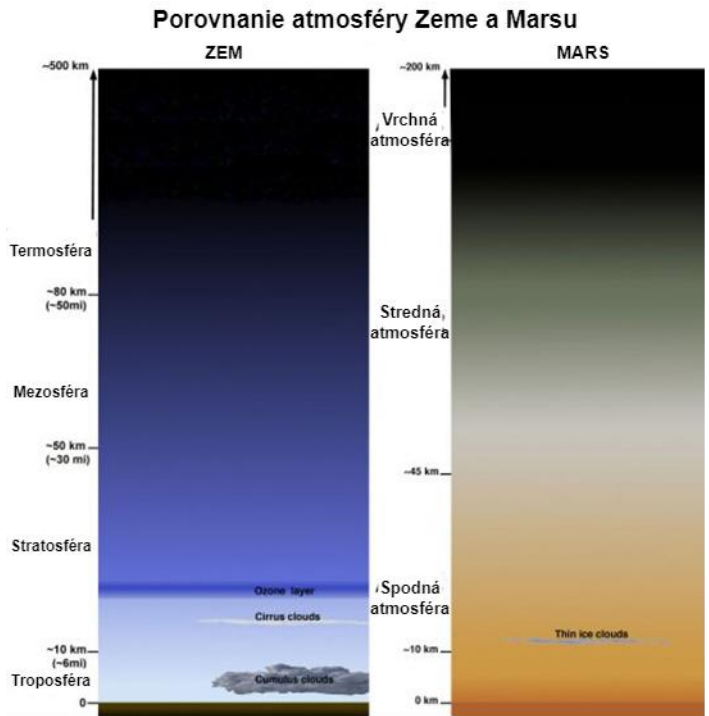
Vedci sa domnievajú, že Mars na začiatku svojej histórie mohol mať hustejšiu atmosféru [34]. Náznačky tejto teórie pochádzajú z údajov, ktoré boli zozbierané z kozmickej lode NASA (misia MAVEN). Tieto dáta naznačujú, že planéta časom stratila značné množstvo svojej atmosféry. Jedným z hlavných vinníkov straty atmosféry Marsu vedci označili solárny vietor [35].

2.2 Rozdelenie a model vrstiev atmosféry Marsu

Mars sa podobá Zemi oveľa viac ako ktorákoľvek planéta v slnečnej sústave. Štúdiom tejto atmosféry sa nám vo všeobecnosti otvárajú možnosti pre lepšie pochopenie našej vlastnej planéty [31].

Vertikálna štruktúra atmosféry, ktorá v samej podstate udáva vzťah teploty a tlaku k nadmorskej výške je určená komplikovanou rovnováhou viacerých faktorov. Medzi tieto faktory patria, napríklad transport energie a spôsob akým sa energia dostáva do samotnej atmosféry. Planéta Mars je vertikálne rozdelená, podobne ako na Zemi, na tri hlavné časti. Delí sa na nízku, strednú (mezosféra) a hornú (termosféra) časť [36], [37]. Grafické porovnanie z teoretických predpokladov a znalostí je zobrazené na obrázku 2.1, kde je poukázané rozdelenie atmosfér planéty Mars a planéty Zem. Je zrejmé, že samotné rozdelenie je dostatočne podobné z hľadiska častí atmosfér a výškového rozdelenia [16], [40].

V prvom rade by bolo vhodné opísať ako sa na povrchu Marsu určuje nadmorská výška. Je všeobecne známe, že nadmorská výška je určená ako výškový rozdiel miesta, ktoré je určené k hladine niektorého mora alebo oceánu. Obvykle sa to určuje k najbližšiemu moru. Keďže na zemskom povrchu sú prítomné moria a oceány, tak je nadmorská výška určená vzhľadom k nim. Na Marse sa nenachádzajú žiadne moria ani oceány v stave tekutom a podobnom na povrchu Zeme [36], [37]. Preto museli vedci umelo definovať hodnotu akejkoľvek nadmorskej výšky, aby sa dala určiť napríklad výška atmosféry alebo pohorí Marsu. Vedci vytvorili systém, ktorý počíta so špecifickou hodnotou tlaku vzduchu. Táto hodnota je definovaná ako 610 Pa. Hodnota bola zvolená vzhľadom k trojitému bodu vody na Marse, ktorá sa môže nachádzať v plynnom, kvapalnom alebo pevnom skupenstve. Takže takzvaná nulová výška sa nachádza vo výške, kde hodnota tlaku vzduchu dosahuje 610,5 Pa [38], [39].



Obrázok 2.1 Porovnanie z hľadiska rozdelenia atmosféry podľa výšky a ich súčasti. Je zrejmé že atmosféra Marsu je niekoľko násobne tenšia ako atmosféra Zeme [16], [40].

Spodná alebo nízka časť atmosféry je ovplyvnená dvomi hlavnými faktormi. Je zložená takmer z čistého oxidu uhličitého. Taktiež obsahuje množstvo pomerne veľkých prachových častíc. Táto vrstva sa považuje za pomerne teplú vrstvu atmosféry [33]. Spôsobuje to práve prítomný oxid uhličitý s prachovými časticami. Práve prach absorbuje veľké množstvo tepla zo slnečného žiarenia a považuje sa za zdroj energie v spodnej atmosfére. Je nutné spomenúť, že táto vrstva siaha do výšky približne 45 kilometrov [34], [40].

Stredná vrstva sa považuje za najchladnejšiu vrstvu. Je to oblasť so značne silnými vetrami a prúdmi. Tiahne sa do výšky okolo 110 kilometrov. Neobsahuje žiadne značné aerosóly alebo častice, ktoré by absorbovali slnečné žiarenie [33], [37], [40].

Horná vrstva atmosféry sa rozkladá v rozmedzí výšok približne od 110 až do 200 kilometrov nad samotným povrchom [33], [37]. Táto oblasť sa považuje za pomerne teplú oblasť. Je ohrievaná dopadajúcim slnečným teplom, ktoré dopadá na planétu. V tejto časti atmosféry, taktiež dochádza k úniku častíc plynov. Častice plynov opúšťajú mart'anskú atmosféru o mnoho rýchlejšie v porovnaní so Zemou, ktorá je hmotnejšia. Z dostupných zdrojov je určené, že Mars má asi tretinovú gravitáciu oproti gravitácii Zeme [37], [40].

Vedci sa domnievajú, že Mars stratil svoju magnetosféru približne pred 4 miliardami rokov. Ako možné dôvody sú udávané početné údery asteroidov ako aj vzájomné pôsobenie slnečného vetra s mart'anskou ionosférou [33], [34]. Týmto javom sa postupne

znižuje hustota atmosféry, pretože dochádza k odstraňovaniu a vylietavaniu atómov z vonkajšej vrstvy atmosféry [37], [40].

2.3 Zloženie atmosféry Marsu

Mars má pomerne tenkú atmosféru. Je tvorená prevažne oxidom uhličitým, ktorý zaberá zhruba 95,3% atmosféry. Atmosféra ďalej obsahuje dusík (2,7%), argón (1,6%), kyslík (0,13%), oxid uhoľnatý (0,08%) a vodné pary (0,03%), ktoré vznikajú hlavne sublimáciou [38], [41], [42]. Minoritné zastúpenie plynov tvorí neón, kryptón, xenón a metán. Samotné zloženie atmosféry sa mení v závislosti od obdobia a sezóny. Tak ako na Zemi, tak aj na Marse dochádza k zmenám sezón a to podľa približovania a vzdďalovania planéty od Slnka [43].

–	Zem	Mars
Oxid uhličitý (CO₂)	0,035 %	95,32 %
Dusík (N₂)	78,08 %	2,7 %
Argón (Ar)	menej ako 1 %	1,6 %
Kyslík (O₂)	20,95 %	0,13 %
Oxid uhoľnatý (CO)	menej ako 1 %	0,08 %

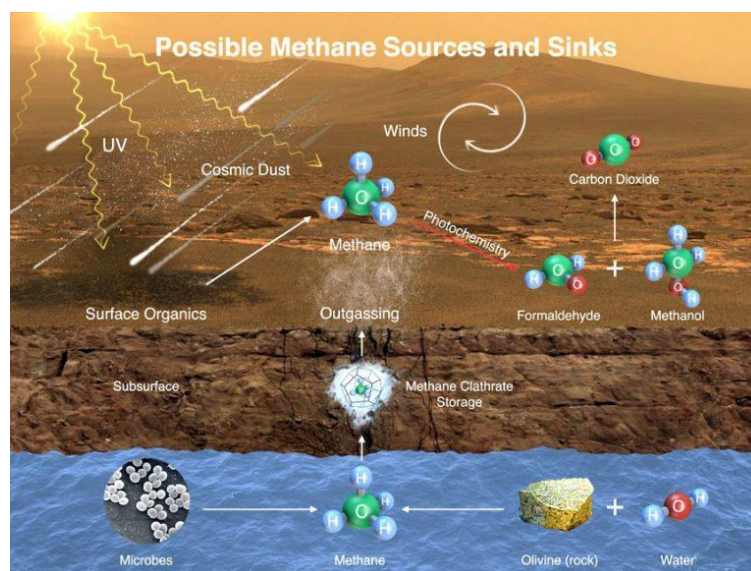
Tabuľka 1.1 Porovnanie zloženia atmosféry Zeme a Marsu [38], [42], [43].

Najväčšie zastúpenie v atmosfére má oxid uhličitý, ktorý má v atmosfére svoj vlastný kolobeh [38]. Počas zimného obdobia väčšia časť oxidu uhličitého je schopná na póloch zamrznúť a tvoriť polárne čiapočky. Menšia časť, ktorá v atmosfére ostala, kondenzuje späť na povrch vo forme akéhosi sneženia. Počas zimného obdobia oxid uhličitý znižuje svoj podiel v zložení atmosféry. S prichádzajúcim žiarením počas letného obdobia oxid uhličitý sublimuje späť do atmosféry a zväčšuje svoj obsah a podiel v atmosfére [16].

Ďalším dostatočne významným plynom v atmosfére Marsu je argón [42]. V porovnaní s oxidom uhličitým samotný argón v atmosfére nevzniká ani nezaničí žiadnym procesom. Je možné skonštatovať, že argón má v atmosfére konštantné zastúpenie. Popri cykloch oxidu uhličitého sa v atmosfére mení koncentrácia argónu. Hlavným dôvodom zmeny koncentrácie je už spomínaná sublimácia a kondenzácia oxidu uhličitého v polárnych oblastiach počas marťanského leta alebo zimy. Výsledkom zamrznutia CO₂ v atmosfére je zníženie atmosférického tlaku približne o 30%. Keďže samotný argón nekondenzuje, tak sa jeho spomínaná koncentrácia mení podľa obdobia [16], [38], [42].

Medzi ďalšie významné objavy v atmosfére Marsu je metán [45]. Na Zemi sa nachádza značné množstvo metánu, ktoré je produkované mikróbmi. Tieto mikróby sú prítomné pri dobytku a ich trávení potravy. Tento proces trávenia končí vydýchnutím alebo vyvrhnutím plynu do ovzdušia. Avšak na povrchu Marsu sa žiaden dobytok nenachádza. To znamená, že metán môže byť tvorený mikróbmi, čo by znamenalo

potenciálny život na červenej planéte [45]. Na druhej strane metán môže byť vytváraný geologickými procesmi, ako napríklad vulkanická činnosť. Celý kolobeh je zobrazený na obrázku 2.2, kde poukazuje na vytvorenie metánu činnosťou mikróbov spojením s činnosťou hornín spolu s podzemnou vodou, jeho prenos na povrch planéty. Na povrchu dochádza k odparovaniu metánu, ktorý sa dostáva do atmosféry. V atmosfére dochádza k ovplyvňovaniu samotného metánu vzhľadom k UV žiareniu, atmosférickému prachu, solárnym vetrom a iným činnostiam v atmosfére Marsu.



Obrázok 2.2 Zobrazenie možného cyklu a vzniku metánu v atmosfére Marsu. Ako už bolo spomenuté, metán je pravdepodobne vytváraný mikróbmami alebo geologickou činnosťou na povrchu Marsu [45], [50].

2.4 Porovnanie atmosféry Marsu a Zeme

Podľa priemeru je planéta Mars asi polovičná v porovnaní so Zemou. Jeho atmosféra je oveľa tenšia. Atmosférický objem Marsu je menší ako 1% v závislosti s atmosférickým objemom Zeme [38], [43]. Zloženie atmosféry je tiež výrazne odlišné. Atmosféra červenej planéty je zložená primárne na báze oxidu uhličitého, zatiaľ čo zemská atmosféra je bohatá hlavne na dusík a kyslík [38], [43].

Atmosféry oboch planét prešli počas svojej existencie rôznymi zmenami. Zatiaľ čo atmosféra a podnebie Marsu je chladné až priam mrazivé, tak podnebie Zeme sa každým rokom ohrieva. Samotná teplota na Marse sa môže pohybovať v rozmedzí od -153°C až do 20°C [38]. Hlavným dôvodom je už spomínaná tenká atmosféra, ktorá nie je schopná udržať tepelné žiarenie zo Slnka a teplo pomerne jednoducho uniká z atmosféry [16], [33].

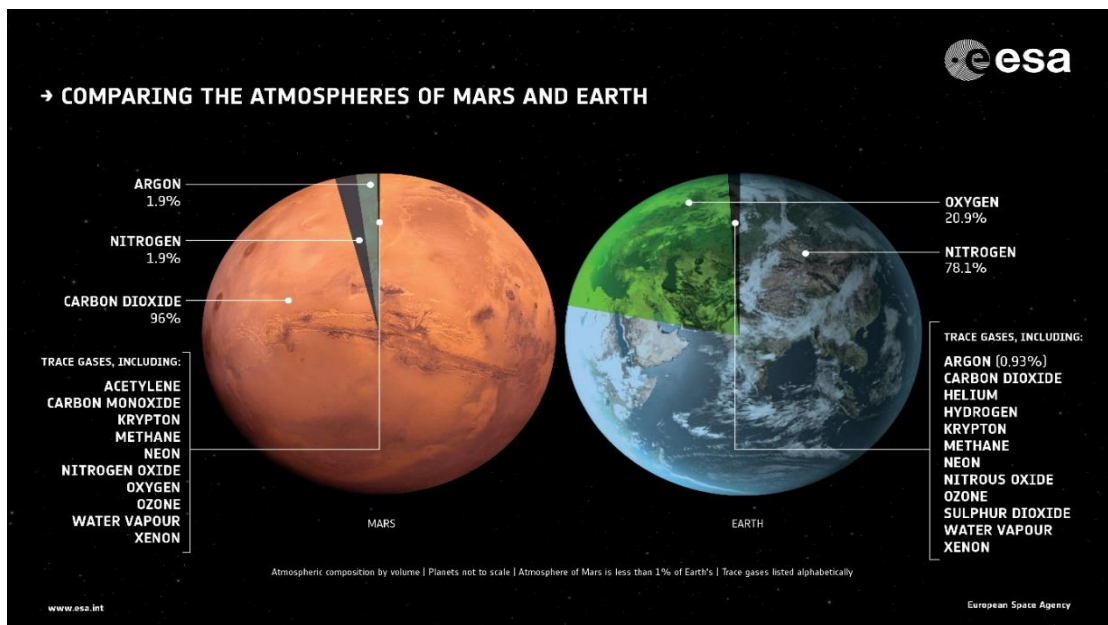
Ďalším významným rozdielom sú pomerne silné vetry, ktoré sú na Marse prítomné. Tieto spomínané vetry sú dostatočne silné na to, aby vytvorili prachové búrky, ktoré sú

schopné pokryť veľkú časť planéty. Po týchto búrkach sa prachové častice môžu úplne ustáliť o niekoľko týždňov alebo mesiacov. Taktiež táto riedka atmosféra Marsu neposkytuje dostatočne veľkú ochranu pred nárazmi vesmírnych objektov, ako sú meteority, asteroidy alebo kométy [33], [37].

Riedka atmosféra Marsu súvisí aj so samotnou výškou atmosféry. Atmosféra Zeme dosahuje do výšky približne 800 kilometrov, zatiaľ čo atmosféra Marsu dosahuje výšku necelých 300 kilometrov. Ďalej, je zemská atmosféra o niečo viac členitá. Delí sa na troposféru, stratosféru, mezosféru, termosféru a exosféru [40], [43], [46]. Atmosféra planéty Mars sa člení na tri hlavné časti, ktoré boli už boli opísané v podkapitole rozdelenia atmosféry Marsu [16], [40].

Významnú úlohu na Marse zohráva aj samotná gravitácia. Faktom je, že gravitácia na povrchu Marsu je v podstate len zlomkom gravitácie, ktorá je prítomná na Zemi. Hodnota gravitačnej sily na Marse je $3,721 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Je to zhruba 38% hodnoty gravitačnej sily Zeme, ktorej hodnota je $9,807 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ [46]. Táto skutočnosť je určite jedným z faktorov riedkej atmosféry. Podľa meraní z kozmických sond bolo zistené, že na Marse sa nachádza veľmi slabé vnútorné magnetické pole. Práve preto sú solárne vetry schopné preniknúť do atmosféry [16], [43], [46].

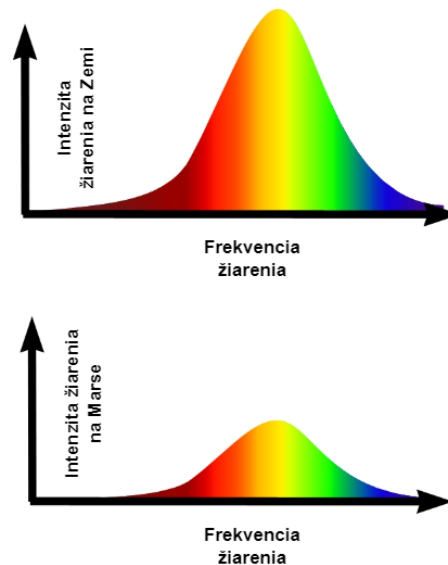
Obrázok 2.3 zobrazuje porovnanie atmosfér planéty Mars a Zem. Sú zobrazené takmer všetky časti oboch atmosfér v percentuálnom vyjadrení. Ako už bolo v tejto práci spomenuté atmosféry oboch planét sú si dostatočne podobné. Taktiež je zaujímavé vidieť ako z vesmírneho pohľadu je viditeľná planéta Zem a ako je Mars zahalený v prachových časticiach prítomných v atmosfére.



Obrázok 2.3 Porovnanie Zemskej atmosféry Marsu, na ktorej je zobrazená percentuálna koncentrácia hlavných molekúl atmosféry a ostatné súčasti atmosfér [43].

2.5 Meteorologické vlastnosti atmosféry

Z hľadiska metrológie a klímy je atmosféra Marsu najbližšie zemskej atmosfére. Napriek viacerým podobnostiam je dôležité opísať rozdiely, ktorými sa v tejto časti líšia. Medzi hlavné rozdiely patrí schopnosť rýchleho prispôsobenia atmosféry Marsu podmienkam solárneho tepelného vstupu, rozsah nadmorskej výšky atmosféry, vnútorné zahrievanie atmosféry v dôsledku rozptýleného prachu, vzdialenosť od Slnka a chýbajúce oceány, ktoré na Zemskom povrchu dostatočne ovplyvňujú podnebie [35], [36].



Obrázok 2.4 Porovnanie intenzity slnečného žiarenia na Zemi a Marse [44].

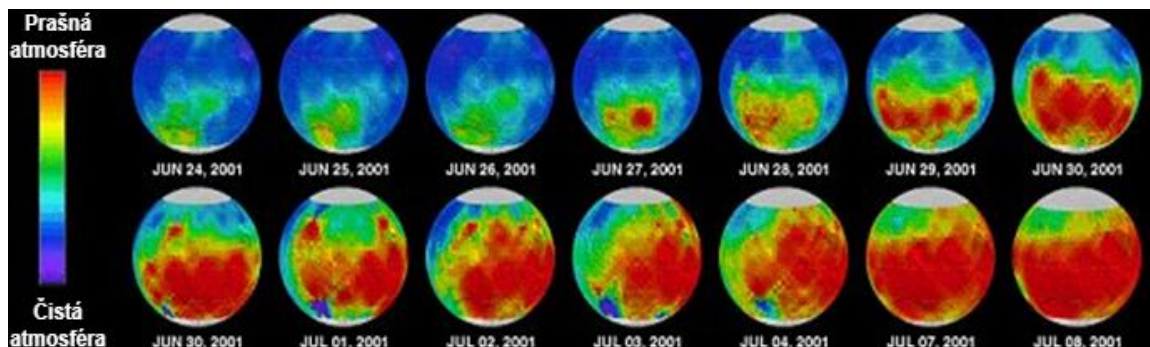
Vzhľadom k tomu, že samotná planéta Mars je schopná náklonu až o 25 stupňov, tak dochádza k striedaniu ročných období. Postupným striedaním akéhosi letného a zimného obdobia dochádza k nárastu alebo úbytku polárnych čiapočiek ľadu, ktorého zloženie je z oxidu uhličitého a molekúl vody. Občas dochádza aj k sneženiu. Snehové vločky sú zväčša zložené zo zamrznutého oxidu uhličitého [35]. V skutočnosti tieto zamrznuté častice CO₂, z vedeckého uhla pohľadu, vytvárajú skôr efekt hmly na povrchu ako nejaké sneženie, ktoré je známe na povrchu Zeme. Okrem toho sa v okolí pólů nachádzajú útvary, ktoré mohli byť vytvorené a tvorené ľadovcami. V dnešnej dobe sa tieto ľadovce na povrchu Marsu už nenachádzajú [35], [37], [38].

Je predpokladom, že medzi hlavný príspevok v atmosfére z hľadiska aerosólov patria prachové častice [35], [37]. Za normálnych okolností planéta má červenú až priam hrdzavú farbu vďaka časticiam prachu. Napríklad pri západe Slnka na Marse je obloha sfarbená do ružova. K tomuto javu dochádza z dôvodu nedostatku molekúl v atmosfére, aby rozptýlili žiarenie dopadajúce na planétu [38].

Ďalším dôležitým faktorom je oblačnosť. Vzhľadom k poznatkom, ktoré sú doposiaľ známe o atmosférických a meteorologických vlastnostiach je možné skonštatovať, že má Mars pomerne dynamické počasie [38], [47]. Oblačnosť, ktorá je v atmosfére prítomná

je pravdepodobne tvorená kryštálkami oxidu uhličitého. V atmosfére sa dajú pozorovať tri základné druhy oblačnosti. Sú to biele, žlté a šedé mraky. Vo všeobecnosti biele mraky tvoria sústavy oblakov a najčastejšie sa nachádzajú nad vrcholmi pohorí. Šedé mraky sa nachádzajú vo výške približne 20 kilometrov a obsahujú spomínané kryštálky CO₂. Nakoniec, žlté mraky sú tvorené pieskom a prachom [48].

Spojením oblačnosti a prachových častíc vznikajú navonok zaujímavé, no problémové, prachové búrky [16], [38]. Tieto búrky patria medzi najväčšie v slnečnej sústave a sú schopné pokryť celú planétu na niekoľko mesiacov. Pri skúmaní týchto búrok bolo zistené, že sú zodpovedné aj za odvádzanie vody z planéty a sú schopné zahaliť planétu do úplnej tmy [47], [48]. Hlbšími skúmaniami ďalej vedci zistili príčinu straty vody v závislosti s prachovými búrkami. Samotné prachové búrky ohrievajú atmosféru planéty a vytvárajú sa veľmi silné vetry. Tieto vetry môžu dosahovať rýchlosti aj okolo 200 km/h a sú schopné v podstate katapultovať vodu a vodné pary do vyšších nadmorských výšok. V týchto nadmorských výškach je už atmosféra veľmi riedka a molekuly vody sú o mnoho viac zraniteľnejšie na rozpad. Vonkajšie ultrafialové žiarenie ich doslova trhá na samostatné zložky vodíka a kyslíka, ktoré sa ďalej strácajú vo vesmíre [49]. Samotný priebeh prachovej búrky, ktorý sa podarilo zachytiť a spracovať v roku 2001 sondou Mars Global Surveyor je zobrazený na obrázku 2.4. Je pomerne dobre a presne viditeľný začiatok prachovej búrky a jej priebeh. Prachová búrka je pomerne veľkým problémom, pretože môže začať v jednej časti planéty, ale postupom času a viacerými faktormi tieto prachové častice pohlcujú takmer celú atmosféru planéty a ich usadenie trvá aj niekoľko týždňov.



Obrázok 2.5 Obrázok poukazuje na prachovú búrku, ktorá bola zachytená sondou Mars Global Surveyor (MGS) v roku 2001. Z obrázka sa dá vyčítať ako časom búrka naberala na sile a postupne zakrývala celú planétu. Z tejto série snímok sa dá určiť približná teplota a množstvo prachu, ktoré bolo prítomné. Modrá farba reprezentuje pomerne čistú oblohu a červená farba poukazuje už na zvýšené množstvo prachových častíc [38], [49].

2.6 Zhrnutie kapitoly

V tejto kapitole bola sústredená pozornosť hlavne na planétu Mars. Bola prediskutovaná všeobecná charakteristika planéty, jej poloha a základné vlastnosti. Podrobnejšie bola rozobraná atmosféra. Prediskutované bolo zloženie a rozdelenie atmosféry. Zistené poznatky boli ďalej použité pri porovnaní planéty Mars a planéty Zem. Planéty boli porovnané z hľadiska zloženia atmosféry, podnebia a základných vlastností. Ďalšia časť kapitoly bola venovaná meteorologickým vlastnostiam. Boli spomenuté obdobia, ktoré sa na planéte striedajú, oblačnosť, prachové častice a búrky. Vo všeobecnosti má Mars premenlivé počasie s častou oblačnosťou. Počas striedania období sa planéta mení z pomerne teplej a prašnej na studenú a zamračenú. Prostredie šírenia v atmosfére zahŕňa molekuly plynov, oblačnosť, prachové častice, vodné pary a ďalšie minoritné zložky. Z dosiahnutých informácií a poznatkov sa dá predpovedať, že najväčšia degradácia možného signálu alebo žiarenia bude prebiehať v spodnej časti atmosféry.

3. PRENOSOVÉ PROSTREDIE MARSU

Tretia kapitola je venovaná charakteristike atmosféry Marsu ako prenosového prostredia. Pozornosť bude venovaná hlavne koncentráciám samotných prvkov a molekúl v atmosfére. Na základe koncentrácií a množstva molekúl v atmosfére je možné určiť atmosférické okná priepustnosti a taktiež určenie vhodných vlnových dĺžok na základe dostupných teoretických poznatkov a podkladov, ktoré sú použité pri riešení tejto problematiky.

3.1 Koncentrácia molekúl v atmosfére

V tejto časti bude opísaná samotná koncentrácia molekúl. Táto koncentrácia je určená ako teoretický predpoklad, ktorý bol určený pomocou výpočtov z dostupných informácií k danej problematike. Atmosféra vo všeobecnosti je zložená zo statickej časti a dynamickej časti. Statická časť je nemenná a do tejto časti patrí chemické zloženie atmosféry. Dynamická časť je pohyblivá a často meníaca sa. Do tejto časti patrí oblačnosť, hmla alebo zrážky [36]. V tejto práci bola venovaná pozornosť hlavne statickej časti z dôvodu dostatočne dostupných dát a zdrojov.

Ako už bolo spomenuté v druhej kapitole tejto práce, atmosféra Marsu je v súčasnosti zložená najmä z oxidu uhličitého (približne 96%), dusíka (približne 2,5%), argónu (približne 1,5%) a kyslíka (približne 0,15%) [38]. Ďalej je atmosféra zložená z minoritných častí atmosféry. Medzi tieto časti patria molekuly oxidu uhoľnatého, molekuly vody, oxid dusnatý a molekuly neónu. Zo všeobecnej znalosti by táto zmes plynov mala byť relatívne transparentná vo viditeľnom UV prostredí. Niektoré oblasti by mali byť len mierne absorbujúce v blízkej infračervenej oblasti a to hlavne kvôli slabým absorpčným pásom samotnej charakteristiky [13], [38].

Okrem percentuálneho porovnania atmosfér je nutné dať do pozornosti aj porovnanie koncentrácie molekúl v atmosfére na meter štvorcový. Najrozšírenejší prvok v atmosfére Marsu je, pri súčasnom zložení atmosféry, o mnoho viac zastúpený v porovnaní s atmosférou Zeme. Oxid uhličitý má v atmosfére Marsu koncentráciu zhruba 155 kg/m² [35]. V atmosfére Zeme má oxid uhličitý menšie zastúpenie (približne 0,04%), čo zodpovedá približne 0,414 kg/m² [35]. Tieto teoretické hodnoty koncentrácie v atmosfére boli dosiahnuté pomocou vzorca [35]

$$M_{prvok} = \frac{c \cdot p_s}{g}, \quad (3.1)$$

kde c je koncentrácia molekúl v atmosfére, p_s je povrchový atmosférický tlak a g je gravitačné zrýchlenie planéty [35].

–	Gravitačné zrýchlenie [m/s ²]	Povrchový atmosférický tlak [Pa]
Mars	3,721	610
Zem	9,8	101 350

Tabuľka 3.1 Porovnanie gravitačného zrýchlenia a povrchového atmosférického tlaku planéty Mars a planéty Zem. Tieto konštanty boli použité pri teoretických výpočtoch koncentrácií molekúl v atmosfére [35], [38], [46].

Samotný výpočet koncentrácie oxidu uhličitého v atmosfére Marsu bol stanovený spomínaným vzorcom. Výpočet aj dosadením bol stanovený ako [35]

$$M_{CO_2} = \frac{c \cdot p_s}{g} = \frac{0,9532 \cdot 610}{3,721} = 155 \text{ kg/m}^2. \quad (3.2)$$

Koncentrácie ďalších hlavných zložiek boli stanovené podobným spôsobom. Molekula dusíka má v atmosfére Marsu koncentráciu 4,43 kg/m². Argón má koncentráciu 2,62 kg/m². [35]

–	Mars	Zem
Oxid uhličitý – CO₂	155 kg/m ²	0,414 kg/m ²
Dusík – N₂	4,43 kg/m ²	8,1 kg/m ²
Argón – Ar	2,62 kg/m ²	0,093 kg/m ²
Kyslík – O₂	0,213 kg/m ²	2,17 kg/m ²
Vodné pary – H₂O	10–100 g/m ²	40 kg/m ²

Tabuľka 3.2 Porovnanie koncentrácie molekúl v atmosfére Marsu a Zeme, ktoré boli dosiahnuté podľa teoretických výpočtov z dostupných dát [36], [37], [38], [41], [42], [43].

Z tabuľky 3.3 môžeme vidieť hlavné vlastnosti planét, ktoré sú potrebné pre určenie koncentrácie molekúl v atmosfére. Z dostupných teoretických hodnôt sa dá skonštatovať, že povrchový atmosférický tlak na Marse je len približne 6/1000 tlaku Zeme [35], [38]. Priemerná molekulová hmotnosť Marsu v atmosfére je o niečo väčšia ako pri planéte Zem, pretože dominantný plyn, ktorý je v atmosfére Marsu oxid uhličitý, má väčšiu hmotnosť ako dusík v atmosfére Zeme. Ďalším faktom je, že kvôli nízkemu tlaku na povrchu Marsu je hustota atmosféry Marsu približne 61-krát menšia ako hustota Zeme [41], [46].

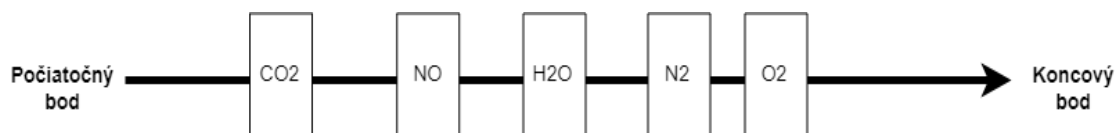
Planéta	Povrchový atmosférický tlak [Pa]	Priemerná teplota [K]	Molekulová hmotnosť [g/mol]	Hustota pri povrchu [kg/m ³]	Gravitačné zrýchlenie [m/s ²]
Mars	610	210	43,34	0,021	3,721
Zem	101 400	300	28,61	1,29	9,8

Tabuľka 3.3 Porovnanie základných vlastností medzi planétami, ktoré boli použité a brané do úvahy pri teoretických výpočtoch [35], [38], [36], [46].

3.2 Prenosové spektrum atmosféry Marsu a určenie vhodných vlnových dĺžok

V optickej komunikácii sa používajú filtre na dosiahnutie rôznych cieľov. Vo všeobecnosti optické filtre selektívne prepúšťajú jednu časť optického spektra, zatiaľ čo ostatné časti odmieta a odráža alebo absorbuje. Optické filtre rôznych výrobcov sa bežne používajú v mikroskopii, chemickej analýze alebo optickej komunikácii a sú dostupné v rôznych typoch a úrovniach presnosti. Často sa rozdeľujú na optical density (OD) a neutral density (ND) filtre [51].

Optical density (OD) filter opisuje množstvo energie, ktorá je blokovaná alebo odrazená filtrom [51]. Vysoká hodnota tejto optickej hustoty znamená nízky prenos a naopak nízka optická hustota znamená vysoký prenos určitého signálu. Absorpčné filtre s neutrálnou hustotou sú skonštruované tak, aby mali veľmi konštantnú priepustnosť v širokom spektrálnom rozsahu a to najmä vo viditeľnej spektrálnej oblasti [51]. Existujú dva typy ND filtrov: odrážajúce a absorpčné. Podobne ako sa využívajú optické filtre v priemysle tak sa dá povedať, že v atmosfére sa nachádzajú molekuly a častice rôznych prvkov, ktoré sa v podstate správajú ako optický filter a môžu signál odrážať alebo absorbovať [51].

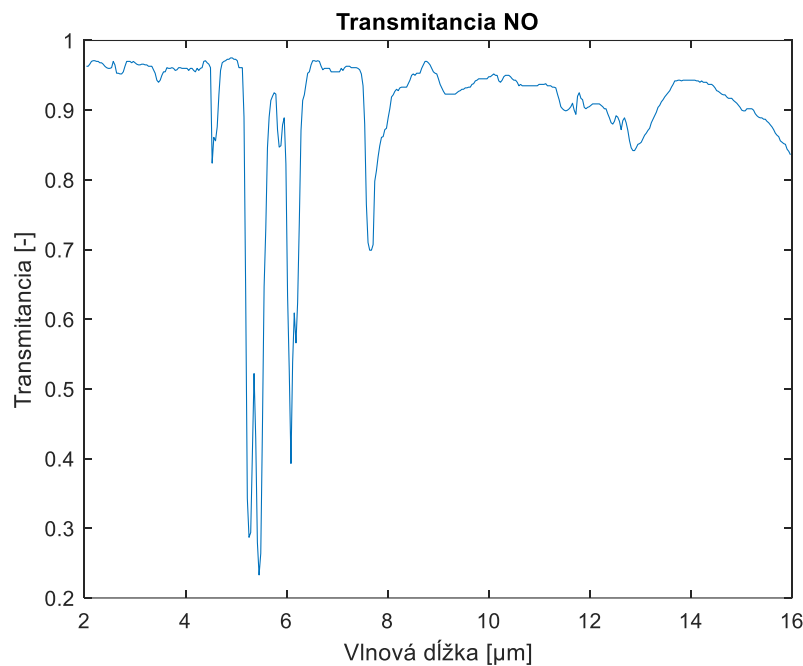


Obrázok 3.1 Zjednodušený obrázok prenosu signálu cez optické filtre, ktoré sú zobrazené ako molekuly prvkov, ktoré sú prítomné v atmosfére.

Ako už bolo spomenuté v predošlých častiach tejto práce súčasná atmosféra Marsu je primárne zložená z oxidu uhličitého, z dusíka a z argónu. Ďalej obsahuje menšie časti iných rôznych druhov molekúl, ako je napríklad kyslík, stopy vodnej pary, oxid uhoľnatý, neón alebo kryptón. Vo všeobecnosti takáto zmes plynov je relatívne transparentná vo viditeľnom prostredí. Taktiež to platí aj pre UV prostredie. Táto zmes by mala mierne

absorbovať oblasť, ktorá sa pohybuje okolo blízkej infračervenej oblasti. To je práve spôsobené slabým absorpčným pásom oxidu uhličitého v oblasti medzi 1 a 2 μm vlnovej dĺžky [38], [52], [53], [54].

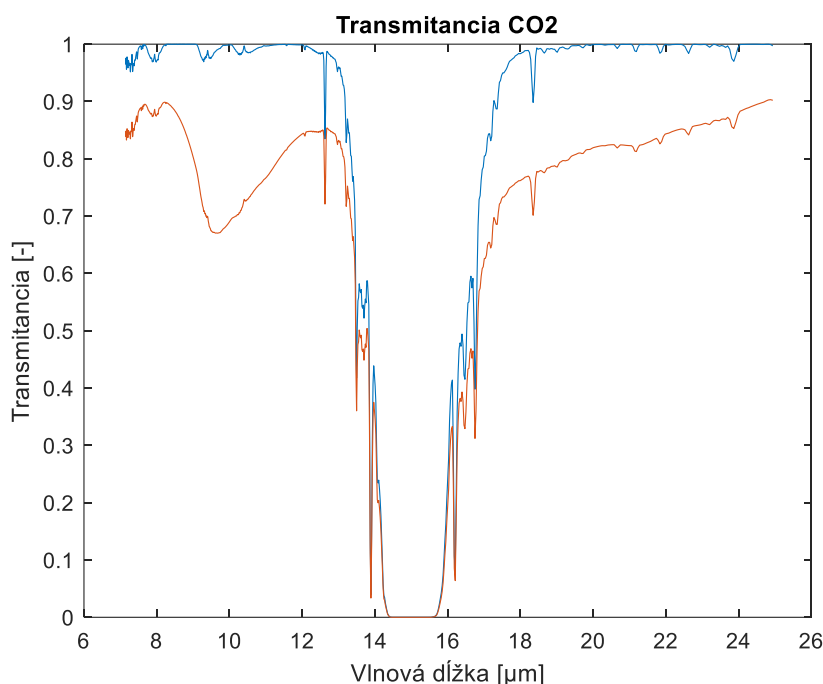
Z verejne dostupných zdrojov a dát pre prvky, ktoré sa nachádzajú v atmosfére Marsu sa dá určiť výsledné spektrum priepustnosti samotnej atmosféry [35]. Výsledné spektrum je ovplyvnené hlavne oxidom uhličítym, ktoré má najväčšie zastúpenie v atmosfére, oxid uhličitý [54] spolu s prachovými časticami, oxid uhoľnatý a oxid dusnatý [35], [38]. Vo všeobecnosti sa dá skonštatovať, že argón neabsorbuje žiadne alebo absorbuje minimálne vlnové dĺžky v spektre. Dusík z teoretických predpokladov by mal absorbovať len vlnové dĺžky menšie ako 0,1 μm . Tieto prvky sa teda do výsledného výpočtu a určenia spektra nebrali do úvahy. Podobne ako vodná para, ktorá nie je prítomná v atmosfére stále a je to dynamická časť atmosféry. Vodná para by mala pohlcovať takmer všetky vlnové dĺžky ak je v danom čase v atmosfére prítomná [35], [53]. Na obrázku 3.2 je zobrazená transmitancia prvku NO podľa dostupných dát a teoretických predpokladov. Z charakteristiky sa dá konštatovať, že oxid dusnatý nebude prepúšťať vlnové dĺžky od 4 do 6 μm a následne v okolí 8 μm .



Obrázok 3.2 Teoretické predpoklady transmitancie oxidu dusnatého, ktorý neprepúšťa hlavne vlnové dĺžky od 4 do 6 μm . Ďalšie menšie vrcholy, ktoré by mohli narušiť komunikáciu sa nachádzajú v oblasti okolo 8 μm [35], [53].

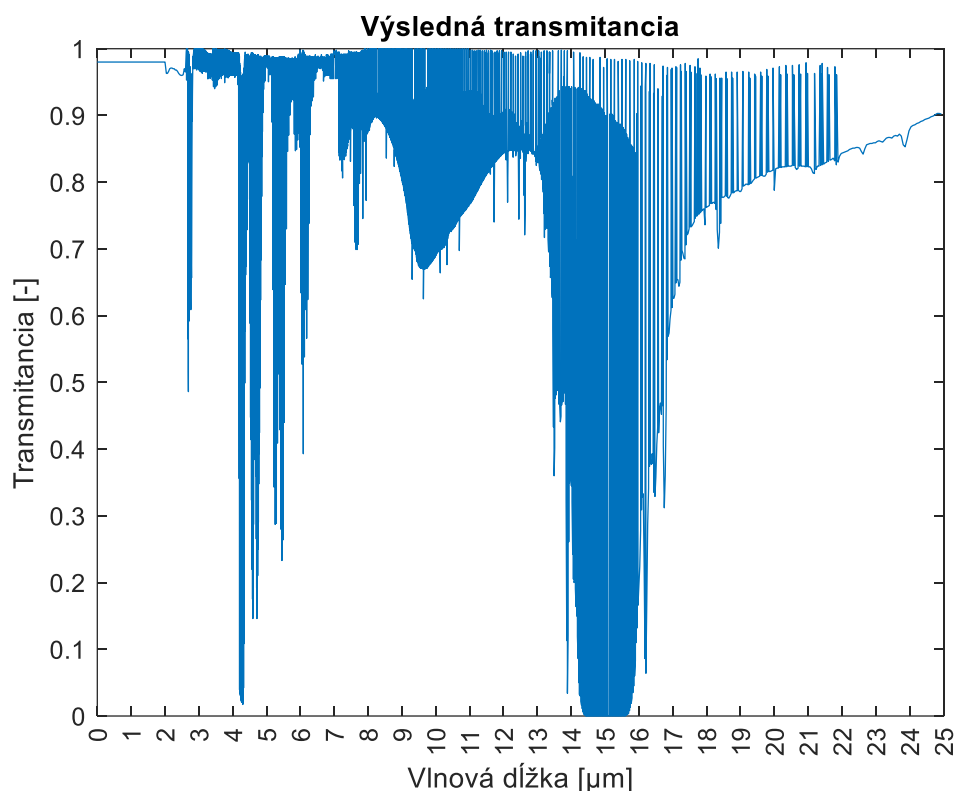
Hlavným prvkom atmosféry Marsu, ktorým je oxid uhličitý treba venovať najväčšiu pozornosť. Oxid uhličitý má dostatočne silné absorpčné pásmo sústredené hlavne okolo 15 μm (presnejšie medzi 12 a 18 μm), pomocou ktorých sa atmosféra sa ohrieva

a ochladzuje [35], [52], [54]. Nachádzajú sa tu ďalšie pomerne silné absorpčné pásy okolo 2,7 μm a 4,3 μm , vďaka čomu atmosféra pôsobí ako vcelku silný pohlcovač tepelného infračerveného žiarenia v atmosfére [35], [53], [54]. Je vhodné skonštatovať, že absorbuje asi 20 % tepelného žiarenia emitované zo samotného povrchu. Samotná charakteristika je vyobrazená na obrázku 3.3, kde modrou farbou je zobrazený čistý oxid uhličitý a oranžovou farbou je zobrazený oxid uhličitý spolu s prachovými časticami.



Obrázok 3.3 Transmitančné spektrum oxidu uhličitého. Modrou farbou je naznačená priepustnosť samostatného oxidu uhličitého a oranžovou farbou je zobrazený oxid uhličitý spolu s prachovými časticami, ktoré sú taktiež v atmosfére Marsu prítomné. Najväčším absorpčným pásmom sa z charakteristiky javí približne 15 μm [35], [52], [54].

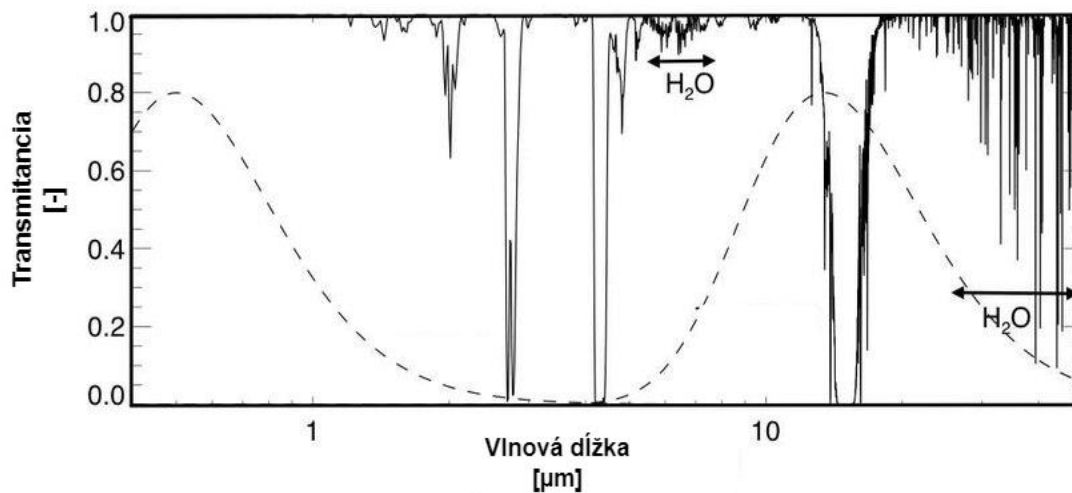
Z týchto dostupných teoretických zdrojov a informácii bola určená celková teoretická priepustnosť atmosféry Marsu. Ako je vidieť z výslednej charakteristiky, tak atmosféra je v podstate priepustná vo väčšine vlnových dĺžkach a to v rozmedzí 75 – 95 %. Najmenej priepustná je v okolí 15 μm a to z dôvodu prítomného oxidu uhličitého a prachových častíc, ktoré zaberajú väčšinu atmosféry [35], [38], [52], [53], [54]. Ďalej v okolí 4 až 6 μm sú absorbované dĺžky prítomným oxidom dusnatým a taktiež oxidom uhoľnatým [3], [35], [38], [52], [53], [54].



Obrázok 3.4 Celková priepustnosť atmosféry Marsu [3], [35], [38], [52], [53], [54].

3.3 Zhrnutie kapitoly

Kapitola prenosového prostredia atmosféry Marsu bola venovaná prediskutovaniu a určeniu koncentrácií molekúl a častíc v atmosfére. Pomocou dostupných dát boli určené koncentrácie prvkov v atmosfére a boli porovnané so zložením atmosféry Zeme. Taktiež boli porovnané konštanty ako gravitačné zrýchlenie a tlak pri povrchu, ktoré boli použité pri samotných výpočtoch hodnôt koncentrácií v atmosfére. Ďalšia časť kapitoly bola venovaná hlavnému spektru priepustnosti atmosféry Marsu. Boli spomenuté optické filtre, pretože molekuly v atmosfére sa čiastočne správajú ako optické filtre, pretože sú schopné odrážať alebo absorbovať rôzne vlnové dĺžky. Hlavným bodom kapitoly bolo prediskutovanie priepustnosti a zároveň absorpcie vlnových dĺžok vzhľadom k zloženiu atmosféry. Najväčšia absorpcia v spektre sa nachádza v okolí 15 μm , ktorá je spôsobená oxidom uhľíčitým spolu s prachovými časticami prítomnými v atmosfére. Z dosiahnutých informácií a poznatkov bola dosiahnutá charakteristika celkovej priepustnosti atmosféry a podľa predpovede najväčšie priepustnosti atmosféry sú jednotky (0–3 μm) mikrometrov alebo hodnoty vyššie ako 20 μm . Naopak podľa predpovede boli dosiahnuté najväčšie absorpcie vlnových dĺžok v oblasti 4 až 6 mikrometrov a v okolí 15 μm [35].

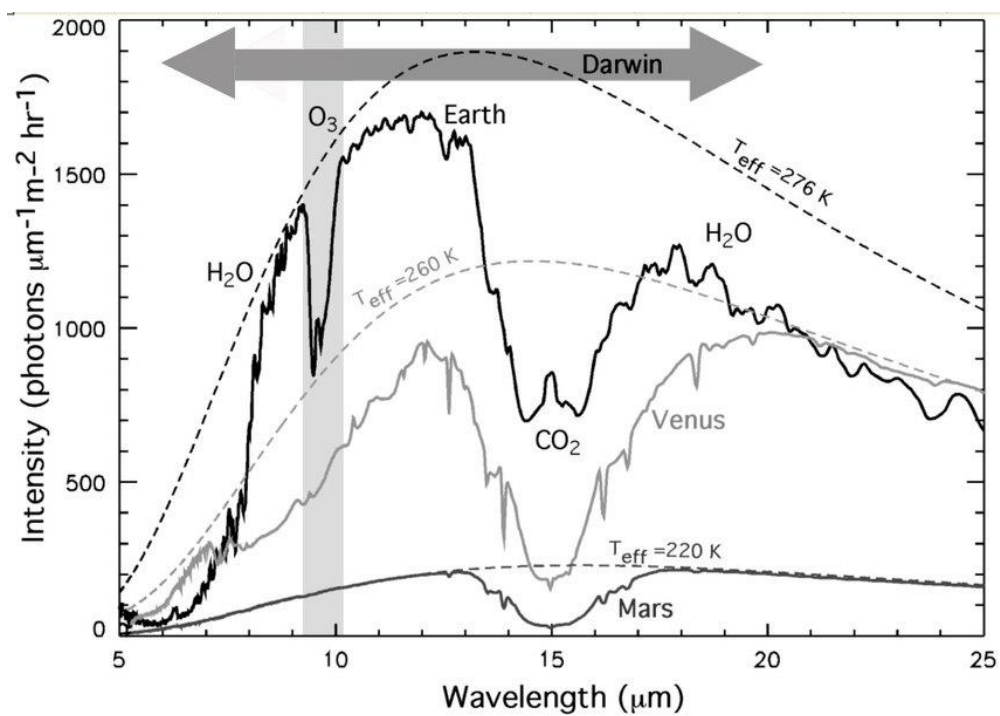


Obrázok 3.5 Celkové transmittančné spektrum atmosféry Marsu [35].

Na obrázku 3.5 je zobrazené celkové transmittančné spektrum, ktoré je vytvorené pre vlnové dĺžky od 0 do približne 14 μm . Transmittančné spektrum bolo vytvorené bez ohľadu na prachové častice a aerosóly, ktoré sa v atmosfére Marsu nachádzajú. Toto spektrum bolo zrealizované na základe výpočtov a meraní teplotnej štruktúry a zloženia atmosféry Marsu, ktoré boli spracované z misí COSPAR, ktoré skúmali atmosféru Marsu [35]. V tejto štúdií bolo dokázané, že najväčšie absorpcie sa nachádzajú v okolí 15 μm a to z dôvodu prítomného CO_2 v atmosfére. Ďalšie značné absorpcie sa nachádzajú v oblasti 3 až 6 μm , ktoré sú spôsobené CO_2 a ďalšími prvkami v atmosfére Marsu. V oblasti 12 μm a viac sa nachádzajú absorpcie, ktoré súvisia s molekulami H_2O .

Je možné skonštatovať, že teoretické výpočty, ktoré sú obsiahnuté v tejto bakalárskej práci sa veľmi nelíšia od výpočtov a meraní, ktoré boli spracované pomocou COSPAR [35]. Hlavné výsledky sú relatívne podobné a líšia sa len v niektorých častiach, ktoré významne nezasahujú do dôležitých vlnových dĺžok, ktoré sa používajú pri optických komunikáciách.

Ďalším výrazným faktorom a vplyvom na prenosové prostredie a transmittanciu Marsu má Slnko a jeho žiarenie. Vzhľadom k polohe Marsu je slnečné žiarenie slabšie a menej intenzívne. Tento rozdiel je zobrazený na obrázku 3.6, kde sú zobrazené prenosové prostredia spolu s intenzitou na Venuši, Zemi a Marse. Na ose x je zobrazená vlnová dĺžka a na ose y intenzita. Z charakteristiky je viditeľné, že Mars má vo svojej atmosfére najmenšiu intenzitu z týchto planét. Taktiež zaujímavosťou je, že na Marse je intenzita najväčšia v okolí vlnovej dĺžky 15 μm , ktorá nie je vhodná pre samotnú optickú komunikáciu.



Obrázok 3.6 Celkové transmittančné spektrum atmosféry Marsu [55], [56].

4. OPTICKÉ VYSIELAČE

Nasledujúca kapitola sa zaoberá prehľadom optických zdrojov, ktoré sa používajú v optickej bezdrôtovej komunikácii. V tejto kapitole je opísaná základná teória laserov a laserových diód, ich vlastnosti a samotné zloženie niektorých vybraných laserov. Táto kapitola prináša základné informácie a prehľad laserov. Taktiež je prediskutované všeobecné použitie optických zdrojov v komunikačných sieťach alebo aj v iných odvetviach. V ďalšej časti sa kapitola zaoberá laserovými diódami a jej základnými vlastnosťami.

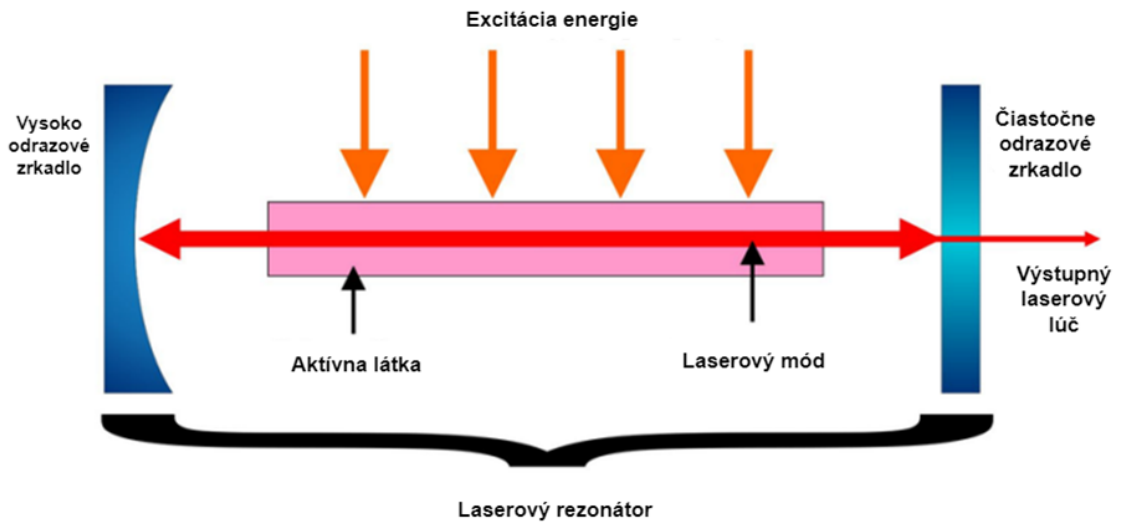
Ako už bolo spomenuté v úvode tejto práce laserová komunikácia je jednou z oblastí vo voľnom priestore, ktorá môže ťažiť z mnohých predošlých pokrokov a nových technológií, ktoré sú momentálne dostupné. Samotné komunikačné siete a systémy vo voľnom priestore majú veľký potenciál poskytnúť vysokorýchlostné pripojenie vhodné pre diaľkové medzi satelitné a vesmírne spojenia. Medzi hlboké vesmírne spojenia sa dá považovať prenos dát na stále častejšie spomínaný Mars. Tento prenos by mal byť schopný prekonať milióny kilometrov pri dostatočne veľkých prenosových rýchlostiach [1]. Práve spomínané optické komunikačné systémy využívajú technológiu laserov.

4.1 Laser

Do dnešnej doby bolo vytvorených a vyvinutých mnoho vedeckých prístrojov pri kozmických misiách, ktoré sú schopné zbierať dáta vo vysokom rozlíšení alebo je to obrovský súbor dát na ďalšie spracovanie. Pri týchto misiách sa stále hľadajú možnosti ako preniesť tieto nazbierané údaje, napríklad z nejakého geostacionárneho satelitu na povrch Zeme. Práve pomocou laserov je možné nielen urýchliť prenos dát a informácii, ale aj podporovať prenos väčšieho množstva samotných dát [55]. Podľa teórie o komunikáciách by mala laserová komunikácia byť schopná preniesť na planétu Zem minimálne desaťkrát väčší objem dát ako tradične používané rádiové systémy [55].

Vo všeobecnosti sa laser skladá z troch hlavných častí: rezonátor, aktívna látka a budenie [58], [59]. Ak by to malo byť rozobraté po častiach, tak optický rezonátor je v samej podstate priestor, ktorý je ohraničený dvoma zrkadlami [58]. Laserové zrkadlá, ktoré sa väčšinou používajú na konštrukciu rezonátorov sú vysoko odrážajúce dielektrické zrkadlá, vďaka ktorým dochádza k mnohonásobným odrazom [59]. Charakteristika rezonátoru je daná práve tvarom použitých zrkadiel. Pre ultrarýchle lasery sa často používajú disperzné zrkadlá [59]. V laseroch do samotného priestoru rezonátora je umiestnená aktívna látka. Táto aktívna látka je to, čo dáva pomenovanie laseru a môže mať rôzne energetické úrovne. Zloženie môže byť tvorené z plynnej, kvapalnej alebo tuhej látky. Aby to ako celok bolo schopné fungovania aktívna látka potrebuje byť dodávaná vonkajšou energiou, ktorá sa nazýva budenie. Samotné budenie je akýsi systém,

do ktorého je potrebné dodávať energiu, ktorá spôsobuje excitáciu v aktívnej látke. Na obrázku 4.1 je zobrazenie laseru a jeho častí, ktoré boli opísané v tejto kapitole.

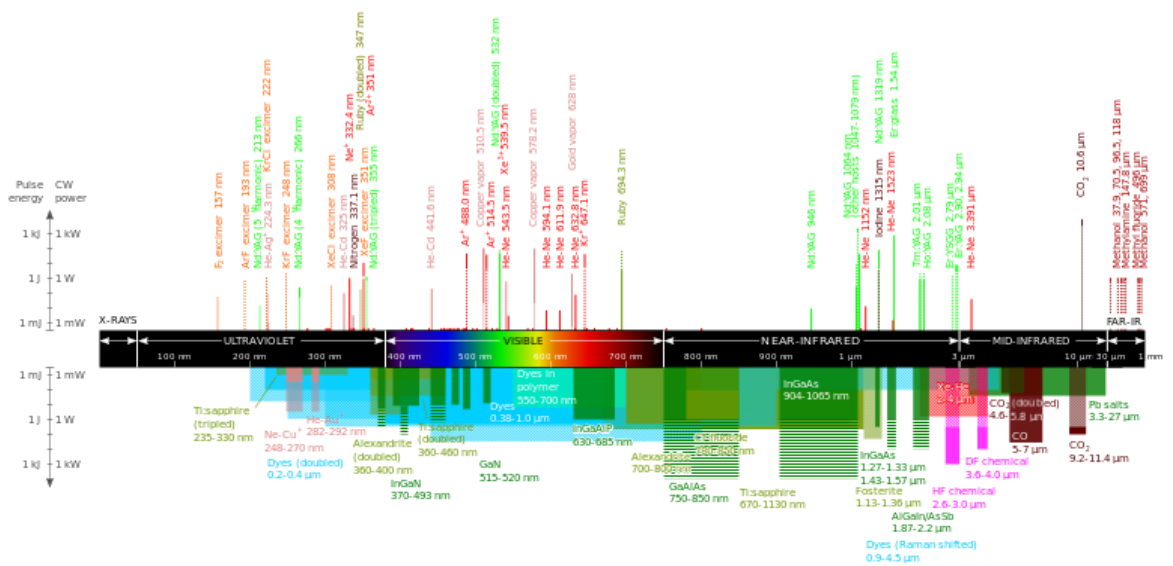


Obrázok 4.1 Časti laseru a jeho zloženie [60].

4.2 Typy laserov

História a teória laserov siaha do roku 1917, kedy Albert Einstein objasnil princíp javu stimulovanej emisie žiarenia. Ďalším krokom bol rok 1952, kedy A. Prokorov a N. Basov opísali teóriu maseru, ktorý vyžaroval mikrovlnné žiarenie [61]. Prvý laser uzrel svetlo sveta v roku 1960, kedy Theodore Harold Haiman zostrojil pevnolátkový laser [63].

Laser je vo svojej samej podstate koherentné, monochromatické a polarizované žiarenie. Medzi základne parametre laserového žiarenia patria hlavne vlnová dĺžka, šírka spektrálnej čiary, rýchlosť šírenia, optická intenzita a výkon alebo energia a hybnosť fotónov.



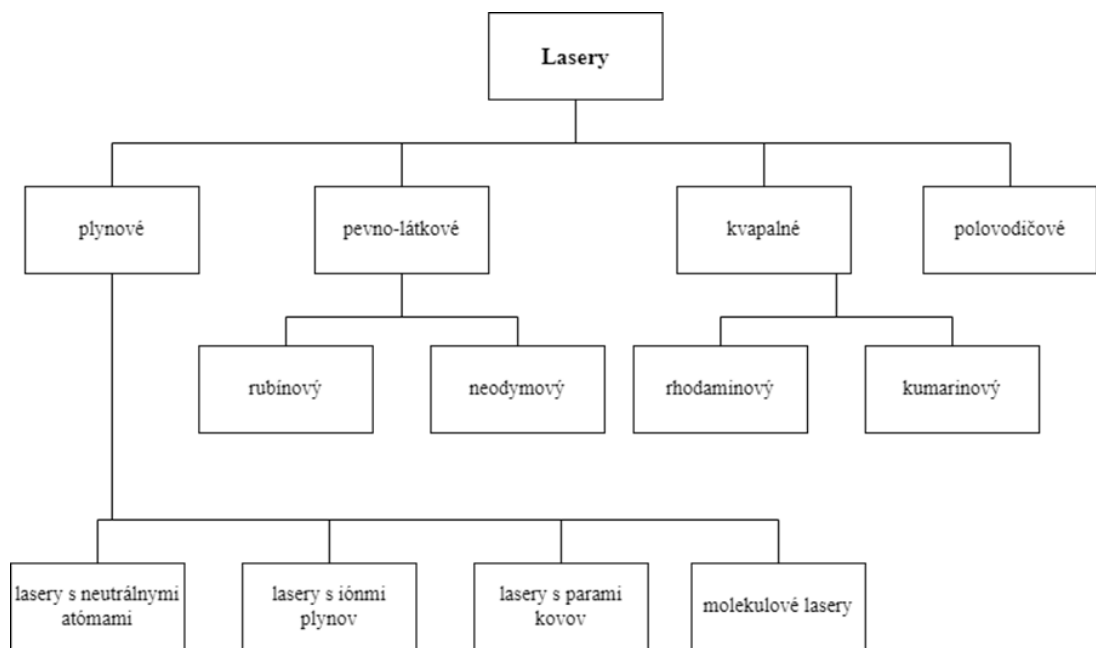
Obrázok 4.2 Všeobecný prehľad laserov a vlnových dĺžok [64].

Lasery sa ďalej dajú rozdeliť podľa rôznych hľadísk:

- podľa aktívnej látky: respektíve aktívneho prostredia, tak sú lasery pevnolátkové, plynové, kvapalné alebo polovodičové [58], [59], [61]. Vzhľadom k tomu, že rozdelenie laserov podľa aktívneho prostredia je zložitejšie, tak na obrázku číslo dva je zobrazené podrobnejšie rozdelenie laserov podľa použitej aktívnej látky.
- podľa typu budenia: sú napríklad optické čerpanie, ktoré funguje na princípe dodávania energie pomocou optického pulzu [59], [61], [62]. Budenie elektrickým poľom využíva elektrický výboj. Toto budenie sa využíva zväčša pri plynových laserov. Medzi ďalšie typy budenia sú uvádzané chemické čerpanie, budenie elektrónovým zväzkom alebo budenie expanziou horúceho plynu [62].
- podľa vlnovej dĺžky: ladenie vlnovej dĺžky sa častokrát dosahuje vkladáním nejakého druhu optického filtra do samotného laserového rezonátora [59]. Optické filtre je taktiež možno použiť na odstránenie nežiaducich spektrálnych zložiek. Filtre s neutrálnou hustotou, ktoré už boli spomenuté v predošlej kapitole, a iné optické atenuátory sa používajú na zníženie optického výkonu [59].
- podľa kontinuálneho alebo pulzného režimu: výstupné žiarenia sú delené na kontinuálny alebo pulzný režim. Použitie svetelného zdroja pomocou kontinuálneho režimu (CW) v praxi znamená, že je v prevádzke nepretržite a kontinuálne vyžaruje. Prvý laser, ktorý bol použitý v kontinuálnom režime, bol hélium-neónový laser, ktorý pracoval na vlnovej dĺžke 1153 nm [65]. Lasery, ktoré pracujú v pulznom režime sú akýmsi opakom kontinuálneho režimu. Tieto lasery v pulznom režime vyžarujú žiarenie vo forme optických impulzov. V závislosti od trvania impulzu, energie impulzu, frekvencie opakovania impulzu a požadovanej vlnovej dĺžky sa používajú odlišné typy impulzných laserov [66].
- podľa úrovne výkonu

Lasery	Označenie laseru v programe pre mód Automat	Vlnová dĺžka [μm]	Výstupný výkon [mW]	Životnosť laseru	Krátka charakteristika
HeNe	Laser 1	0,63	10	50 000 hodín	Je vyžadovaná externá modulácia a má obmedzený výkon.
CO ₂	Laser 2	1,06	1 – 2	20 000 hodín	Náročná modulácia, rozsah v infračervenej oblasti.
GaAs / GaAlAs	Laser v programe nie je uvedený.	0,78 – 0,905	1 – 40	20 000 hodín	Spoľahlivé, malé rozmery, kompaktné, priamo a jednoducho modulovateľné.
Laserová dióda	Laser 3	1,55	200	Nešpecifikované	Používa sa pri komunikácii medzi satelitom a pozemnou stanicou.
AlGaAs	Laser 4	0,830	60	Nešpecifikované	Používa sa pri komunikácii medzi satelitmi na obežnej dráhe.
Argon-Ion laser	Laser v programe nie je uvedený.	0,5145	13 000	Nešpecifikované	Používa sa pri komunikácii medzi pozemnou stanicou a satelitom.
Nd:YAG	Laser 5	0,532	100	50 000 hodín	Kryštálový laser ,vyšší výkon a životnosť.
Nd:YAG	Laser 6	1,064	do 100	Nešpecifikované	Kryštálový laser, používa sa pri komunikácii medzi satelitmi na obežnej dráhe.

Tabuľka 4.1 Príklady z dostupných a používaných laserov v optickej komunikácii [4], [67], [68].



Obrázok 4.3 Rozdelenie laserov podľa aktívnej látky [3], [58], [59], [61].

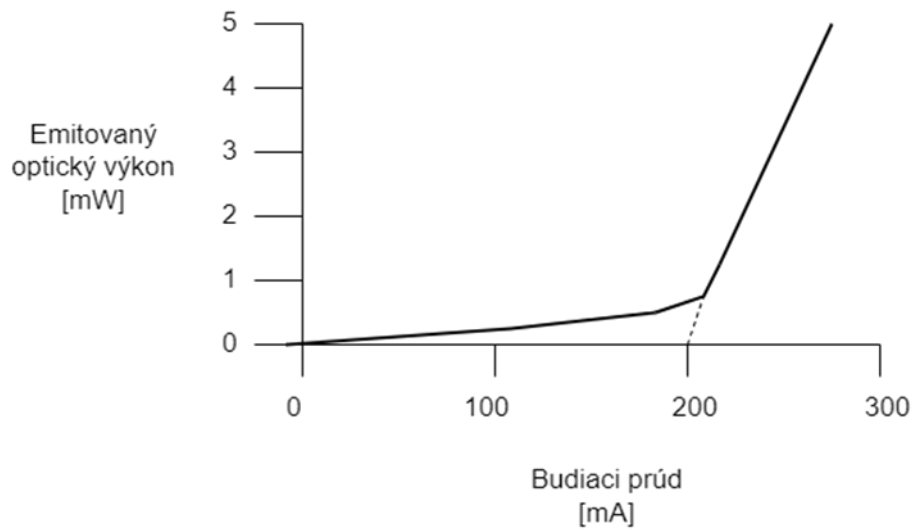
4.3 Laserové diódy

Ďalším významným zdrojom optického žiarenia, okrem laserov, sú laserové diódy. V samej podstate sú to polovodičové súčiastky, ktoré sa využívajú pri optických komunikáciách, ale aj v rôznych ďalších technických a medicínskych odvetviach. Je to typ zdroja optického žiarenia s mnohými použiteľnejšími vlastnosťami v praxi v porovnaní s nekoherentnými zdrojmi, ktorými môžu byť LED diódy [69].

Sú to polovodičové súčiastky, kde prevažuje stimulovaná emisia [59], [61]. Tento samotným proces pri laserových diódach je špecifický, pretože v polovodičových kryštáloch sa aktívne atómy nachádzajú tesne vedľa seba. Žiarivé prechody sa neuskutočňujú medzi diskretnými energetickými hladinami, ale nachádzajú sa medzi energetickými pásmi [69]. Samotnou podmienkou pre ich stimuláciu je

$$E_g < h\nu, \quad (4.1)$$

kde E_g je šírka zakázaného pásu, h je Planckova konštanta a ν je frekvencia žiarenia.



Obrázok 4.4 Svetelná charakteristika laserovej diódy [69].

Na obrázku 4.4 je zobrazená závislosť vyžarovaného optického výkonu na vstupnom budiacom prúde. Úzka oblasť čerpania energie, pri ktorej dochádza k náhlemu prechodu z režimu spontánnej emisie do režimu stimulovanej emisie, sa nazýva prah [69]. Do hladiny približne 200 mA (prahový prúd IP) laserová dióda vyžaruje ako LED (režim nekoherentného zdroja). Od tejto oblasti ďalej nám laserová dióda vyžaruje podobne ako laser. Po dosiahnutí tohto prahu laserového generovania prudko narastá výkon stimulovaného žiarenia a opäť dochádza k lineárnej závislosti na veľkosti budiaceho prúdu [69].

4.4 Prehľad typov laserových diód

Laserové diódy, obdobne ako lasery, sa delia podľa rôznych typov použitia, štruktúry a podobne. Podľa vyžarovania sú laserové diódy rozdelené na hranovo vyžarujúce lasery a na plošne vyžarujúce lasery.

Podľa vnútornej štruktúry sa laserové diódy delia na štyri hlavné časti [70]:

- Homoštruktúrne lasery
- Heteroštruktúrne lasery
- Lasery s rozloženou spätnou väzbou
- Lasery s kvantovými jamami

Hlavným princípom homoštruktúrnych laserových diód je prechod PN a zároveň medzi vrstvami nedochádza k výraznej zmene indexu lomu [70]. Pri generácii žiarenia dochádza k značným stratám, ktoré spôsobuje únik žiarenia do okolitých vrstiev polovodiča [70]. Práve z týchto dôvodov má nízku účinnosť a nie je často používaný v praxi.

Heteroštruktúrne laserové diódy sú charakteristické skokovými zmenami indexu lomu [70]. Podľa počtu heteroprechodov sa delia tieto laserové diódy na lasery s jednou heteroštruktúrou (SHL) a s dvojitou heteroštruktúrou (DHL) [70].

4.5 Aplikácie laserových diód v praxi

So súčasnými vedomosťami a technológiami sa pripravujú lasery so zaručenými konkrétnymi parametrami a dosahujú dobu života až do 105 hodín [71]. Vďaka týmto technológiám majú laserové diódy veľmi široké možnosti aplikácie v rôznych oblastiach vedy a komunikačných technológiách. Medzi najvýznamnejšie použitie laserových diód sa považujú práve optické systémy a komunikácie. Pri prenosoch sa využívajú optické vlákna, ktoré pri niektorých vlnových dĺžkach dosahujú minimálne útlmy. Najčastejšie sa jedná o vlnové dĺžky 800-900 nm a 1,3-1,55 μm [71]. Laserové diódy menších výkonov sa používajú napríklad v laserových tlačiarňach, kopírkach, laserových ukazovadlách alebo pri CD prehrávačoch.

Laserové diódy majú v praxi veľké využitie, pretože majú dostatok výhodných vlastností. Ponúkajú vysokú účinnosť premeny energie, pomerne malé rozmery, jednoduchosť súčiastok a cenovú dostupnosť. Medzi nevýhody patria nižšia teplotná stabilita, nižší stupeň koherencie a fakt, že nie sú schopné pokryť celé spektrum [69], [71].

5. NÁVRH PROGRAMU PRE VÝPOČET ENERGETICKEJ BILANCIE OPTICKÉHO SPOJA V PROSTREDÍ MARSU

Záverečná kapitola je venovaná približnému a teoretickému návrhu optického bezkáblového spoja. Pozornosť bude venovaná hlavným princípom a požiadavkám pri návrhu takéhoto druhu spojenia. Budú spomenuté základné prvky pre návrh a ich rozdelenie. Ďalej sa kapitola bude venovať návrhu programu pre výpočet energetickej bilancie optického bezkáblového spoja v prostredí planéty Mars.

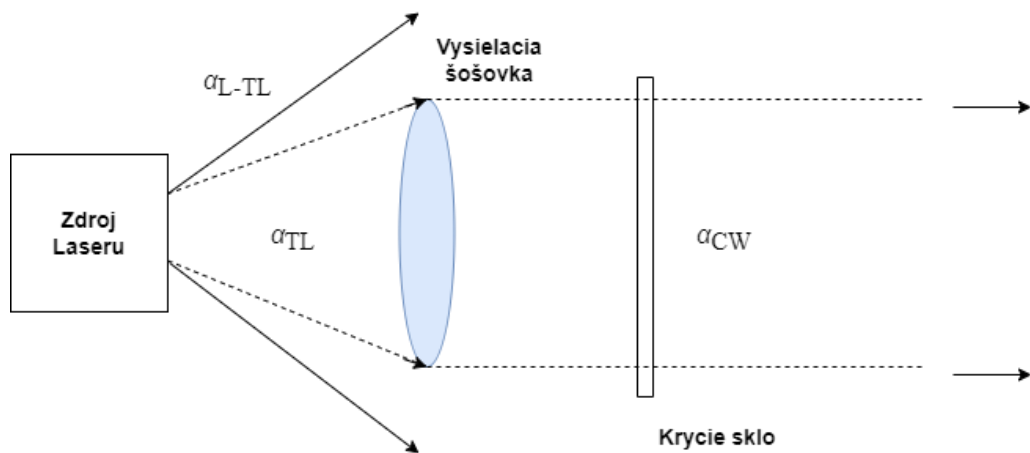
5.1 Návrh optického bezkáblového spoja

Pre správny návrh optického bezkáblového spoja je potrebné vopred definovať požiadavky spoja a samotného prenosu signálu. Hlavnými požiadavkami pre vytvorenie FSO spoja sú rýchlosť prenosu dát, rozsah prenášaných dát, cena a miesto, kde je potrebné vytvoriť optický bezkáblový spoj [1], [14]. Ďalšou dôležitou súčasťou je vhodné určenie vlnovej dĺžky.

Na začiatku návrhu optického spoja je potrebné správne definovať časti vysielacej jednotky. V prvom bode sa rieši výber vhodného optického zdroja [1], [72], [73], [75]:

- podľa vlnovej dĺžky: väčšina FSO systémov pracuje v blízkej infračervenej oblasti, ktorá sa pohybuje medzi 750 až 1600 nm. V atmosfére sa najčastejšie používajú vlnové dĺžky 850 nm a 1550 nm.
- podľa vysielacieho optického výkonu: výkony sa určujú podľa charakteristiky samotného spoja. Výkony môžu byť nízke (komunikácia krátkeho dosahu na čípe), stredné alebo vysoké (spojenie medzi Zemou a družicou).
- podľa miery koherencie: využívajú sa lasery, laserové diódy alebo LED. Pre koherentné komunikácie sa používajú lasery a laserové diódy. Pre nekoherentnú komunikáciu sa v praxi využívajú laserové diódy a LED.
- podľa spektrálnej charakteristiky: samotná spektrálna charakteristika súvisí s mierou koherencie. Spektrálna charakteristika na vysielacej jednotke je dôležitá vzhľadom k správne návrhu interferenčného filtra na prijímacej jednotke.

Ďalšou časťou návrhu je výber vysielacej šošovky. Dôležitý je hlavne výber materiálu vzhľadom k spektrálnej priepustnosti [73], [75]. Základom je aby šošovka maximálne prepúšťala požadovanú vlnovú dĺžku. Šírka šošovky sa vyberá vzhľadom k indexu lomu prostredia. V praxi to funguje tak, že čím je vyšší index lomu prostredia, tak tým môže byť šošovka tenšia, ale má väčší geometrický vplyv na zalomenie optického zväzku [1], [75]. V neposlednom rade je dôležité vybrať vhodnú veľkosť šošovky. Táto veľkosť má vplyv na to, koľko výkonu šošovkou prejde.

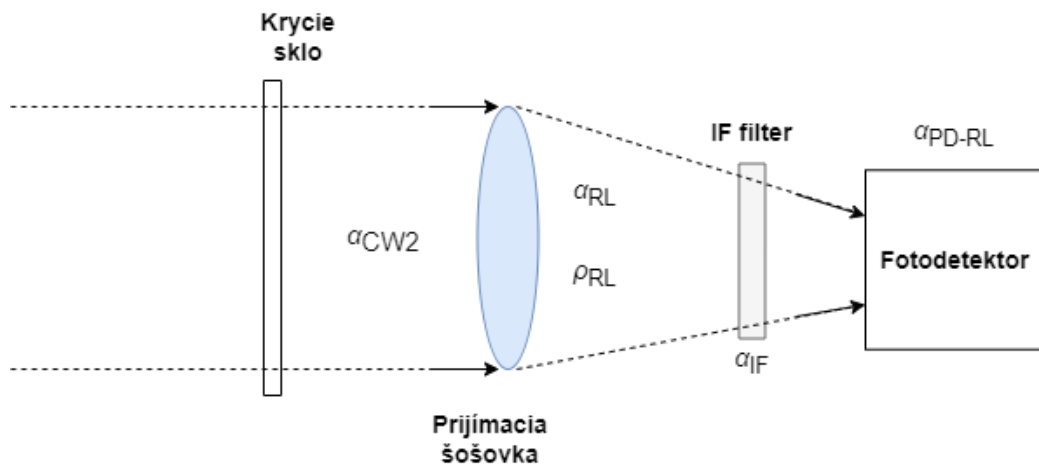


Obrázok 5.1 Schéma vysielacej jednotky a zobrazenie α_{L-TL} útlmu na väzbe laser – vysielacia šošovka, α_{TL} útlm na vysielacej šošovke a α_{CW} útlm na vysielacom krycom skle [3], [72], [75].

Na obrázku 5.1 sú zobrazené útlmy na vysielacej jednotke optického spoja. Útlm na väzbe laser a vysielacia šošovka súvisí s veľkosťou vysielacej šošovky. Dochádza k tomu, že iba časť optického zväzku dopadne na šošovku a zvyšok zväzku a výkonu bude stratený. Taktiež sa v praxi využíva krycie sklo, ktoré väčšinou je naklonené a to z dôvodu spätného odrazu. Je dôležité, aby prípadné odrazy boli odklonené do stratena a neznižovali výkon laseru. Ďalším dôvodom naklonenia je, že na danom skle sa horšie zachytávajú dažďové kvapky alebo prachové častice.

Návrh bezkáblového spojenia ďalej pokračuje správnym návrhom prijímacej jednotky, ktorá sa skladá z viacerých častí [72], [74], [75]:

- výber vhodného fotodetektoru: ak sa na prijímacej jednotke nachádza dostatočná úroveň signálu tak sa používa fotodetektor typu PIN. Pre slabšie signály, ktoré sú detekovateľné na prijímacej jednotke sa využívajú lavínové fotodetektory.
- výber prijímacej šošovky: z dôvodu zisku na prijímacej jednotke je vhodné vybrať a použiť prijímaciu šošovku čo najväčšiu. Pri vesmírnych misiách nastáva problém, že tieto šošovky nemôžu byť príliš veľké vzhľadom k ich používaniu a vyneseniu do vesmíru. Samotný útlm sa stanovuje obdobne ako pri vysielacej šošovke.
- interferenčný filter: používa sa na minimalizovanie vplyvu šumu okolitého prostredia a pozadia.
- krycie sklo: má obdobnú funkciu a útlm ako pri vysielacej jednotke.



Obrázok 5.2 Schéma prijímacej jednotky a zobrazenie α_{CW2} útlmu na krycom skle, α_{RL} útlm na prijímacej šošovke, α_{IF} útlm na interferenčnom filtre a α_{PD-RL} útlm na prijímacej šošovke a fotodetektore. Zisk na prijímacej šošovke zobrazuje ρ_{RL} [3], [72], [75].

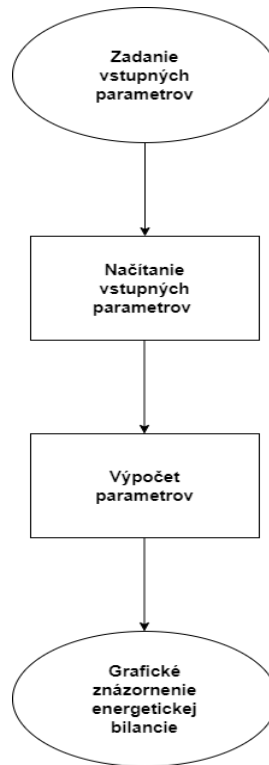
Na obrázku 5.2 je naznačená ilustrácia útlmov na prijímacej jednotke optického spoja. V prvom rade je naznačený útlm krycieho skla, ktorý je v samej podstate rovnako definovaný ako pri vysielačnej jednotke. K ďalšiemu útlmu dochádza na väzbe šošovky a detektoru signálu. Útlm na tejto väzbe vzniká pokiaľ je kvôli sférickej aberácii šošovky veľkosť stopy v ohnisku väčšia ako je samotná aktívna plocha fotodetektoru na prijímacej jednotke. Vo všeobecnosti je potrebné mať minimálnu veľkosť stopy v ohnisku. V praxi je systém navrhovaný tak, aby k takémuto útlmu nedochádzalo. Práve preto je v praxi potrebné navrhovať sofistikovanejšie prijímacie jednotky.

Vysielačie a prijímacie jednotky sú založené na stacionárnych parametroch, ktoré je návrhár schopný spočítať a optimalizovať podľa požiadaviek. Prenos signálu priestorom je najčastejšie definovaný štatistickým prístupom. Vo všeobecnosti sa rozlišuje niekoľko častí prenosu signálu priestorom [72], [73], [75]:

- útlm zameraním: útlm vzniká nedokonalým a nie úplne presným zameraním vysielača na prijímač. Dá sa to kompenzovať adaptívnym dosmerovaním a kalibráciou jednotiek.
- útlm atmosférou: súvisí to s atmosférickými oknami priepustnosti a výberom vhodných vlnových dĺžok. Tento útlm je premenlivý vzhľadom k rôznym rozptylom a absorpciou na hydrometeoroch alebo útlm turbulencií v atmosfére.
- útlm šírením: vzniká vzhľadom k rozšíreniu zväzku s rastúcou vzdialenosťou od zdroja a následnou detekciou jednobodovým prijímačom.
- zosilnenie na prijímacej optike: v praxi detektor nie je jednobodový a jeho veľkosť je definovaná veľkosťou prijímacej šošovky. Následne dochádza k zosilneniu na prijímacej jednotke prenosu signálu.

5.2 Program pre návrh energetickej bilancie optického spoja

Cieľom tejto časti práce bolo navrhnuť program pre výpočet priestorových a energetických vlastností optického zväzku. Od samotného programu sa vopred očakáva, aby bolo možné definovať charakteristiku vysielačieho a prijímacieho miesta a nastavenie parametrov vysielača a prijímača optického spoja. Ďalšou úlohou programu je spracovať zadané vstupné parametre a vypočítať energetickú bilanciu spoja a graficky zobrazíť výkonový diagram spoja.



Obrázok 5.3 Vývojový diagram programu pre výpočet energetickej bilancie optického spoja.

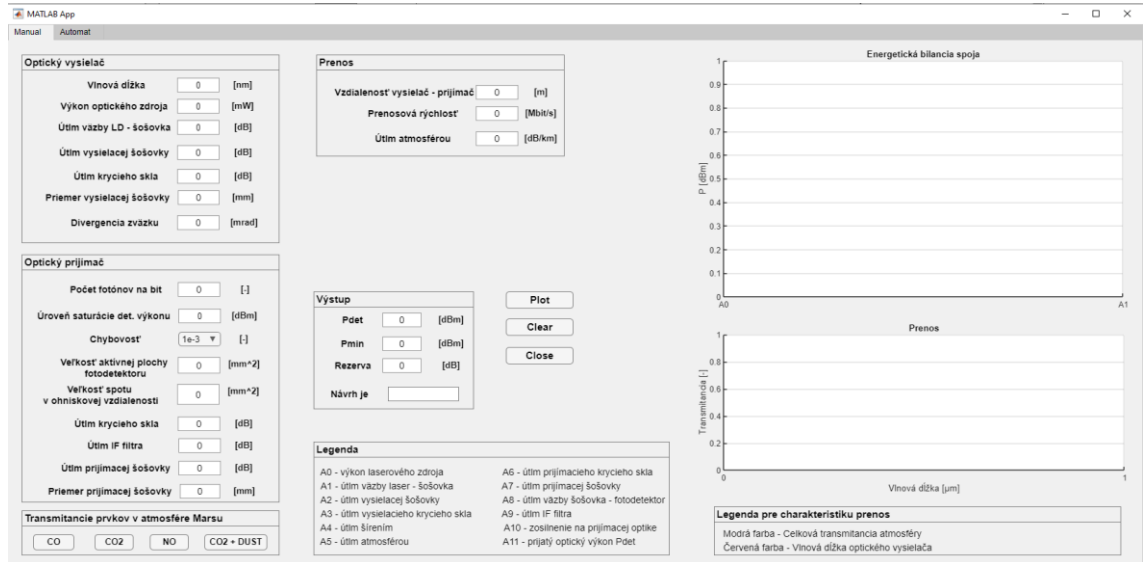
5.2.1 Jednotlivé časti programu

Po spustení aplikácie sa zobrazí okno celého programu. V hornej lište je užívateľovi umožnené si vybrať zadávanie hodnôt manuálne alebo automaticky. Po výbere okna Manual je toto okno rozdelené na niekoľko osobitných častí. Hlavné časti pre okno Manual, kde samotný užívateľ manuálne zadáva vstupné parametre optického spoja sú:

- optický vysielač: do tejto časti programu užívateľ zadáva vstupné hodnoty optického spoja, medzi ktoré patria vlnová dĺžka λ , výkon optického zdroja P , útlm na väzbe laser – šošovka α_{L-TL} , útlm vysielačieho šošovky α_{TL} , útlm na vysielačom krycom skle α_{CW} , priemer vysielačieho šošovky D_{VOS} a divergencia zväzku φ optického zdroja.
- optický prijímač: v časti optického prijímača je užívateľ programu schopný zadať

počet fotónov na bit n pri prenose, úroveň saturácie detegovaného výkonu, veľkosť aktívnej plochy fotodetektora, chybovosť BER, veľkosť spotu v ohniskovej vzdialenosti, útlm prijímacieho krycieho skla α_{CW2} , útlm interferenčného filtra α_{IF} , útlm prijímacej šošovky α_{RL} a priemer prijímacej šošovky D_{POS} .

- prenosové prostredie: v tejto časti je možné zadať vzdialenosť medzi prijímačom a vysielačom L , prenosovú rýchlosť v_i a útlm atmosférou A_{ATM} .

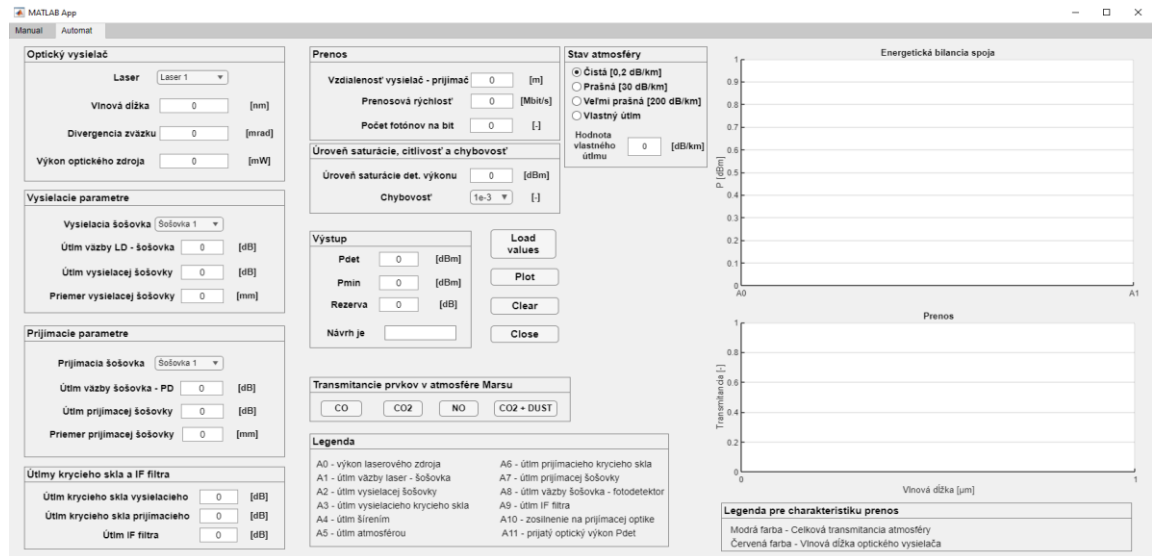


Obrázok 5.4 Zobrazenie programu spolu s jednotlivými časťami pre okno Manual.

Hlavné časti pre okno Automat, kde samotný užívateľ zadáva vstupné parametre optického spoja pomocou preddefinovaných laserov a šošoviek sú:

- optický vysielač: v tejto časti programu si užívateľ môže vybrať zo šiestich ponúkaných laserov. Po výbere z laserov sa v tejto časti po stlačení tlačidla Load values načítajú hodnoty, medzi ktoré patria vlnová dĺžka λ , výkon optického zdroja P a divergencia zväzku φ optického zdroja.
- vysielačie parametre: v časti vysielačích parametrov je užívateľ programu schopný si vybrať medzi 4 preddefinovanými šošovkami, kde opäť po stlačení tlačidla Load values sa zobrazia hodnoty útlmu na väzbe laser – šošovka α_{L-TL} , útlmu vysielačej šošovky α_{TL} a priemer vysielačej šošovky D_{VOS} .
- prijímacie parametre: v tejto časti je má užívateľ opäť na výber zo 4 preddefinovaných šošoviek, kde po načítaní hodnôt sa zobrazia hodnoty útlmu na väzbe šošovky a fotodetektora α_{PD-RL} , útlmu prijímacej šošovky α_{RL} a priemer prijímacej šošovky D_{POS} .
- útlmy krycieho skla a IF filtra: do týchto častí si užívateľ doplní útlm krycieho skla na vysielačej jednotke α_{CW} , respektíve prijímacej jednotke α_{CW2} a útlm interferenčného filtra α_{IF} .

- úroveň saturácie, citlivosť a chybovosť: užívateľ si určí úroveň saturácie detegovaného výkonu a chybovosť z troch preddefinovaných chybovostí.
- stav atmosféry: určuje či je atmosféra čistá (útlm zväzku 0,2 dB/km), prašná (útlm zväzku 30 dB/km) alebo veľmi prašná atmosféra (útlm zväzku 200 dB/km). Taktiež je umožnené si prípadne zadať vlastnú hodnotu útlmu atmosféry. Používateľ aplikácie jednoducho označí Vlastný útlm a dopíše hodnotu útlmu.
- prenos: užívateľ doplní hodnoty vzdialenosti medzi prijímačom a vysielačom L , prenosovú rýchlosť v_i a počet fotónov na bit n .



Obrázok 5.5 Zobrazenie programu spolu s jednotlivými časťami pre okno Automat.

Ďalšia časť je grafická, ktorá zobrazuje graf energetickej bilancie optického spoja na základe vstupných parametrov a výpočtov. Na ose x je graf rozdelený na časti od A0 do A11. Ku grafu je samostatne priložená aj legenda popisujúca jednotlivé časti. Legenda pozostáva z bodov:

- A0 je výkon laserového zdroja
- A1 je útlm väzby laser – šošovka
- A2 je útlm vysielačej šošovky
- A3 je útlm vysielačieho krycieho skla
- A4 je útlm šírením
- A5 je útlm atmosférou
- A6 je útlm prijímačieho krycieho skla
- A7 je útlm prijímačej šošovky
- A8 je útlm väzby šošovka – fotodetektor
- A9 je útlm IF filtra
- A10 je zosilnenie na prijímačej optike
- A11 je prijatý optický výkon

Legenda	
A0 - výkon laserového zdroja	A6 - útlm prijímacieho krycieho skla
A1 - útlm väzby laser - šošovka	A7 - útlm prijímacej šošovky
A2 - útlm vysielacej šošovky	A8 - útlm väzby šošovka - fotodetektor
A3 - útlm vysielacieho krycieho skla	A9 - útlm IF filtra
A4 - útlm šírením	A10 - zosilnenie na prijímacej optike
A5 - útlm atmosférou	A11 - prijatý optický výkon P_{det}

Obrázok 5.6 Legenda popisujúca jednotlivé časti bilančného grafu.

Druhý graf zobrazuje prenos optického zväzku, kde poukazuje na ose y na transmitanciu atmosféry Marsu a na ose x zobrazuje vlnovú dĺžku v μm . Po samotnom výpočte sa zobrazí graf s transmitanciou atmosféry a s vybratým optickým zdrojom na danej vlnovej dĺžke.

Legenda pre charakteristiku prenos
Modrá farba - Celková transmitancia atmosféry
Červená farba - Vlnová dĺžka optického vysielacza

Obrázok 5.7 Legenda popisujúca graf pre prenos prostredím.



Obrázok 5.8 Tlačidlá na zobrazenie jednotlivých transmitancií.

Časť s transmitanciami prvkov obsahuje 4 tlačidlá, ktoré zobrazujú transmitanciu prvkov CO, CO₂, NO, CO₂ + prachové častice.

V časti výstupu sa nachádzajú tri polia. Pole P_{det} zobrazuje prijatý optický výkon, pole P_{min} minimálny detegovaný prijatý optický výkon a pole s názvom rezerva zobrazuje aká je rezerva medzi prijatým a minimálnym optickým výkonom energetickej bilancie optického spoja. Výpočet vychádza z rovnice:

$$P_{min} = P_C + SNR, \quad (5.1)$$

kde P_C je citlivosť fotodetektoru a SNR je signal-to-noise ratio. Typické hodnoty, ktoré sa používajú sú hodnoty SNR 13,5 dB (pre chybovosť spoja BER 10^{-6}) a 15,6 dB (pre chybovosť spoja BER 10^{-9}). Spomínanú citlivosť fotodetektoru je možné určiť zo vzťahu:

$$P_C = n \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot \nu_i, \quad (5.2)$$

kde n je počet fotónov na bit, h je Planckova konštanta, c je rýchlosť svetla, λ je vlnová dĺžka a v_i je prenosová rýchlosť.



Obrázok 5.9 Tlačidlá Plot, Clear a Close v manuálnej časti.

Program v manuálnej časti obsahuje tri tlačidlá:

- Plot: tlačidlo slúži na spracovanie vstupných dát, ktoré sú následne programom vypočítané a sú zobrazené v grafe energetickej bilancie a prenosu optického zväzku.
- Clear: tlačidlo vynuluje všetky vstupné a zadané hodnoty a vyčistí grafy. Užívateľovi sa odporúča po každom výpočte a zobrazení výpočtov v grafoch vynulovať hodnoty pre výpočet nového zadaného optického zväzku.
- Close: je tlačidlo, ktoré zavrie aplikáciu.

Automatická časť programu je ešte doplnená o tlačidlo Load values, ktoré slúži na načítanie a zobrazenie hodnôt po výbere laserov a šošoviek, útlmovej a prenosovej časti. Následne sú tieto hodnoty načítané a potom môže užívateľ stlačiť tlačidlo plot pre zobrazenie grafickej časti programu.



Obrázok 5.10 Tlačidlá Plot, Clear, Close a Load values v automatickej časti.

5.2.2 Matematický výpočet energetickej bilancie optického spoja

Energetická bilancia optického bezkáblového spoja spočíva vo výpočte a zhrnutí všetkých parametrov, ktoré majú nejaký vplyv na kvalitu prenosu optického spoja. Celkový výpočet je daný výkonovou bilančnou rovnicou:

$$P_{det} = P_{LD} - \alpha + \gamma - \rho , \quad (5.3)$$

kde P_{det} je výkon na detekčnej časti, α je útlm spoja, γ je zosilnenie a ρ je výkonová rezerva spoja [3], [76]. Samotné útlmy spoja pozostávajú z rôznych parametrov pre ich výpočet. Útlmy sú vyjadrené útlmovou rovnicou:

$$\alpha = \alpha_{LD} - \alpha_{L-TL} - \alpha_{TL} - \alpha_{CW} - \alpha_{TR} - \alpha_{ATM} - \alpha_{TURB} - \alpha_{CW2} - \alpha_{RL} - \alpha_{PD-RL} - \alpha_{IF} , \quad (5.4)$$

kde α_{L-TL} je útlm na väzbe laser–vysielacia šošovka, α_{TL} je útlm na vysielacej šošovke, α_{CW} je útlm na vysielacom krycom skle, α_{TR} je útlm šírením, α_{ATM} je útlm atmosférou, α_{TURB} je turbulentný útlm, α_{CW2} je útlm prijímacieho krycieho skla, α_{RL} je útlm na prijímacej šošovke, α_{PD-RL} je útlm na väzbe prijímacia šošovka–fotodetektor, α_{IF} je útlm interferenčného filtra [3], [75].

Výkon laserového zdroja je v programe možné zadať v mW. Táto hodnota je následne prepočítaná na dBm pomocou vzorca:

$$10 \cdot \log \left(\frac{P_{LD}}{1 \cdot 10^{-3}} \right) , \quad (5.5)$$

kde P_{LD} udáva výkon laserového zdroja v mW.

Útlm šírením vzniká vplyvom rozbiehavosti optického zväzku, ktorý sa šíri voľným prostredím v atmosfére. Výpočet útlmu šírením je daný ako:

$$\alpha_{TR} = 20 \cdot \log \left(\frac{L_0}{L_0 + L} \right) , \quad (5.6)$$

kde L_0 je pomocná dĺžka a L je vzdialenosť medzi vysielacom a prijímačom [3], [75]. Pomocnú dĺžku je možné získať z výpočtu, ktorý je daný priemerom vysielacej šošovky D_{VOS} a divergenciou optického zväzku φ [3], [75].

$$L_0 = \frac{D_{VOS}}{\varphi} . \quad (5.7)$$

K útlmu na väzbe šošovka a fotodetektor dochádza vtedy, ak je vďaka sférickej aberácii šošovky veľkosť stopy v ohnisku väčšia ako je samotná aktívna plocha fotodetektoru. Výpočet útlmu je daný vzťahom:

$$\alpha_{PD-RL} = 10 \cdot \log \left(\frac{S_{PD}}{S_{SP}} \right) , \quad (5.8)$$

kde S_{PD} je veľkosť aktívnej plochy fotodetektoru a S_{SP} je veľkosť spotu v ohniskovej vzdialenosti [3], [75].

Následne zosilnenie na prijímacej optike závisí na pomere plôch šošoviek prijímacej a vysielacej strany. Toto zosilnenie je výpočtom dané ako

$$\gamma_{RL} = \left| 20 \cdot \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3dB , \quad (5.9)$$

kde D_{POS} je priemer prijímacej šošovky a D_{VOS} je priemer vysielacej šošovky [75].

5.3 Modelová situácia návrhu 1

V manuálnom režime návrh spočíva v zadaní vstupných hodnôt do príslušných častí, ktoré sú zobrazené v okne programu. V prvom rade je potrebné určiť vstupné hodnoty pre optický vysielateľ.

Pre optický vysielateľ je zvolená vlnová dĺžka spolu s výkonom optického zdroja. Pre ukážku bola zvolená vlnová dĺžka 1550 nm a výkon 250 mW. Výkon je prepočítaný na hodnotu:

$$P_{LD} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{LD}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{250 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) = 23,979 \text{ dBm} . \quad (5.10)$$

Následne je potrebné doplniť hodnoty útlmu väzby laser – šošovka α_{L-TL} (0,5 dB), útlm vysielacej šošovky α_{TL} (1 dB) a útlm vysielacieho krycieho skla α_{CW} (0,5 dB). Priemer vysielacej šošovky D_{VOS} bol zvolený ako 20 mm a divergencia zväzku φ ako 4 mrad.

Optický vysielateľ		
Vlnová dĺžka	<input type="text" value="1550"/>	[nm]
Výkon optického zdroja	<input type="text" value="250"/>	[mW]
Útlm väzby LD - šošovka	<input type="text" value="0.5"/>	[dB]
Útlm vysielacej šošovky	<input type="text" value="1"/>	[dB]
Útlm krycieho skla	<input type="text" value="0.5"/>	[dB]
Priemer vysielacej šošovky	<input type="text" value="20"/>	[mm]
Divergencia zväzku	<input type="text" value="4"/>	[mrad]

Obrázok 5.11 Zadané vstupné hodnoty pre optický vysielateľ.

Z týchto vstupných hodnôt bola najprv stanovená pomocná dĺžka:

$$L_0 = \frac{D_{VOS}}{\varphi} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 5 \text{ m} . \quad (5.11)$$

Táto pomocná dĺžka bola potrebná pre výpočet útlmu šírením. Vzďialenosť medzi rovinou vysielateľa a prijímateľa je daná ako 1000 m. Potom výpočet vyzerá ako:

$$\alpha_{TR} = 20 \cdot \log\left(\frac{L_0}{L_0 + L}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{5}{5 + 1000}\right) = -46,06 \text{ dB} . \quad (5.12)$$

Hodnota útlmu atmosféry bola určená ako 0,6 dB/km.

Obdobne ako pre optický vysielateľ boli nastavené vstupné hodnoty pre optický prijímateľ. Počet fotónov na bit n bolo zvolených ako 100 a úroveň saturácie detegovaného výkonu ako 0 dBm. Hodnota chybovosti spoja BER bola zvolená ako 10^{-6} , čo v praxi znamená, že hodnota SNR je stanovená ako 13,5 dB. Veľkosť aktívnej plochy

fotodetektoru je 45 mm^2 a veľkosť spotu v ohniskovej vzdialenosti je 30 mm^2 . Z týchto hodnôt je možné vypočítať hodnotu útlmu väzby šošovky a fotodetektoru:

$$\alpha_{PD-RL} = 10 \cdot \log\left(\frac{S_{PD}}{S_{SP}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{45}{30}\right) = 1,761 \text{ dB} . \quad (5.13)$$

Optický prijímač		
Počet fotónov na bit	<input type="text" value="100"/>	[-]
Úroveň saturácie det. výkonu	<input type="text" value="0"/>	[dBm]
Chybovosť	<input type="text" value="1e-6"/>	[-]
Veľkosť aktívnej plochy fotodetektoru	<input type="text" value="45"/>	[mm ²]
Veľkosť spotu v ohniskovej vzdialenosti	<input type="text" value="30"/>	[mm ²]
Útlm krycieho skla	<input type="text" value="0.7"/>	[dB]
Útlm IF filtra	<input type="text" value="0.9"/>	[dB]
Útlm prijímacej šošovky	<input type="text" value="0.5"/>	[dB]
Priemer prijímacej šošovky	<input type="text" value="300"/>	[mm]

Obrázok 5.12 Zadané vstupné hodnoty pre optický prijímač.

Následne boli dosadené hodnoty útlmov. Útlm prijímacieho krycieho skla α_{CW2} (0,7 dB), útlm IF filtra α_{IF} (0,9 dB) a útlm prijímacej šošovky α_{RL} (0,5 dB).

Zosilnenie na prijímacej optike vychádza z priemeru prijímacej a vysielacej šošovky. Hodnota bola stanovená ako:

$$\gamma_{RL} = \left| 20 \cdot \log\left(\frac{D_{VOS}}{D_{POS}}\right) \right| + 3\text{dB} = \left| 20 \cdot \log\left(\frac{300}{20}\right) \right| + 3\text{dB} = 26,52 \text{ dB} . \quad (5.14)$$

Prenos		
Vzdialenosť vysieláč - prijímač	<input type="text" value="1000"/>	[m]
Prenosová rýchlosť	<input type="text" value="100"/>	[Mbit/s]
Útlm atmosférou	<input type="text" value="0.6"/>	[dB/km]

Obrázok 5.13 Zadané hodnoty pre prenos.

Po stlačení tlačidla Plot sa nám zobrazili výstupné hodnoty, ktoré boli dosiahnuté vzhľadom k vstupným hodnotám a ich následnému spracovaniu. Detegovaný optický výkon je:

$$P_{det} = P_{LD} - \alpha + \gamma - \rho = -2,02 \text{ dB} . \quad (5.15)$$

Minimálny detegovaný výkon je -72,42 dBm. Táto hodnota bola získaná z výpočtu citlivosti fotodetektoru:

$$P_C = n \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot \nu_i = 100 \cdot \frac{h \cdot c}{1550 \cdot 10^{-9}} \cdot 100 \cdot 10^6 = 1,282 \cdot 10^{-9} = -58,92 \text{ dBm} . \quad (5.16)$$

Táto hodnota citlivosti bola následne dosadená do výpočtu minimálneho detegovaného výkonu:

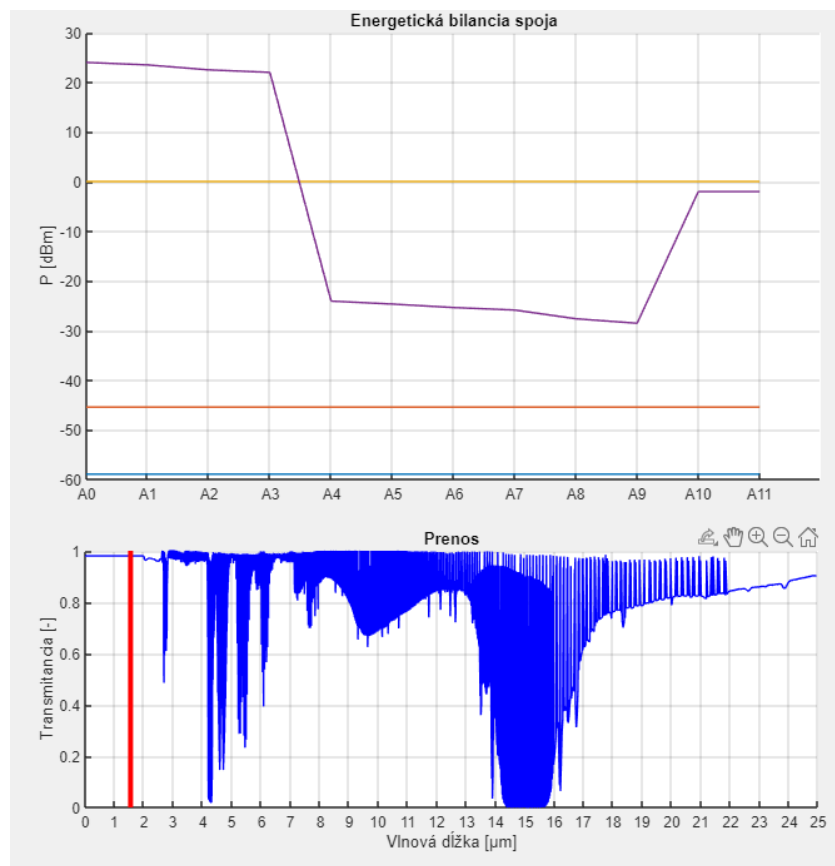
$$P_{min} = P_C + SNR = -58,92 + 13,5 = -45,42 \text{ dBm} . \quad (5.17)$$

Rezerva spoja bola stanovená ako rozdiel detegovaného a minimálneho detegovaného optického výkonu. Samotná rezerva je 70,4 dB a návrh je z tohto pohľadu vyhovujúci.

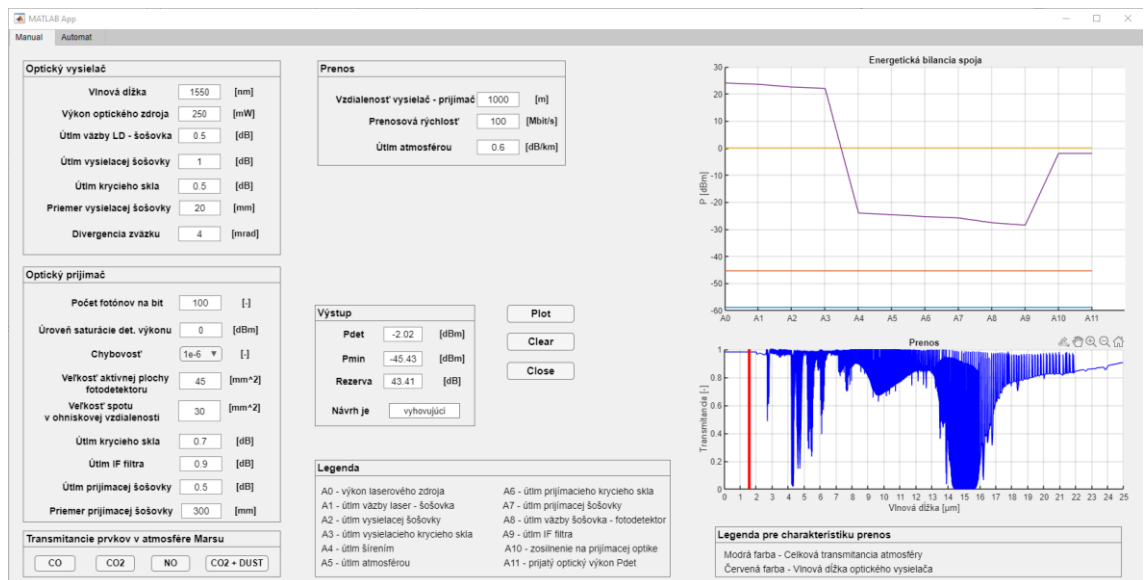
Výstup		
Pdet	-2.02	[dBm]
Pmin	-45.43	[dBm]
Rezerva	43.41	[dB]
Návrh je	vyhovujúci	

Obrázok 5.14 Výstupné hodnoty získané programom.

Nakoniec grafické spracovanie návrhu je zobrazené na obrázku 5.14.



Obrázok 5.15 Grafické spracovanie návrhu.



Obrázok 5.16 Okno celého programu pri návrhu optického spoja.

5.4 Modelová situácia návrhu 2

V automatickom režime návrh spočíva v zadaní vstupných hodnôt do príslušných častí, ktoré sú zobrazené v okne programu. V prvom rade je potrebné určiť vstupné hodnoty pre optický vysielateľ.

Pre optický vysielateľ je v programe na výber zo 6 laserov, ktoré sú uvedené so stručným opisom v tabuľke 4.1. Pre tento prípad bol zvolený laser 1, ktorého vlnová dĺžka je 630 nm a výkon 10 mW. Divergencia zväzku ϕ je 3 mrad. Výkon je prepočítaný na hodnotu:

$$P_{LD} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{LD}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{10 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) = 10 \text{ dBm} . \quad (5.18)$$

V ďalšom kroku je na výber zo 4 preddefinovaných šošoviek pre vysielacie parametre. V tomto prípade bola zvolená šošovka 2. Po stlačení tlačidla Load values boli doplnené hodnoty útlmu väzby laser – šošovka α_{L-TL} (1,5 dB), útlm vysielacej šošovky α_{TL} (1,3dB) a priemer vysielacej šošovky D_{VOS} je daný ako 15 mm.

Vysielacie šošovky	Útlm vysielacích šošoviek [dB]	Priemer vysielacích šošoviek [mm]
Šošovka 1	0,5	12
Šošovka 2	1,3	15
Šošovka 3	0,7	80
Šošovka 4	1,3	400

Tabuľka 5.1 Výber vysielacích šošoviek v programe [4], [77], [78], [79].

Pre prijímacie parametre sú na výber opäť 4 šošovky. Pre tento návrh bola zvolená šošovka 4. Hodnoty sú dané ako útlm prijímacej šošovky α_{RL} je 0,85 dB, priemer prijímacej šošovky D_{POS} je daný ako 150 mm a útlm väzby šošovka – fotodetektor α_{PD-RL} je 2 dB.

Prijímacie šošovky	Útlm prijímacích šošoviek [dB]	Priemer prijímacích šošoviek [mm]
Šošovka 1	0,5	50
Šošovka 2	1,2	600
Šošovka 3	0,9	100
Šošovka 4	0,85	150

Tabuľka 5.2 Výber prijímacích šošoviek v programe [4], [77], [78], [79].

Následne si užívateľ môže doplniť útlmy krycieho skla vysielacieho α_{CW} a prijímacieho α_{CW2} a útlm IF filtra α_{IF} .

Optický vysielateľ		
Laser	Laser 1	
Vlnová dĺžka	630	[nm]
Divergencia zväzku	3	[mrad]
Výkon optického zdroja	10	[mW]

Vysielacie parametre		
Vysielacia šošovka	Šošovka 2	
Útlm väzby LD - šošovka	2	[dB]
Útlm vysielacej šošovky	1.3	[dB]
Priemer vysielacej šošovky	15	[mm]

Prijímacie parametre		
Prijímacia šošovka	Šošovka 4	
Útlm väzby šošovka - PD	2	[dB]
Útlm prijímacej šošovky	0.85	[dB]
Priemer prijímacej šošovky	150	[mm]

Obrázok 5.17 Automatický výber vstupných hodnôt.

Útlmy krycieho skla a IF filtra		
Útlm krycieho skla vysielacieho	1	[dB]
Útlm krycieho skla prijímacieho	2.2	[dB]
Útlm IF filtra	1.5	[dB]

Obrázok 5.18 Útlmy krycieho skla vysielacieho a prijímacieho a útlm IF filtra s doplnenými hodnotami.

V prenosovej časti si užívateľ doplní vzdialenosť vysielateľa a prijímateľa L , prenosovú rýchlosť v_i a počet fotónov na bit n . Pre túto ukážku boli zvolené hodnoty pre vzdialenosť vysielateľa a prijímateľa 2500 m, prenosovú rýchlosť 10 Mbit/s a 100 fotónov na bit.

Prenos		
Vzdialenosť vysielateľ - prijímač	<input type="text" value="2500"/>	[m]
Prenosová rýchlosť	<input type="text" value="10"/>	[Mbit/s]
Počet fotónov na bit	<input type="text" value="100"/>	[-]

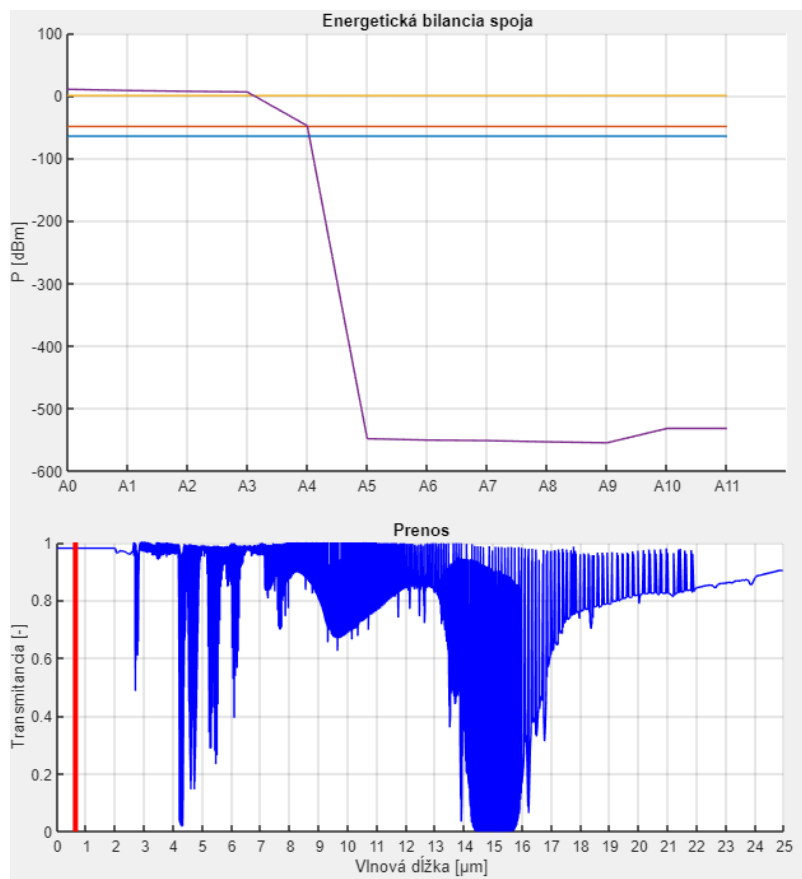
Obrázok 5.19 Hodnoty pre prenos zväzku.

Stav atmosféry bol pre ukážku zvolený ako stav veľmi prašnej atmosféry. Úroveň saturácie detegovaného výkonu je nulová a chybovosť zvolená ako 10^{-9} .

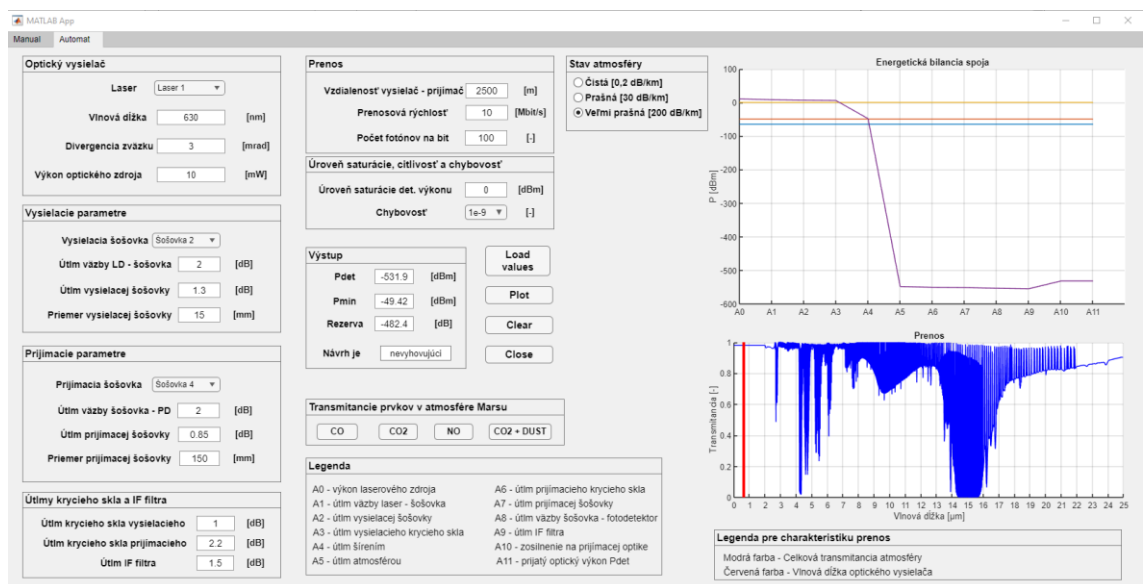
Rezerva spoja bola výpočtom stanovená ako -474 dB a návrh je z tohto pohľadu nevyhovujúci. Samotné grafické spracovanie je zobrazené na obrázku 5.20.

Výstup		
Pdet	<input type="text" value="-531.9"/>	[dBm]
Pmin	<input type="text" value="-49.42"/>	[dBm]
Rezerva	<input type="text" value="-482.4"/>	[dB]
Návrh je	<input type="text" value="nevyhovujúci"/>	

Obrázok 5.20 Výsledné hodnoty pre návrh číslo 2.



Obrázok 5.21 Grafické spracovanie návrhu číslo 2.



Obrázok 5.22 Okno celého programu pri návrhu optického spoja číslo 2.

6. ZÁVER

Táto bakalárska práca bola venovaná charakteristike atmosféry Marsu pre optické komunikácie. V prvom rade bol spracovaný teoretický úvod, kde bola vo všeobecnosti opísaná optická komunikácia. Bola objasnená základná teória optickej komunikácie spolu s jej výhodami, respektíve nevýhodami, oproti rádio-frekvenčnej komunikácii. Ďalej bolo opísané atmosférické prenosové prostredie a jeho negatívne vplyvy, pod ktoré patria útlmy v atmosfére, absorpcia, atmosférická turbulencia, rozptyl, koeficient extinkcie a šumy, vzhľadom na optickú komunikáciu.

Ďalšia časť bola venovaná charakteristike planéty Mars. Podarilo sa objasniť charakteristiku atmosféry planéty, ktorá je zložená hlavne z oxidu uhličitého, dusíka, argónu a kyslíka. Zistené poznatky boli ďalej použité pri porovnaní planéty Mars a planéty Zem. Planéty boli porovnané z hľadiska zloženia atmosféry, podnebia a základných vlastností. Tieto planéty majú mnoho spoločného, ale najväčšie rozdiely boli zistené pri zložení atmosféry, výškového rozdelenia atmosféry a pri meteorologických vlastnostiach atmosféry. Vzhľadom k meteorologickým vlastnostiam boli spomenuté obdobia, ktoré sa na planéte Mars striedajú, oblačnosť, prachové častice a búrky. Vo všeobecnosti má Mars premenlivé počasie s častou oblačnosťou. Počas striedania období sa planéta mení z pomerne teplej a prašnej na planétu studenú a zamračenú. Prostredie šírenia v atmosfére zahŕňa molekuly plynov, oblačnosť, prachové častice, vodné pary a ďalšie minoritné zložky. Z týchto dosiahnutých informácií a poznatkov o planéte Mars sa dá predpovedať, že najväčšia degradácia možného signálu alebo žiarenia bude prebiehať v najnižšej časti atmosféry.

Na kapitolu prenosového prostredia Marsu je kladený najväčší dôraz vzhľadom k určeniu vhodného prenosového pásma pre možnú komunikáciu v budúcnosti. V prvom rade bola kapitola venovaná prediskutovaniu a určeniu koncentracii molekúl a častíc v atmosfére, kde najväčšie zastúpenie má oxid uhličitý. Pomocou dostupných dát boli určené teoretické koncentrácie prvkov v atmosfére a boli porovnané so zložením atmosféry Zeme. Hlavným bodom kapitoly bolo prediskutovanie priepustnosti a zároveň absorpcie vlnových dĺžok vzhľadom k zloženiu atmosféry. Najväčšia absorpcia v spektre sa nachádza v okolí 15 μm , ktorá je spôsobená oxidom uhličitým spolu s prachovými časticami prítomnými v atmosfére. Z dosiahnutých informácií a poznatkov sa dosiahla charakteristika celkovej priepustnosti atmosféry a podľa predpovede najvhodnejšie vlnové dĺžky sa pohybujú v okolí jednotiek (0 – 3 μm) mikrometrov alebo hodnoty vyššie ako 20 μm . Naopak, podľa predpovede boli dosiahnuté najväčšie absorpcie vlnových dĺžok v oblasti 4 až 6 mikrometrov a v širšom okolí 15 μm .

Kapitola optických vysieláčov sa zaoberá prehľadom optických zdrojov, ktoré sa používajú v optickej bezdrôtovej komunikácii. V tejto kapitole je opísaná základná teória laserov a laserových diód, ich vlastnosti a samotné zloženie niektorých vybraných laserov. Ďalej je prediskutované všeobecné použitie optických zdrojov v komunikačných

sieťach alebo aj v iných odvetviach. V ďalšej časti sa kapitola zaoberá laserovými diódami a jej základnými vlastnosťami.

Záverečná kapitola je venovaná približnému a teoretickému návrhu optického bezkáblového spoja. Zaoberá sa hlavnými princípmi a požiadavkami pri návrhu optického spojenia. Ďalej je kapitola venovaná definovaniu a vytvoreniu programu, z teoretických poznatkov, výpočtov a charakteristík, pre ďalší výpočet časovo-priestorových a energetických vlastností optického zväzku. V programe je sprostredkovaná možnosť výberu a definícia vysielačieho a prijímacieho miesta. Ďalej sa jedná o špecifikáciu parametrov vysielača a prijímača, kde sa zohľadňujú útlmy spojenia a použitie šošoviek, IF filtra, ktoré sa používajú pri optických spojeniach.

LITERATÚRA

- [1] MAJUMDAR, Arun K. a Jennifer Crider RICKLIN. Free-space laser communications: principles and advances. New York, NY: Springer, c2008. ISBN 9780387286778.
- [2] Monaghan, H. (23. Júl 2021). *Optical Communications Overview* [online]. (NASA). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/opticalcommunications/overview/>
- [3] WILFERT, O. (2007). *Foronika a optické komunikace: [přednášky]*. Brno: Brno: Vysoké učení technické v Brně.
- [4] Kaushal, H., & G., K. (2017). In *Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques*. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://arxiv.org/pdf/1705.10630.pdf>
- [5] Garlinska, M.; Pregowska, A.; Masztalerz, K.; Osial, M. From Mirrors to Free-Space Optical Communication—Historical Aspects in Data Transmission. *Future Internet* 2020, 12, 179. <https://doi.org/10.3390/fi12110179>
- [6] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourthquarter 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2329501.
- [7] Jeyaseelan, J., Sriram Kumar, D. & Caroline, B.E. *Disaster management using free space optical communication system*. *Photon Netw Commun* 39, 1–14 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11107-019-00865-9>
- [8] Katherine Schauer. *Laser Communications: Empowering More Data Than Ever Before* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2021/laser-communications-empowering-more-data-than-ever-before>
- [9] Dewayne Washington, Rob Garner. *Historic Demonstration Proves Laser Communication Possible* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.nasa.gov/content/goddard/historic-demonstration-proves-laser-communication-possible>
- [10] Autor neznámy. *Laser Communications Relay Demonstration (LCRD)* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/lcrd/index.html
- [11] Autor neznámy. *The Psyche Mission* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://psyche.asu.edu/timeline/>
- [12] Autor neznámy. *Psyche* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.jpl.nasa.gov/missions/psyche>

- [13] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L., *Laser Beam Propagation through Random Media*. Bellingham: SPIE, 1998.
- [14] Al-Gailani, S. A. [2021]. *A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links and Networks*. IEEE.
- [15] Hudcová, L. *Atmosférické přenosové prostředí* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: https://moodle-archiv-2019-2020.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/315663/mod_resource/content/1/10_Atmosf%C3%A9rick%C3%A9%20p%C5%99enosov%C3%A9%20prost%C5%99ed%C3%AD.pdf
- [16] Darling, David. *Atmosphere of Mars* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <https://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/Marsatmos.html>
- [17] Autor neznámy. *Scattering of Light* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <https://www.toppr.com/ask/content/story/amp/scattering-of-light-74199/>
- [18] Autor neznámy. *Blue Sky and Rayleigh Scattering* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>
- [19] Xiaoming Zhu and J. M. Kahn, *Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels*, in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 8, pp. 1293-1300, Aug. 2002, doi: 10.1109/TCOMM.2002.800829.
- [20] S. Senoo, A.J. White, 9 - Analysis and design of wet-steam stages, Editor(s): Tadashi Tanuma. *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants*, Woodhead Publishing, 2017, Pages 165-218, ISBN 9780081003145, Dostupné na Internetu: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100314-5.00009-9>
- [21] Albert A.M. Holtslag, Robert A. Meyers, *Atmospheric Turbulence*, Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), Academic Press, 2003, pp. 707-719, ISBN 9780122274107.
- [22] Hovořák Pavel, *Modelování turbulentní atmosféry a snižování fluktuací přijímaného signálu vícetasvkovým provozem* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02067/index.html>
- [23] The Editors of Encyclopaedia, *Atmospheric turbulence*, Encyclopedia Britannica, Britannica, 11 Apr. 2013 [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <https://www.britannica.com/science/atmospheric-turbulence>
- [24] Grabner M., Kvicera V., *Atmospheric Refraction and Propagation in Lower Troposphere*, in *Electromagnetic Waves*. London, United Kingdom: IntechOpen, 2011 [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <https://www.intechopen.com/chapters/16079>

- [25] Xiaoming Zhu, Kahn J. M., *Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels*, in IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 8, pp. 1293-1300, Aug. 2002, doi: 10.1109/TCOMM.2002.800829.
- [26] Supratik Banerjee, *Compressible turbulence in space and astrophysical plasmas : Analytical approach and in-situ data analysis for the solar wind*. Solar and Stellar Astrophysics [astro-ph.SR]. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. English. ffNNT : 2014PA112206ff. fftel-01087024f
- [27] Puiu Tibi, *Turbulence in space confirmed and measured for the first time* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: <https://www.zmescience.com/space/space-turbulence-measured-and-confirmed-for-first-time-423432/>
- [28] Autor neznámy. (16. December 2021). *Why the Atmospheric Window Matters in Earth* [online]. (GISGeography) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: <https://gisgeography.com/atmospheric-window/>
- [29] Autor neznámy. *Mars Exploration Program* [online]. (NASA) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: https://mars.nasa.gov/#mars_exploration_program/1
- [30] Autor neznámy. *Missions* [online]. (NASA) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/?page=0&per_page=99&order=date+desc&search=
- [31] Malin, M. C., & Carr, M. H. *Mars: Additional Information* [online]. (Britannica). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: <https://www.britannica.com/place/Mars-planet>
- [32] Autor neznámy. *Mars Facts* [online]. (NASA) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: <https://mars.nasa.gov/all-about-mars/facts/>
- [33] Autor neznámy. (8. Júl 2021). *Mars The Red Planet* [online]. (NASA) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/mars/in-depth/>
- [34] Autor neznámy. (4. Január 2021). *Mars Facts* [online]. (The Nine Planets) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: <https://nineplanets.org/mars/>
- [35] Read, P., Lewis, S., & David, M. (November 2015). *The physics of Martian weather and climate: A review* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: https://www.researchgate.net/publication/283500264_The_physics_of_Martian_weather_and_climate_A_review
- [36] Autor neznámy. *Martian Atmospheric Gaseous Attenuation* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: https://descanso.jpl.nasa.gov/propagation/mars/MarsPub_sec4.pdf
- [37] Autor neznámy. *The Red Planet Atmosphere* [online]. (NASA) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internet: https://mars.nasa.gov/#red_planet/3

- [38] Ota, K. (25. Január 2015). *Atmosféra Marsu* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <http://planety.astro.cz/mars/1134-atmosfera>
- [39] Simon, O. (12. August 2013). *How do you measure height on Mars?* [online]. (ABC Science). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.abc.net.au/science/articles/2013/08/12/3820057.htm>
- [40] Zell, H. (22. Január 2013). *Earth's Atmospheric Layers* [online]. (NASA) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/atmosphere-layers2.html
- [41] Dickinson, C., Komguem, L., Whiteway, J. A., & Illnicki, M. (2011). Lidar atmospheric measurements on Mars and Earth . In *Planetary and Space Science* (s. 942-951).
- [42] Economou, T. *Mars Atmosphere Argon Density Measurement on MER Mission* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.217.8563&rep=rep1&type=pdf>
- [43] Autor neznámy. (4. September 2018). *Comparing the atmospheres of Mars and Earth* [online]. (ESA) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/04/Comparing_the_atmospheres_of_Mars_and_Earth
- [44] Autor neznámy. *Sunlight on Mars – Is There Enough Light on Mars to Grow Tomatoes?* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.firsttheseedfoundation.org/resource/tomatosphere/background/sunlight-mars-enough-light-mars-grow-tomatoes/>
- [45] Shekhtman, S. (29. Jún 2021). *First You See It, Then You Don't: Scientists Closer to Explaining Mars Methane Mystery* [online]. (NASA) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2021/first-you-see-it-then-you-don-t-scientists-closer-to-explaining-mars-methane-mystery/>
- [46] Josef, J., *Charakteristika Země* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <http://planety.astro.cz/zeme/1943-atmosfera-zeme>
- [47] Autor neznámy. (29. September 2021). *What Is the Weather Like on Mars- Learn About the Martian Atmosphere and the Possibility Of Human Exploration to the Red Planet* [online]. (MasterClass). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.masterclass.com/articles/what-is-the-weather-like-on-mars-learn-about-the-martian-atmosphere-and-the-possibility-of-human-exploration-to-the-red-planet#why-is-mars-interesting-from-a-scientific-perspective>
- [48] Autor neznámy. (16. August 2021). *Dust storms on Mars play a huge role in drying out the planet* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://lasp.colorado.edu/home/2021/08/16/dust-storms-on-mars-play-a-huge-role-in-drying-out-the-planet/>

- [49] Autor neznámy. (16. Júl 2001). *Planet Gobbling Dust Storms*. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast16jul_1
- [50] Wall, M. *Methane on Mars Isn't Being Released by Wind Erosion* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.space.com/mars-methane-mystery-wind-erosion.html>
- [51] Autor neznámy. *Understanding Neutral Density Filters* [online]. (EdmundOptics) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-neutral-density-filters/>
- [52] Autor neznámy. *Mars Atmosphere IR Transmission Spectrum* [online]. (EdmundOptics) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://chart-studio.plotly.com/~sewoodwa/78.embed>
- [53] Autor neznámy. *Nitric oxide* [online]. (NIST) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C10102439&Mask=80>
- [54] Autor neznámy. *Carbon dioxide* [online]. (2021). (NIST) [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Type=IR-SPEC&Index=1#>
- [55] Cockell, Charles & Leger, A. & Fridlund, Malcolm & Herbst, T & Kaltenegger, Lisa & Absil, Olivier & Beichman, C & Benz, W & Blanc, Michel & Brack, Andre & Chelli, A & Colangeli, Luigi & Cottin, Hervé & Foresto, F. & Danchi, W. & Herder, J.-W & Eiroa, C & Greaves, Jane & White, Glenn. (2009). *Darwin —A Mission to Detect and Search for Life on Extrasolar Planets*. *Astrobiology*. 9. 1-22. 10.1089/ast.2007.0227.
- [56] Autor neznámy. *Exoplanets* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://elt.eso.org/science/exoplanets/>
- [57] Schauer Katherine, Baird Daniel. *Laser Communications: Empowering More Data Than Ever Before* [online]. (2021). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2021/laser-communications-empowering-more-data-than-ever-before>
- [58] Autor neznámy. *Princip laseru* [online]. (2021). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [59] Paschotta Rüdiger. *Laser Optics* [online]. (2021). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: https://www.rp-photonics.com/laser_optics.html
- [60] Botha, Roelof. *Development of diode end-pumped Nd:YLF lasers at 1314 nm for high power operation*. [online]. (2016). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internete: https://www.researchgate.net/figure/A-basic-side-pumped-laser-resonator-setup_fig4_295539597

- [61] Autor neznámy. *Laser* [online]. (2018). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <https://czechlasers.cz/studovna/laser-2/>
- [62] Autor neznámy. *Možné delenie typov a druhov laserov* [online]. (2021). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <https://www.mylt.sk/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [63] The Editors of Encyclopaedia. *Theodore H. Maiman*. Encyclopaedia Britannica. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <https://www.britannica.com/biography/Theodore-Maiman>. Accessed 12 May 2022.
- [64] Autor neznámy. *Light - Line Laser Wavelength* [online]. (2017). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: https://favpng.com/png_view/light-line-laser-wavelength-laser-diode-laser-pointers-png/KsgYVCEv
- [65] Paschotta Rüdiger. *Continuous-wave Operation* [online]. (2021). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: https://www.rp-photonics.com/continuous_wave_operation.html
- [66] Paschotta Rüdiger. *Pulsed Lasers* [online]. (2021). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: https://www.rp-photonics.com/pulsed_lasers.html
- [67] Meet A. Moradiya. *The Use of Lasers for Satellite Communication* [online]. (2018). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1457&fbclid=IwAR3zxQ_iGg4gsHd1a3rNbiKUCpSCf_g4ELCoa3c8j7x4ocQ59dPPSIKjt20
- [68] Jonathan de Campos Guimarães. *Space Laser Communication Systems for Applications in Defense*. Military Academy/IST
- [69] Lukáš Michal. *Laserové diody, část 1 – princip funkce laserových diod* [online]. (2001). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [70] Lukáš Michal. *Laserové diody, část 2 – typy a struktury laserových diod* [online]. (2001). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>
- [71] Lukáš Michal. *Laserové diody, část 4 – napájení, impulsní režim a aplikace laserových diod* [online]. (2001). [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02059/index.html>
- [72] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourthquarter 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2329501.
- [73] Sugianto Trisno. *DESIGN AND ANALYSIS OF ADVANCED FREE SPACE OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS*. Dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy 2006

- [74] Fred M. Dickey, Louis S. Weichrnan, Richard N. Shagam. *Laser Beam Shaping Techniques*. Sandia National Laboratories, MS 0328, Albuquerque, NM 87185-0328
- [75] Hudcová, L. *Optické bezkáblové spoje* [online]. [cit. 2022-5-31].
Dostupné na Internetu:
https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/370830/mod_resource/content/1/11_Optick%C3%A9%20bezkabelov%C3%A9%20spoje.pdf
- [76] Hudcová, L. *Teorie optických komunikací* [online]. [cit. 2022-5-31].
Dostupné na Internetu:
https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/370826/mod_resource/content/1/7_Teorie%20optick%C3%BDch%20komunikac%C3%AD.pdf
- [77] Autor neznámy. *LCRD (Laser Communications Relay Demonstration)* [online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu:
<https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/lcrd>
- [78] Garlińska, Magdalena & Pregowska, Agnieszka & Masztalerz, Karol & Osial, Magdalena. (2020). *From Mirrors to Free-Space Optical Communication-Historical Aspects in Data Transmission*. Future Internet. 10. 1-17. 10.3390/fi12110179.
- [79] A. G. Alkholidi, and K. S. Altowij. *Free Space Optical Communications — Theory and Practices*, in Contemporary Issues in Wireless Communications. London, United Kingdom: IntechOpen, 2014 [Online]. [cit. 2022-5-31]. Dostupné na Internetu:
<https://www.intechopen.com/chapters/47585>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
Mb/s	Megabit za sekundu
FSO	Free-Space Optical Communication
Gb/s	Gigabit za sekundu
RF	rádio-frekvenčné komunikácie
LLCD	Lunar Laser Communication Demonstration
LCRD	Laser Communications Relay Demonstration
ILLUMA-T	Integrated LCRD Low-Earth Orbit User Modem and Amplifier Terminal
NASA	National Aeronautics and Space Administration
MAVEN	Mars Atmospheric and Volatile Evolution
Pa	Pascal
UV	ultraviolet
km/h	kilometer za hodinu
MGS	Mars Global Surveyor
kg/m ²	kilogram na meter štvorcový
g/m ²	gram na meter štvorcový
OD	optical density
ND	neutral density
μm	mikrometer
nm	nanometer
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
CW	continuous wave
LED	Light-Emitting Diode
CD	Compact Disc
COSPAR	Comitee on Space Research
CO ₂	oxid uhličité
H ₂ O	voda (oxid vodný)
N ₂	dusík
Ar	argón
O ₂	kyslík
CO	oxid uhoľnatý
NO	oxid dusnatý
BER	Bit Error Rate
SNR	Signal to Noise Ratio
IR	Infra Red

UV	Ultraviolet
SHL	Single Heterostructure Laser
DHL	Double Heterostructure Laser
HeNe	Helium–Neon
GaAs	Gallium–Arsenide
GaAlAs	Gallium–Aluminium– Arsenide
Nd–YAG	izotropný kryštál Yttrium Aluminum Granite

Symboly:

λ	vlnová dĺžka	(m)
$I(\lambda, 0)$	optická intenzita na začiatku prenosu	($W \cdot m^{-2}$)
$I(\lambda, L)$	optická intenzita na konci prenosu	($W \cdot m^{-2}$)
$\tau(\lambda, L)$	priepustnosť atmosféry	(–)
$\gamma(\lambda)$	koeficient extinkcie	(m^{-1})
$\alpha_m(\lambda)$	absorpcia na molekulách	(m^{-1})
$\alpha_a(\lambda)$	absorpcia na aerosóloch	(m^{-1})
$\beta_m(\lambda)$	rozptyl na molekulách	(m^{-1})
$\beta_a(\lambda)$	rozptyl na aerosóloch	(m^{-1})
r	veľkosť častice	(m)
α	rozptyl	
d	priemer častice	(m)
n	index lomu prostredia	(–)
ρ_1	tlak vzduchu	(Pa)
T_1	teplota	($^{\circ}C$)
T_2	termodynamická teplota	(K)
g	gravitačné zrýchlenie	($m \cdot s^{-2}$)
c_0	rýchlosť svetla vo vákuu	($m \cdot s^{-1}$)
$c(A)$	koncentrácia molekuly v atmosfére	($g \cdot m^{-2}$)
ρ_s	povrchový atmosférický tlak	(Pa)
$Mr(A)$	molekulová hmotnosť	($g \cdot mol$)
ρ_2	hustota	($kg \cdot m^{-3}$)
T	transmitancia	(–)
P	výkon	(W)
h	Planckova konštanta	($J \cdot s$)
E_g	šírka zakázaného pásu	(eV)
I	prúd	(A)
L	vzdialenosť medzi vysielačom a prijímačom	(m)
L_0	pomocná dĺžka	(m)
α_{L-TL}	útlm na väzbe laser–vysielacia šošovka	(dB)
α_{TL}	útlm na vysielačej šošovke	(dB)
α_{CW}	útlm na vysielačom krycom skle	(dB)
α_{CW2}	útlm na prijímačom krycom skle	(dB)
α_{RL}	útlm na prijímačej šošovke	(dB)

α_{TR}	útlm šírením	(dB)
α_{IF}	útlm na interferenčnom filtre	(dB)
γ_{RL}	zisk na prijímacej optike	(dB)
α_{PD-RL}	útlm na väzbe prijímacia šošovka–fotodetektor	(dB)
k	vlnové číslo	(m^{-1})
φ	divergencia optického zväzku	(rad)
D_{VOS}	priemer vysielacej šošovky	(m)
D_{POS}	priemer prijímacej šošovky	(m)
A_{ATM}	útlm atmosférou	(dB/km)
α_{TURB}	turbulentný útlm	(dB)
n	počet fotónov na bit	(–)
h	Planckova konštanta	(J · s)
c	rýchlosť svetla	($m \cdot s^{-1}$)
S_{PD}	veľkosť aktívnej plochy fotodetektora	(mm^2)
S_{SP}	veľkosť spotu v ohniskovej vzdialenosti	(mm^2)
v_i	prenosová rýchlosť	(bit/s)
C_n^2	štruktúrny parameter indexu lomu prostredia	($m^{-2/3}$)

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A – DÁTA PRIEPUSTNOSTI PRVKOV ATMOSFÉRY	77
PRÍLOHA B – PROGRAM PRE VÝPOČET ENERGETICKEJ BILANCIE OPTICKÉHO SPOJA	78

Príloha A – Dáta priepustnosti prvkov atmosféry

Vzhľadom k veľkosti dát a výpočtov prikladám súbor excel k finálnemu odovzdaniu bakalárskej práce.

Príloha B – Program pre výpočet energetickej bilancie optického spoja

Ďalej prikladám súbor v programe Matlab, kde bola vytvorená aplikácia pre výpočet energetickej bilancie optického spoja k finálnemu odovzdaniu bakalárskej práce.