

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VÝKONOVÁ BILANCE LASEROVÉHO DÁLKOMĚRU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

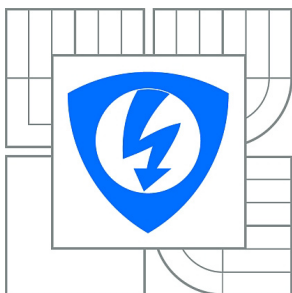
Bc. MARTIN KOTOL

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VÝKONOVÁ BILANCE LASEROVÉHO DÁLKOMĚRU

POWER BUDGET OF THE LASER RANGEFINDER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

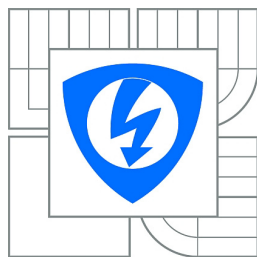
Bc. MARTIN KOTOL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. OTAKAR WILFERT, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Martin Kotol

ID: 106550

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Výkonová bilance laserového dálkoměru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem činnosti laserového dálkoměru a popište způsob provedení energetické bilance monostatického systému. V programu Matlab vytvořte model pro výpočet členů energetické bilanční rovnice a výsledky prezentujte pomocí úrovnového diagramu. Výsledky simulací porovnejte s výsledky publikovanými v literatuře.

V experimentální části své práce proměřte směrové odrazivé vlastnosti vybraných povrchů a proveďte experimentální ověření numerického modelu výkonové bilance laserového dálkoměru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JELALIAN, A.V. Laser Radar Systems. London: Artech House, 1992.

[2] JENN, D.C. Radar and Laser Cross Section Engineering. Blacksburg: AIAA, 2005.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Uvedená diplomová práce rozebírá problematiku optických laserových dálkoměrů ve skutečném přenosovém prostředí. Popisuje jednotlivé díly optických laserových dálkoměrů jejich vlastnosti a principy v návaznosti na jejich výkonovou bilanci. V práci jsou uvedeny základní optické vlastnosti čoček používaných ve vysílači a přijímači. Samostatná kapitola je věnována metodě tranzitního času a faktorům ovlivňujícím měření. Součástí diplomové práce je rozbor poměrné směrové odrazivosti. V závěru diplomové práce jsou uvedeny praktické laboratorní výsledky měření poměrné směrové odrazivosti různých materiálů a barev. Na základě naměřených hodnot byl ověřen výkonový úroňový diagram dálkoměru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optický vysílač, optický přijímač, metoda tranzitního času, útlum aerosoly, molekulární absorpce, atmosférické turbulence, výkonový úroňový diagram.

ABSTRACT

The thesis analyzes the optical laser range finders in real propagation environments. It describes the various parts of optical laser range finders their properties and principles in relation to their performance balance. The paper presents the basic optical properties of lenses used in the transmitter and receiver. A separate chapter is devoted to the transit time method and factors influencing the measurement. The proportional directional reflectance analysis is a part of the thesis. In conclusion, the thesis contains the practical laboratory measurements of the relative directional reflectance of different materials and colors, and verification of the power level diagram.

KEYWORDS

Optical transmitter, optical receiver, method of transit time, attenuation aerosols, molecular absorption, atmospheric turbulence, the power level diagram.

KOTOL, Martin *Výkonová bilance laserového dálkoměru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 77 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Výkonová bilance laserového dálkoměru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 23.5.2014

.....
podpis autora

Děkuji vedoucímu diplomové práce
prof. Ing. Otakaru Wilfertovi, CSc. za
účinnou metodickou, pedagogickou a
odbornou pomoc a za další cenné rady při
zpracování mé diplomové práce.

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
ÚVOD	13
1 Úvod do laserových dálkoměrů	14
2 Základní pojmy a vztahy	15
2.1 Světelné vlny	15
3 Optické vysílače	17
3.1 Lasery	17
3.2 Laserové diody	17
3.3 Základní struktura laserových diod	18
4 Optické čočky	18
4.1 Kolektivní optická soustava	19
4.2 Teleskopická optická soustava	20
4.3 Kolimátor	20
4.4 Rozdělovač paprsku	21
4.5 Optické filtry	22
5 Základní součásti dálkoměrů	22
5.1 Optické modulátory	22
5.2 Modulace	23
5.3 Demodulace	23
5.4 Optické detektory	24
6 Metody měření vzdálenosti	25
7 Metoda tranzitního času TOF	27
7.1 Základní princip	27
7.2 Metoda jednoho pulzu	28
7.3 Řada pulzů	29
7.4 Dosah dálkoměrů	30
7.5 Nejednoznačnost měření	30
8 Faktory ovlivňující měření	31
8.1 Vliv atmosféry na laserový paprsek	31
8.2 Vliv prostředí na rychlost světla	32
8.3 Útlum aerosoly	32
8.4 Molekulární absorpce	37

8.5	Atmosférické turbulence	38
8.5.1	Změna index lomu	39
8.5.2	Vliv turbulence	39
8.6	Šum v dálkoměru.....	39
9	Poměrná směrová odrazivost.....	40
10	Výkonový úroňový diagram.....	42
11	Experimentální část	46
11.1	Měření směrových odrazivých vlastností materiálů	46
11.2	Postup při měření odrazivých vlastností materiálů.....	46
11.3	Výsledky měření poměrné směrové odrazivosti	49
11.4	Ověření numerického modelu výkonové bilance laserového dálkoměru	54
11.5	Postup měření výkonové bilance laserového dálkoměru.....	54
11.6	Výsledky měření výkonové bilance laserového dálkoměru	55
12	Závěr.....	56
13	Literatura	57
	Seznam příloh.....	63

Seznam obrázků

Obr. 1:	Příklad časového rozložení veličin E_x , Π a I	16
Obr. 2:	Principiální schéma laserové diody (převzato z [4]).	17
Obr. 3:	Fabry-Perotův laser (převzato z [22])	18
Obr. 4:	Přehled optických soustav (převzato z [4]).	19
Obr. 5:	Kolektivní optické soustavy pro zobrazení konečných bodů (převzato z [4]).	20
Obr. 6:	Kolektivní optické soustavy pro zobrazení bodů v nekonečnu (převzato z [4]).	20
Obr. 7:	Kolektivní optické soustavy pro zobrazení bodů v nekonečnu (převzato z [4]).	20
Obr. 8:	Principiální schéma kolimátoru (převzato z [15]).	21
Obr. 9:	Schematické znázornění krychle rozdělovače paprsků (převzato z [16]).	21
Obr. 10:	Blokové schéma dálkoměru s jedním teleskopem a přímou detekcí časového zpoždění (převzato z [7]).	24
Obr. 11:	Blokové schéma dálkoměru se dvěma teleskopy a heterodynní detekcí pro určení časového zpoždění (převzato z [7]).	24
Obr. 12:	Princip laserového dálkoměru (převzato z [7]).	27
Obr. 13:	Základní komponenty TOF dálkoměru (převzato z [7]).	28
Obr. 14:	Princip měření vzdálenosti metodou jednoho pulzu (převzato z [7]).	28
Obr. 15:	Přenosové spektrum laserového paprsku nad hladinou moře bez přítomnosti aerosolů (převzato z [19]).	34
Obr. 16:	Přenosové spektrum laserového paprsku nad hladinou moře pro vizuální dohled 23 km (převzato z [19]).	35
Obr. 17:	Přenosové spektrum laserového paprsku pro výšku 2 km nad zemským povrchem a vizuální dohled 23 km (převzato z [19]).	35
Obr. 18:	Přenosové spektrum laserového paprsku nad hladinou moře pro vizuální dohled 5 km (převzato z [19]).	36
Obr. 19:	Přenosové spektrum laserového paprsku pro výšku 2 km nad zemským povrchem a vizuální dohled 5 km (převzato z [19]).	36
Obr. 20:	Hustota zemské atmosféry v závislosti na nadmořské výšce (převzato z [19]).	37
Obr. 21:	Přenosové spektrum laserového paprsku nad hladinou moře (převzato z [19]).	38
Obr. 22:	Různé typy odrazu a rozptylu na povrchu (převzato z [4]).	40
Obr. 23:	Obecná cesta světelného paprsku laserového dálkoměru	42
Obr. 24:	Obecný výkonový úrovnový diagram optického laserového dálkoměru s použitím laserové diody	45
Obr. 25:	Blokové zapojení měřicího pracoviště pro měření odrazivých vlastností materiálů.	48
Obr. 26:	Poměrná směrová odrazivost pro černou lesklou (RAL 9005)	49
Obr. 27:	Poměrná směrová odrazivost pro černou matnou (RAL 9005)	49
Obr. 28:	Poměrná směrová odrazivost pro bílou lesklou (RAL 9016)	50
Obr. 29:	Poměrná směrová odrazivost pro bílou matnou (RAL 9016)	50
Obr. 30:	Poměrná směrová odrazivost pro šedou lesklou (RAL 7040)	51
Obr. 31:	Poměrná směrová odrazivost pro šedou matnou (RAL 7040)	51
Obr. 32:	Poměrná směrová odrazivost černého plastu (RAL 9005)	52
Obr. 33:	Poměrná směrová odrazivost bílého plastu (RAL 9016)	52
Obr. 34:	Poměrná směrová odrazivost šedého plastu (RAL 7040)	53
Obr. 35:	Poměrná směrová odrazivost eloxovaného hliníku	53

Obr. 36:	Blokové zapojení měřicího pracoviště pro měření výkonové bilance laserového dálkoměru	54
Obr. 37:	Srovnání přijatého a vypočítaného optického výkonu numerickým modelem.....	55
Obr. 38:	Vzorky pozinkovaného plechu nalakovaného na odstíny RAL	77
Obr. 39:	Vzorky PVC v odstínech RAL a eloxovaný hliník	77

Seznam tabulek

Tab. 1: Složení zemské atmosféry (převzato z [12])	31
Tab. 2: Útlum atmosféry v závislosti na přímé viditelnosti (převzato z [5])	44
Tab. 3: Tabulka RAL barev použitých pro měření	47
Tab. 4: Jednotlivé útlumy laserového dálkoměru	66
Tab. 5: Tabulka vypočtených hodnot PSO pro nalakovaný pozinkovaný plech	74
Tab. 6: Tabulka vypočtených hodnot PSO pro nalakovaný pozinkovaný plech	74
Tab. 7: Tabulka vypočtených hodnot PSO pro hliníkový a plastové vzorky	75
Tab. 8: Tabulky vypočtených a změřených hodnot optického výkonu	76

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá problematikou laserových dálkoměrů a jejich výkonovou bilancí. Pro správné pochopení funkce laserového dálkoměru budou rozebrány jeho základní součásti, modulační techniky, modulátory, demodulátory a optické detektory. Dále bude podrobně popsána Metoda tranzitního času TOF, která je v laserových dálkoměrech nejpoužívanější. S touto problematikou je potřeba rozebrat princip generování laserového paprsku a jeho následnou úpravu ve vysílací optické soustavě. Dále je potřebné popsat přenosové prostředí, kterým se šíří laserový paprsek k měřenému cíli a od něj a jeho nejdůležitější parametry a to útlum aerosoly, molekulární absorpcí a atmosférickou turbulencí. Po průchodu přenosovým prostředím dopadne paprsek na měřený cíl charakterizovaný poměrnou směrovou odrazivostí. Poměrná směrová odrazivost bude proměřena v experimentální části práce pro různé materiály odlišných barev a povrchů. Poměrná směrová odrazivost je důležitá charakteristika cíle využívaná při energetické bilanci dálkoměru. Výkonové úrovně na cestě laserového svazku od vysílače k cíli a od cíle k přijímači jsou uvedeny pomocí výkonového úrovnového diagramu. Pro energetickou bilanci dálkoměru je použita výkonová bilanční rovnice. Platnost výkonové bilanční rovnice je v práci experimentálně ověřena.

1 ÚVOD DO LASEROVÝCH DÁLKOMĚRŮ

Při výběru laserového dálkoměru je potřeba znát a mít představu o základních vlastnostech laserových dálkoměrů. V počátcích se používaly z dnešního pohledu méně přesné optické dálkoměry, jejichž přesnost se měnila se vzdáleností. Byly také velké a tím pádem ne zcela vhodné pro práci v terénu. Z těchto důvodů nebyly v praxi zcela rozšířené.

S nasazením laserových dálkoměrů se všechno změnilo. I ty nejlevnější laserové dálkoměry jsou přesnější než optické dálkoměry a jsou kompaktnější a rozměrově výhodnější.

Navzdory novým sofistikovaným technologiím, které laserové dálkoměry představují, jsou v principu velice jednoduché.

V laserovém dálkoměru je laserový paprsek, který se promítá na předmět. Od tohoto předmětu se odrazí zpět do dálkoměru, kde je detekován pomocí senzoru. Mikroprocesor pak změří čas, který paprsek potřeboval pro cestu k měřenému objektu a zpět. Následným jednoduchým výpočtem pak vypočte vzdálenost od měřeného objektu. Na základě vypočtené vzdálenosti lze řídit např. motor objektivu pro zaostření fotoaparátu nebo jednoduše tuto vzdálenost vypsát na displej.

Laserové dálkoměry jsou velmi přesná zařízení s přesností plus mínus jeden milimetr. Tato přesnost plně dostačuje pro většinu aplikací.

Maximální dosah ručních laserových dálkoměrů se může pohybovat až v řádech kilometrů. Rozdíly v maximálním dosahu dálkoměrů není ve výkonu laserového paprsku, ale v kvalitě těchto přístrojů. Všechny ruční laserové dálkoměry musí používat lasery třídy I. To znamená, že ty kvalitnější používají lepší mikroprocesory pro zpracování informací, citlivější senzory schopné zachytit nižší úroveň světla a kvalitnější odfiltrování nežádoucích šumů prostřednictvím senzorů s vyšším dynamickým rozsahem. Charakteristikou těchto kvalitních přístrojů je vyšší cena, a však větší dosah a přesnost. V následujícím textu budou popsány základní charakteristiky současných monostatických laserových dálkoměrů, kde vysílač a přijímač je na jednom místě.

2 ZÁKLADNÍ POJMY A VZTAHY

2.1 Světelné vlny

Světlo se šíří prostředím ve formě vln. Matematicky je optická vlna popsána reálnou *vlnovou funkcí* $u(\vec{r}, t)$; \vec{r} je polohový vektor, t je čas. Vlnovou funkci vyjadřuje *vlnová rovnice* (1), [6]:

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

kde ∇^2 je Lambertův operátor a c je rychlost světla v prostředí s indexem lomu n . Předpokládejme transparentní dielektrické, lineární, nedisperzní, homogenní, stacionární a izotropní prostředí, v němž index lomu n je skalární nezávislý na poloze a času. Označí-li se rychlost světla ve vakuu c_0 , platí, [6]:

$$c = \frac{c_0}{n}. \quad (2)$$

V elektromagnetické teorii světla představuje vlnová funkce některou ze tří souřadnic vektoru intenzity pole \vec{E} nebo \vec{H} . Optická vlna má vysokou frekvenci v oblasti od $3 \cdot 10^{11}$ Hz až po $6 \cdot 10^{16}$ Hz a vlnová funkce není přímo měřitelná. Fyzikálně měřitelnou veličinou je optická intenzita, definovaná jako optický výkon vztažený na jednotku plochy. Pomocí Poyntingova vektoru $\vec{I} = \vec{E} \times \vec{H}$ lze optickou intenzitu vyjádřit vztahem, [6]:

$$I = \langle |\vec{E} \times \vec{H}| \rangle = \langle |\vec{I}| \rangle = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} |\vec{I}| dt, \quad (3)$$

kde T_1 je časový interval středování, který je mnohem delší než je perioda perioda vlny. Pro předpokládané prostředí platí mezi amplitudou elektrického pole E_0 a amplitudou magnetického pole H_0 vztah, [6]:

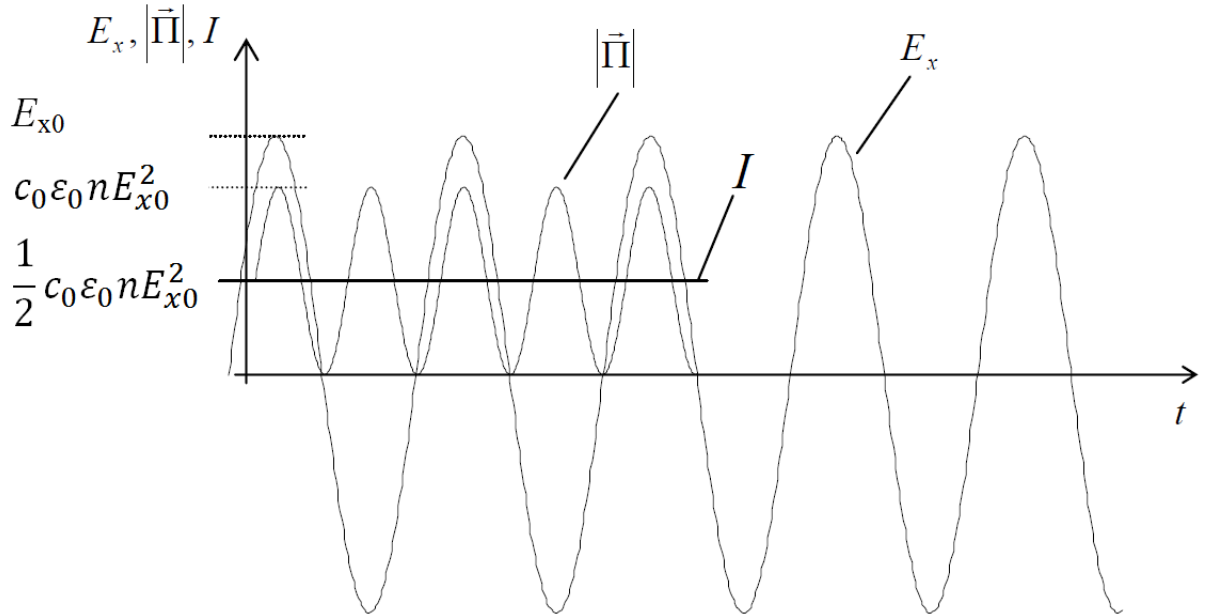
$$\frac{E_0}{H_0} = \frac{\sqrt{\mu_0}}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r}}, \quad (4)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, ε_0 je permitivita vakua a ε_r je relativní permitivita prostředí. Pro vyjádření optické intenzity použijeme vzorec 3 a 4, [6]:

$$I = \frac{1}{2} E_0^2 \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\mu_0}} = \frac{1}{2} c_0 \varepsilon_0 n E_0^2, \quad (5)$$

$$\text{kde } c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \text{ a } n = \sqrt{\varepsilon_r}.$$

Na obrázku 1 je znázorněn příklad časového rozložení veličin E_x , $|\vec{I}|$ a I za předpokladu, že se vlna šíří ve směru osy $0z$ souřadnicové soustavy $0xyz$ a vektor intenzity elektrického pole má směr osy $0x$.



Obr. 1: Příklad časového rozložení veličin E_x , $|\vec{E}|$ a I .

(E_{x0} je amplituda intenzity elektrického pole polarizovaného souhlasně s osou $0x$ souřadnicové soustavy $0xyz$)

Optická intenzita je veličina závislá na poloze $I = I(\vec{r})$. Za předpokladu intenzitní modulační optické vlny, je optická intenzita funkcí polohy a času $I = I(\vec{r}, t)$. Integrací časově proměnné optické intenzity po ploše S kolmé na směr šíření se získá časově závislý optický výkon, [6]:

$$P(t) = \int_S I(x, y, t) dS, \quad (6)$$

kde x, y jsou souřadnice plochy S . Časová závislost je zde uvažována vzhledem k modulačním změnám optické intenzity, nikoli vzhledem k vysoké frekvenci optické nosné vlny.

Pro vyjádření plošně střední optické intenzity $\bar{I}(t)$ se používá výraz, [6]:

$$\bar{I}(t) = \frac{P(t)}{S}, \quad (7)$$

kde S je plocha, na které dochází ke středování (např. přijímací apertura, aktivní plocha fotodiody).

Pro plošně i časově střední optickou intenzitu (vzhledem k modulačním změnám) platí, [6]:

$$\langle \bar{I}(t) \rangle = \frac{1}{T_2} \int_{T_2} I(x, y, t) dt = konst, \quad (8)$$

kde T_2 je doba středování, která je mnohem delší než jsou modulační změny optické intenzity.

3 OPTICKÉ VYSÍLAČE

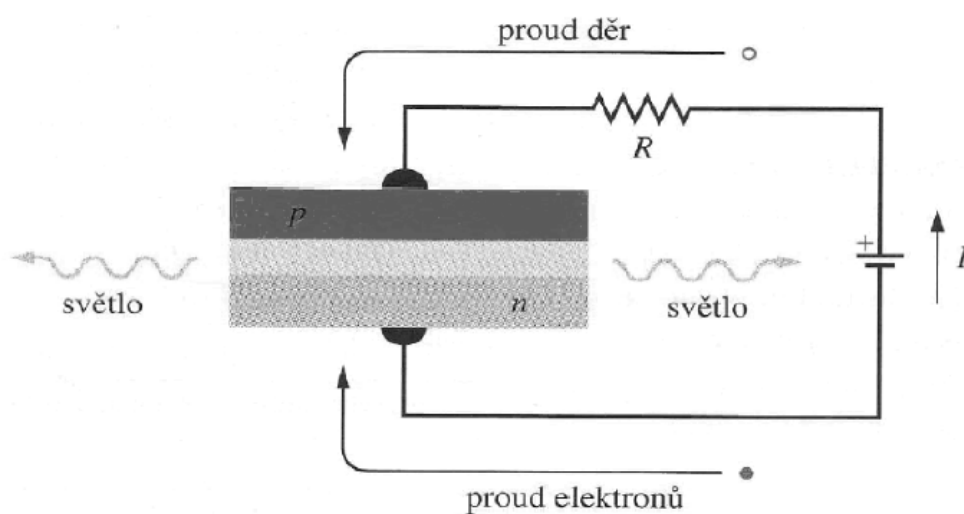
Optické vysílače jsou zdrojem paprsku pro laserové dálkoměry. Zdrojem paprsku v optickém vysílači může být laser, laserová dioda a LED dioda. V laserových dálkoměrech se nejvíce využívají zdroje paprsku založené na polovodičové technologii, jako jsou polovodičové lasery, laserové diody. Jednotlivé technologie budou rozebrány v následujícím textu.

3.1 Lasery

Laser je zařízení obsahující aktivní látku, optický rezonátor a zdroj energie. Lasery vysílají velmi úzký a intenzivní paprsek světelného záření o velmi malé spektrální šířce. Díky těmto vlastnostem si lasery našly široké uplatnění od použití ve sportu přes průmyslové použití až po kosmické technologie. Princip laseru je ve vybuzení elektronů aktivní látky ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny tzv. excitované. Je-li vybuzena většina elektronů aktivní látky do vyšší energetické hladiny, vzniká inverzní populace. Podrobněji tento proces bude rozebrán v následujícím textu.

3.2 Laserové diody

Laserová dioda je tvořena polovodičovým přechodem p - n . V této struktuře je velká koncentrace elektronů ve vodivostním pásu v polovodiči typu n a velká koncentrace děr ve valenčním pásu polovodiče typu p . Vzniká zde inverzní populace elektronů, kde je větší množství elektronů na vyšších energetických hladinách než elektronů na nižších energetických hladinách.

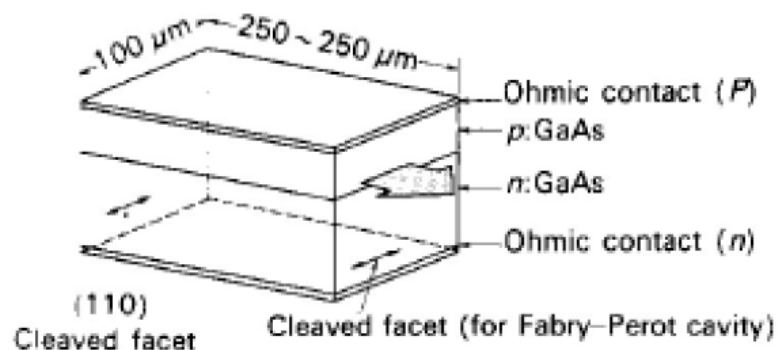


Obr. 2: Principiální schéma laserové diody (převzato z [4]).

Pokud elektron přeskočí z vodivostního pásu do valenčního a uvolní část své energie, která může být ve formě fotonu, takto uvolněný foton může stimulovat další přechod elektronu z vodivostního pásu do valenčního, a tak vytvořit další foton. Tyto dva fotony mohou stimulovat další přechody elektronů a spustit lavinový proces. Tento lavinový proces se rozběhne, pokud je proud přechodem $p-n$ dostatečně velký. Protilehlé strany laserové diody musí být rovnoběžné $p-n$ přechodem a musí být opatřeny zrcadly, aby mohlo docházet k mnohonásobným odrazům světla. Laserové diody mají široké použití v průmyslu, domácnostech, komunikační a měřicí technice díky svým malým rozměrům a příznivé ceně [4].

3.3 Základní struktura laserových diod

Jako zdroj laserového záření jsou v laserových dálkoměrech nejčastěji používány polovodičové laserové diody. Tyto diody jsou vyráběny na jedno-krytalovém substrátu epitaxním růstem. Takto vytvořené krystaly mohou být snadno štěpeny, jejich povrch lze použít jako zrcadla pro laserové diody. Tento typ laseru se nazývá Fabry-Perotův laser.



Obr. 3: Fabry-Perotův laser (převzato z [22])

Laserová dioda je připevněna polovodičem typu p na plátek ze zlato-silikonové slitiny. Získané laserové světlo je fokusováno čočkou a přivedeno na vysílací optickou soustavu. Typické rozměry laserové diody jsou stovky mikrometrů. Napájecí kontakty jsou připojeny na horní a spodní stranu diody [22].

4 OPTICKÉ ČOČKY

Čočka je těleso, na kterém dochází ke dvěma lomům světla. Je-li čočka v prostředí vzduchu jako homogenní směsi plynů, tak se procházející světlo láme na rozhraní „vzduch - čočka“, projde čočkou a opět se láme na rozhraní „čočka - vzduch“. Při každém lomu zpravidla změní světlo směr. Čočka, která původně rovnoběžné paprsky převede na paprsky sbíhající se, se jmenuje spojná čočka. V případě, že se rovnoběžné paprsky rozbíhají, tak se jedná o čočku nazývanou se rozptylka [4].

Jedním z prvních kroků při návrhu optického systému je určit k jakému účelu bude tento systém sloužit. Dle zvoleného účelu jsou navrženy vhodné parametry tohoto systému.

Hlavními parametry optických systémů jsou:

- **Potřebná vzdálenost** – vzdálenost objektu od zdroje záření a vzdálenost objektu od odrazu.
- **Numerická apertura NA a ohnisková vzdálenost f_f** – jsou měřítkem kužele světla, které je přijímáno nebo vysíláno systémem čoček.
- **Optická mohutnost** – vyjadřuje převrácenou hodnotu obrazové ohniskové vzdálenosti čočky.
- **Rozlišení a velikost objektu** – rozlišovací schopnost zobrazovacího systému.

Optické soustavy se dělí na:

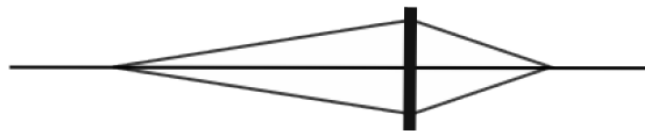
- **Teleskopická**
- **Kolektivní zobrazovací systém**
 - **zobrazení konečných bodů** – zaměřuje světlo přicházející ze zdroje na bod
 - **zobrazení bodu v nekonečnu** – formuje paprsek ze zdroje světla a kolimuje ho na požadovaný paprsek

Přehled optických soustav (viz. Obr. 4)

Teleskopický zobrazovací systém



Kolektivní zobrazovací systém- zobrazení konečných bodů



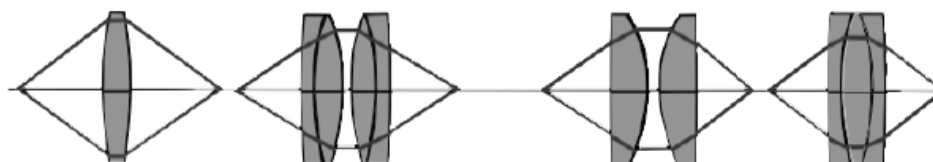
Kolektivní zobrazovací systém- zobrazení bodu v nekonečnu



Obr. 4: Přehled optických soustav (převzato z [4]).

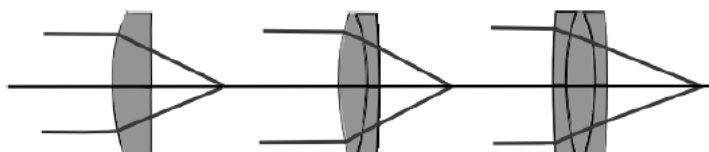
4.1 Kolektivní optická soustava

Kolektivní optická soustava z konečných bodů má efektivní ohniskovou vzdálenost odpovídající ohniskové vzdálenosti objektivu. Výhodou je jednoduchost konstrukce a příznivá cena. V této soustavě lze kombinovat různé prvky a docílit tak kvalitnějšího zobrazení. Možnosti zobrazení (viz. Obr. 5).



Obr. 5: Kolektivní optické soustavy pro zobrazení konečných bodů (převzato z [4]).

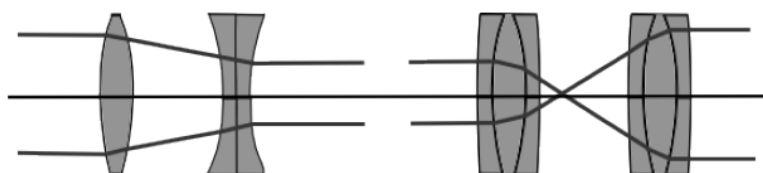
Druhý systém je zobrazení bodu v nekonečnu, který usměrňuje světelný tok na detektor. Možnosti zobrazení (viz. Obr. 6)



Obr. 6: Kolektivní optické soustavy pro zobrazení bodů v nekonečnu (převzato z [4]).

4.2 Teleskopická optická soustava

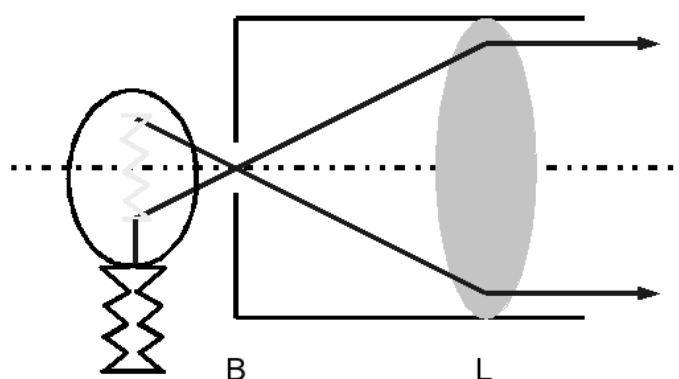
Tato optická soustava používá dva prvky pro zobrazení průběžného paprsku. Je-li potřeba expandovat světelný paprsek z laserové diody nebo laseru, využívá se systému s jedním spojným a jedním rozptylným prvkem [4]. Možnosti zobrazení (viz. Obr. 7).



Obr. 7: Kolektivní optické soustavy pro zobrazení bodů v nekonečnu (převzato z [4]).

4.3 Kolimátor

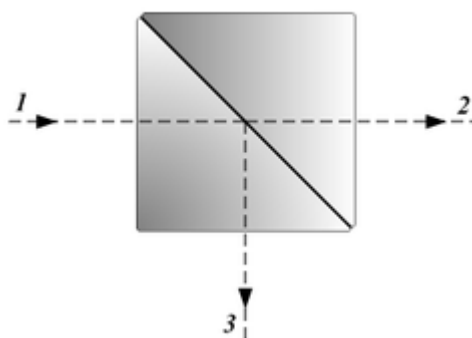
Kolimátory se skládají ze soustav čoček a zrcadel. Tato soustava má za úkol směřovat paprsek světla do úzkého svazku. Kolimátory se používají v laserových technologiích. Ze zdroje laserového záření vychází rozptýlené záření a kolimátor se využívá k usměrnění tohoto záření, aby bylo možné s ním dále pracovat. U laserových zařízení je kolimátor spojen s optickým izolátorem kvůli zpětné reflexi záření. Dále následuje optická soustava, která usměrní a zaostří laserový paprsek. Další použití kolimátoru je v měřicí a kalibrační technice [15].



Obr. 8: Principiální schéma kolimátoru (převzato z [15]).

4.4 Rozdělovač paprsku

Rozdělovač paprsku je pasivní komponenta používaná v laserových dálkoměrech pro rozdělení paprsku. Paprsek přicházející na rozdělovač se rozdělí na dva. První paprsek jde do optického modulátoru, má-li dálkoměr externí modulátor, nebo jde na vysílací čočku v případě vnitřní modulace. Druhý paprsek je přiveden přímo na detektor, kde spustí hodiny pro výpočet času, který potřebuje paprsek pro cestu k cíli a zpět. Nejjednodušší rozdělovač paprsků je skleněná krychle slepená ze dvou trojúhelníkových hranolů. Tyto hranoly jsou slepeny lepidlem, jehož vrstva je přímo nastavena pro určitou vlnovou délku světla. Část světla přicházejícího do krychle projde a část světla se odrazí díky odrazu na rozmezí dvou materiálů [16].



Obr. 9: Schematické znázornění krychle rozdělovače paprsků (převzato z [16]).

1-dopadající světlo, 2-průchozí světlo, 3-odražené světlo

4.5 Optické filtry

V laserových dálkoměrech jsou optické filtry velice důležité, protože odstraňují z přijatého optického záření nežádoucí šum nacházející se v přijatém záření a propouští pouze užitečné pásmo záření. Rozeznáváme dva základní druhy optických filtrů:

- absorpční filtry
- interferenční filtry

Absorpční filtry jsou vyrobené ze skla s organickými a anorganickými sloučeninami. Podle množství a druhu sloučenin, filtry pohlcují různá pásma záření. Levnější variantou absorpčních filtrů jsou plastové filtry.

Interferenční filtry jsou konstruovány jako tenká průhledná vrstva kovu (Al, Ag) mezi dvěma skleněnými destičkami. Na interferenčním filtru dochází k několikanásobnému odrazu a díky interferenci se zamezí nežádoucím odleskům a odstraněním nežádoucího vlnového pásma [5].

Některé typy optických filtrů:

- infračervené – propouští viditelné světlo a nepropouští infračervené paprsky
- ultrafialové - propouští viditelné světlo a nepropouští ultrafialové paprsky
- monochromatické – propouštějí velmi úzké vlnové pásmo
- dolní propust – propouští delší vlnové délky optického záření a kratší značně tlumí
- horní propust - propouští kratší vlnové délky optického záření a delší značně tlumí
- pásmová propust – propouští úzké pásmo vlnových délek, pro které je filtr navržen a ostatní vlnové délky filtr značně tlumí.

5 ZÁKLADNÍ SOUČÁSTI DÁLKOMĚŘŮ

5.1 Optické modulátory

Optické modulátory jsou zařízení, která modulují optické záření přicházející ze zdroje záření. Rozeznáváme dva typy modulátorů externí modulátory a interní modulátory.

Externí modulátory modulují kontinuální záření přicházející ze zdroje záření. Tyto modulátory mohou být mechanické (rotující clona) nebo elektronické (uzávěrka z tekutých krystalů).

Interní modulátory mají modulátor zabudovaný přímo ve zdroji záření. U tohoto typu modulátorů může být měněno napájecí napětí zdroje záření, a tím se změní intenzita záření.

5.2 Modulace

Na modulovaný laserový paprsek jsou kladeny vysoké nároky na jeho kvalitu, aby stopa paprsku byla dostatečně malá na velkých vzdálenostech, laserový paprsek by měl mít dostatečný výkon zejména pro měření vzdálených cílů s difúzním povrchem. Požadavky na zdroj světla:

- krátké pulzy
- dostatečně vysoký výkon
- možnost modulace pro kontinuálně vyzařující zdroje
- úzká spektrální čára
- vysoká kolimovatelnost

Aby bylo možné přímo měřit čas, za který světlo urazí cestu k cíli a zpět, musí se na světelném svazku udělat “značka“. K tomu slouží modulace amplitudy nejčastěji pak:

- pulzní (laser vyšle jeden nebo více pulzů)
- amplitudová sinusová (s jedním nebo více modulačními kmitočty)

U těchto modulací je výkon vyslaného světelného paprsku funkcí času. Modulovaný světelný paprsek získáme z kontinuálně pracujícího laseru pomocí rotující mechanické závěrky (např. rotující clona), akustické nebo elektrooptické (modulační kmitočet až 25 GHz). U závěrky z tekutých krystalů mohou mít modulační kmitočet několik kHz [7].

Pulzní modulaci můžeme realizovat pomocí laserů schopných generovat femtosekundové až nanosekundové pulzy. Takovéto lasery musejí mít velice strmou náběžnou a sestupnou hranu světelného impulzu.

Amplitudovou modulaci lze jednoduše získat pomocí LED diod nebo polovodičových laserů, které jsou buzeny přímo modulačním napájecím napětím. Lze dosáhnout modulačního kmitočtu až jednotek GHz se 100% modulační hloubkou a vysokou linearitou.

5.3 Demodulace

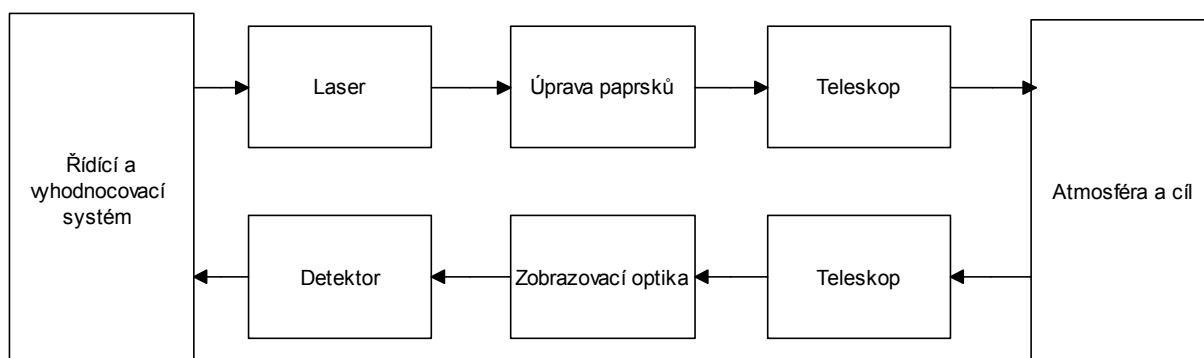
Světlo, které jsme detekovali, je zapotřebí demodulovat a získat z něj požadovanou informaci o časovém zpoždění světelného svazku. Laserové dálkoměry využívají dva způsoby demodulace, a to:

- přímou detekci,
- heterodynní detekci (interferenční).

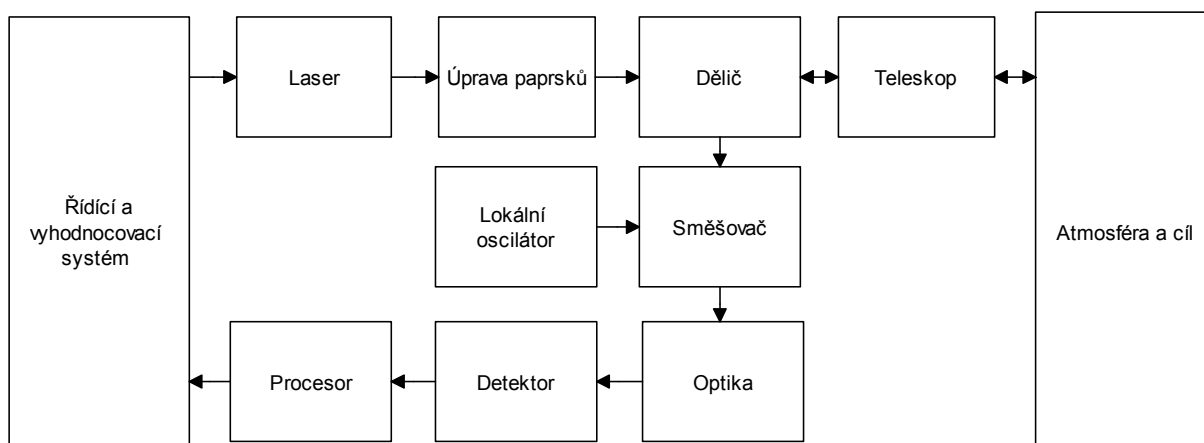
Při přímé detekci je světlo fokusováno na fotocitlivou vrstvu detektoru, které dává napětíovou odezvu úměrnou intenzitě dopadajícího světelného svazku.

Používá-li dálkoměr amplitudovou modulaci, využívá se heterodynní demodulace. Při této modulaci je přijaté světlo směřováno s vyslaným referenčním paprskem, který je frekvenčně posunut. V případě, že jsou oba svazky koherentní, potom dojde k detekci signálu, který je modulovaný s frekvencí rovnou rozdílu obou paprsků. Pokud použijeme jako referenční zdroj část svazku laserového dálkoměru, nastává problém, oba svazky mají stejnou frekvenci a výsledná interference je

časově neměnná. Tento problém můžeme vyřešit tak, že posuneme frekvenci referenčního svazku, a tím dostaneme časově proměnný signál [7].



Obr. 10: Blokové schéma dálkoměru s jedním teleskopem a přímou detekcí časového zpoždění (převzato z [7]).



Obr. 11: Blokové schéma dálkoměru se dvěma teleskopy a heterodynní detekcí pro určení časového zpoždění (převzato z [7]).

5.4 Optické detektory

Optické detektory neboli fotodetektory jsou velice důležitou částí optických přijímačů a určují celkovou výkonnost a účinnost systému. Základním úkolem fotodetektorů je převod energie světelné na elektrickou. Světlo dopadající na aktivní plochu fotodetektoru je převedeno na elektrický signál. Fotodetektory můžeme dělit na detektory fotoemisní (např. vakuové fotodiody nebo fotonásobičky), detektory fotoinduktivní (fotorezistory), detektory fotovoltaické (fotocely, fotodiody, fototranzistory).

U fotodetektorů sledujeme zejména tyto parametry:

- citlivost (nejmenší možná detekovatelnost optického záření)
- odezva (poměr mezi výstupním signálem ke vstupnímu výkonu)
- časová odezva
- kvantová účinnost
- temný proud

Pro detekci světla se v dálkoměrech nejčastěji používají fotodiody (PIN diody), lavinové diody nebo fotonásobiče. Upřednostňují se lavinové diody a fotonásobiče, protože tyto vykazují zisk. Jako polovodičové lasery, mají také fotodiody na svém optickém vstupu okénko pro příjem optického výkonu z volného prostoru. Některé důležité parametry fotodiod [7]:

- bariérová kapacita (je přímo závislá na velikosti aktivní plochy typicky 10pF)
- aktivní plocha (bývá kruhová o průměru 0,1 mm až 3mm)
- časová konstanta (čím větší aktivní plocha tím větší časová konstanta)
- výkon ekvivalentního šumu NEP (určuje střední výkon harmonického modulovaného optického výkonu, při kterém je střední hodnota napětí na fotodiodě rovna standardní odchylce šumového napětí.)

6 METODY MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI

Metod měření vzdálenosti je celá řada. O tom jakou metodu použijeme v konkrétním případě, rozhodují následující faktory:

- vzdálenost zkoumaného předmětu od místa měření
- rozměry předmětu
- požadovaná přesnost
- vlastnosti povrchu předmětu (nerovnosti, odrazivost světla, drsnost)
- přístup k měřenému objektu
- zda se objekt pohybuje

Vzdálenost měříme za pomoci různých pomůcek nebo přístrojů. Podle toho, co k měření vzdálenosti použijeme a jak měření provedeme, můžeme měření rozdělit do dvou základních skupin:

- dotykový způsob (provádí se za pomoci pomůcek, jako jsou měřítka, měřicí pásma, mikrometry atd., tyto pomůcky se vkládají přímo mezi dva body, jejichž vzdálenost chceme zjistit)
- bezdotykový způsob:
 - akustické metody
 - radiofrekvenční metody
 - optické metody

V této práci použiji optické metody měření vzdálenosti. Tyto metody se dají dělit podle následujících hledisek:

- aktivní (využívají ke své činnosti vlastní zdroj světelného záření)
- pasivní (nepotřebují ke své činnosti vlastní zdroj světelného záření, využívají okolní záření)
- přímé (tato metoda dává jednoznačnou vzdálenost k cíli)
- odrazové (při použití této metody je vzdálenost k cíli vypočítána pomocí algoritmů)
- monokulární přijímací a vysílací soustava je v jedné čočce
- stereoskopické (přijímací a vysílací soustava je ve dvou čočkách)
- koherentní (tato metoda je vhodná k měření změny vzdálenosti)
- nekoherentní (tato metoda je vhodná k měření absolutní vzdálenosti)

Triangulace je metoda aktivní, laserový paprsek generovaný zdrojem záření dopadá na cíl. U triangulace je třeba zvolit kompromis mezi zorným polem, neurčitostí měření a efekty stínů kvůli velké hodnotě úhlu mezi přijatým paprskem a vyslaným. Tato metoda je vhodná k určování vzdálenosti.

Strukturované osvětlení je založeno na triangulaci, ale místo skenování je promítán obraz a z něj jsou získávány údaje o vzdálenosti.

Stereovidění je formou strukturovaného osvětlení. Dvě nebo více kamer zachytí obraz cíle a z následujících obrázků se vyhodnotí vzdálenost.

Fotogrammetrie umožňuje vytvořit 3D model pomocí fotografií. Postup je následující: kalibrace a orientace kamer, orientace obrazových bodů, generace mračna 3D bodů a generace ploch.

Metoda tranzitního času (TOF) tato metoda spočívá v měření časového zpoždění doby letu paprsku od měřeného cíle. Tato metoda je velmi efektivní a vhodná i pro měření velmi vzdálených cílů.

Interferometrie je metoda, která vyhodnocuje obrazce vzniklé ze světla odraženého od cíle a referenčního světla. Tato metoda je velmi přesná.

Tvar a fokusace vzdálenost a hloubku cíle můžeme dostat přeastřením objektivu, kdy je část obrazu ostrá a část rozmazaná.

Pro běžné měření, zejména velkých vzdáleností, je využívána metoda TOF. Tato metoda je založena na detekci nekoherentních světelných impulzů, z jejichž zpoždění dostáváme přímo měřenou vzdálenost. Tato metoda má svoje omezení při měření krátkých vzdáleností řádově méně než 1m, neboť zatím nemáme dostatečně rychlé fotodiody. Přesnost měření je omezena elektronickými přístroji, které poskytují rozlišení 3ps to odpovídá délce cca. 1mm [7].

V této práci je v experimentální oblasti použit dotykový způsob určení vzdálenosti mezi laserem a experimentálně testovaným vzorkem.

7 METODA TRANZITNÍHO ČASU TOF

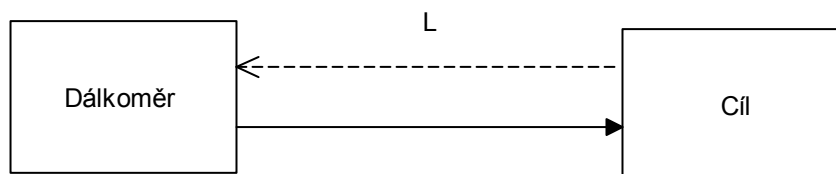
Tato metoda umožňuje měření velkých vzdáleností, stovky metrů a mnoha kilometrů. Uvedenou metodou byla např. změřena vzdálenost mezi Zemí a Měsícem s přesností na několik centimetrů. Jednoduché přístroje používající metody tranzitního času (TOF) mají přesnost několik milimetrů až centimetrů (na vzdálenosti jednotky až stovky metrů).

7.1 Základní princip

Jak je zřetelné z obrázku 12 dálkoměr vyšle k cíli světelný paprsek. Světlo se od cíle odrazí a je detekováno v dálkoměru, měří se doba T , kterou světlo potřebuje k překonání vzdálenosti L_{vzd} (od dálkoměru k cíli a zpět). Tato vzdálenost se určí podle vztahu, [7]:

$$L_{vzd} = \frac{cT}{2} ; [m], \quad (9)$$

kde L_{vzd} je vzdálenost dálkoměr cíl, c je rychlost světla v prostředí, T je doba potřebná k překonání vzdálenosti dálkoměr cíl.

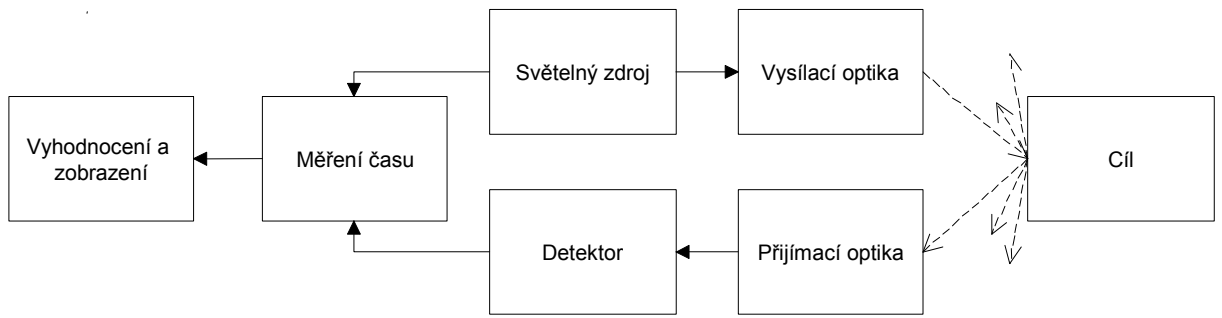


Obr. 12: Princip laserového dálkoměru (převzato z [7]).

Na první pohled vypadá měření velice jednoduše, ale při jeho realizaci nastává celá řada problémů, které je zapotřebí vyřešit. Nejdůležitější jsou:

- Jakým způsobem budeme měřit časové zpoždění?
- Jaké jsou předpokládané vlastnosti cíle?
- Jaké jsou předpokládané vlastnosti atmosféry?
- S jakou přesností potřebujeme měřit?
- Jaký budeme používat světelný zdroj?

Pro lepší představu jsou na obrázku 13 zobrazeny základní komponenty TOF dálkoměru.

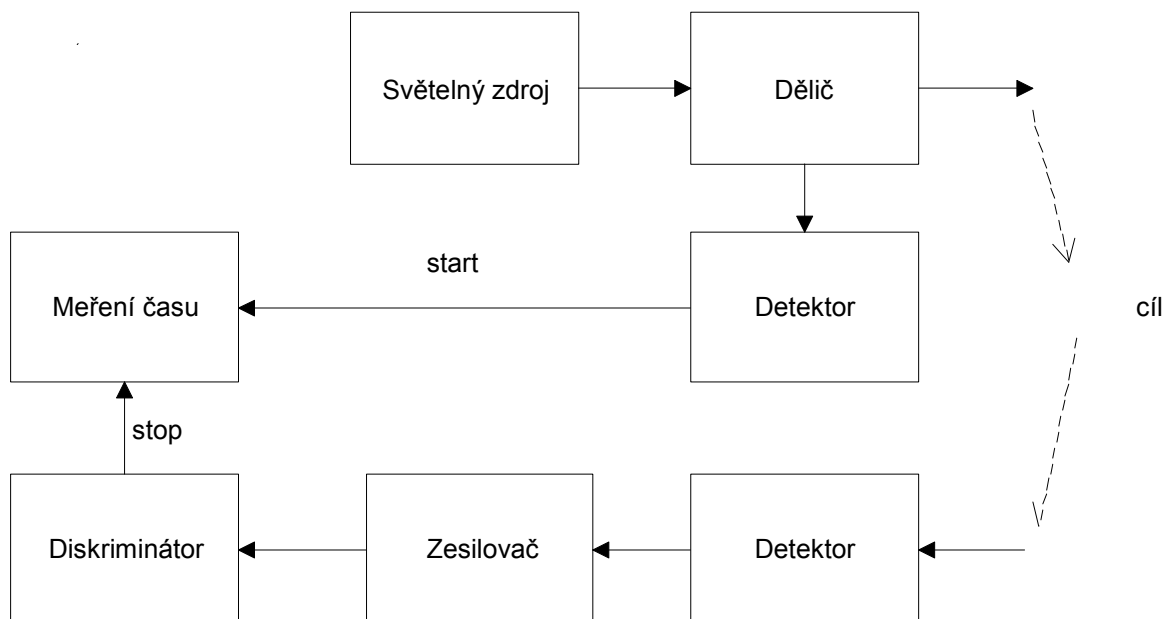


Obr. 13: Základní komponenty TOF dálkoměru (převzato z [7]).

7.2 Metoda jednoho pulzu

Popis měření vzdálenosti metodou jednoho pulzu bude vysvětlen pomocí obrázku 14, na kterém jsou zobrazeny základní komponenty potřebné pro tuto metodu.

Světelný zdroj, obvykle laser vygeneruje pulz o délce τ . Tento pulz musí být prostorově kratší $c\tau$, než je měřená vzdálenost L . Dělič rozdělí paprsek na dva. Jeden je detekován ve fotodetektoru a slouží jako startovací pulz pro měření času. Druhý paprsek je mnohem silnější a je přes vysílací optiku vyslán k cíli. Laserové záření odražené od cíle je fokusováno přijímací optikou na fotodetektor. Elektrický signál z detektoru je zesílen a poslán na diskriminátor, který generuje stop signál pro měření času. Diskriminátor definuje body na časové ose, které vymezují měření. Tato metoda měření má nevýhodu spočívající ve snížené přesnosti měření při změně tvaru přijatého pulzu [7].



Obr. 14: Princip měření vzdálenosti metodou jednoho pulzu (převzato z [7]).

7.3 Řada pulzů

Detektor v dálkoměru je jako každý elektrooptický přístroj omezen šumem. Jedna z metod jak zvýšit pravděpodobnost správné detekce, a tím i zpřesnit měření bez zvyšování SNR, je opakovat měření.

Ze statistiky je známo, že pokud opakujeme nezávislá měření pomocí n po sobě jdoucích pulzů, dostaneme přesnost σ_T/\sqrt{n} . Za podmínky, že cíl bude během měření statický. Předpokladem pro realizaci dálkoměru, který generuje řadu pulzů je, že máme zdroj světelného záření, který generuje stejné po sobě jdoucí impulzy s opakovací frekvencí f_r . Odezvu každého impulzu vyhodnocujeme zvlášť a následně vypočteme střední hodnotu. V praxi používáme několik metod měření.

Synchronní měření s adresováním je metoda, při které laser vyšle pulz o délce τ . Po odrazu od cíle přichází pulz se zpožděním na detektor. Toto zpoždění je závislé na vzdálenosti cíle. Elektronická uzávěrka pracuje synchronně s laserem. Současně s vysláním laserového pulzu je otevřena uzávěrka na stejnou dobu τ . Detekovaný signál je ukládán do paměti S_1 . V okamžiku $\Delta t < \tau$ uzávěrka přepne a detekovaný signál je ukládán do paměti S_2 . Časové zpoždění T lze vypočítat pomocí Medinova vzorce, [7]:

$$T = \Delta t \frac{S_2}{S_1 + S_2}, [S]. \quad (10)$$

Maximální vzdálenost, kterou lze touto metodou měřit je dána délkou pulzu, [7]:

$$L_{max} = \frac{1}{2} c\tau, [m]. \quad (11)$$

Měření pomocí jednotlivých fotonů je metoda založena na opakovaném měření časového zpoždění jednoho nebo žádného fotonu. V průběhu měření vysíláme k cíli pulz a na detektoru zaznamenáváme časové zpoždění jednotlivých detekovaných fotonů vzhledem ke start pulzu. Z těchto jednotlivých měření rekonstruujeme tvar optického signálu v čase s odpovídajícím časovým zpožděním. Tato metoda měření dosahuje přesnosti lepší než $30 \mu m$ do vzdálenosti $25 m$ [7].

Amplitudová modulace umožňuje nepřímé měření tranzitního času, které je založeno na měření rozdílu fáze vyslaného a přijatého signálu. Přesnost dálkoměrů využívajících tuto metodu je závislá na tom, jak jsme schopny přesně změřit fázový rozdíl mezi vyslaným a přijatým signálem. Dále přesnost závisí také na modulační frekvenci. S rostoucí frekvencí roste rozlišovací schopnost dálkoměru. Pro tuto metodu se hodí polovodičové lasery, které umožňují modulaci výkonu na vysokých frekvencích [7].

7.4 Dosah dálkoměrů

Dosah dálkoměru je maximální vzdálenost, ze které je přijímač dálkoměru schopen detekovat odražené světlo od cíle. Tato vzdálenost je omezena poměrem SNR.

Při detekci signálu může nastat několik situací, každá z nich může nastat s jistou pravděpodobností:

- úroveň signálu s šumem překročí stanovený práh a dojde k detekci signálu
- úroveň samotného šumu překročí stanovený práh a dojde k falešné detekci

Pro výpočet pravděpodobnosti detekce signálu P_d se v praxi používá následující vztah, [7]:

$$P_d = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left\{ \sqrt{\frac{1}{2} + \operatorname{SNR}} - \ln P_f \right\} \right), \quad (12)$$

kde $\operatorname{erf}(\)$ je chybová funkce, P_f pravděpodobnost falešné detekce. Tato aproximace má chybu menší než 2 % pro $10^{-12} < P_f < 10^{-3}$ a $\operatorname{SNR} > 2$. Toto rozmezí vyhovuje většině dálkoměrů.

Pro impulzní modulace je zapotřebí použít následující vztah. Nutnou podmínkou je, aby pulz byl v gausovském bílém šumu [7].

$$P_d = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left\{ \frac{\operatorname{SNR} - \operatorname{TNR}}{\sqrt{2}} \right\} \right), \quad (13)$$

$$\operatorname{TNR} = \frac{S_p}{p_n}, \quad (14)$$

kde TNR je práh diskriminátoru pro falešné popluchy, S_p je hodnota prahového signálu a natavuje se během měření nebo programování tak, aby se omezily falešné detekce.

7.5 Nejednoznačnost měření

U impulzních dálkoměrů, používajících pro měření jeden pulz, problém s nejednoznačností měření nenastává, protože je měření vždy jednoznačné.

V případě dálkoměrů, využívajících k měření vzdálenosti více pulzů, je měření nejednoznačné. Je-li opakovací čas vyslání měřících impulzů T_r kratší, než návratová doba impulzu T , budeme detekovat během času T i pulzy v časech $t = T - T_r$, $t = T - 2T_r$, ..., z tohoto důvodu nebudeme vědět, který návratový impulz patří skutečné vzdálenosti cíle.

Obdobný problém nastává v případě amplitudové modulace, kdy je modulační periody T_m kratší než návratový čas T .

Tento problém lze vyřešit tak, že časy T_r a T_m budou delší, než návratový čas T . Z předchozího vyplývá, že jsme jednoznačně schopni měřit vzdálenosti, [7]:

$$L_{VZD} \leq cT_{t,m}[m]. \quad (15)$$

8 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ

8.1 Vliv atmosféry na laserový paprsek

Chceme-li měřit pomocí laserového paprsku, musíme zajistit, aby vyslaný paprsek dorazil k cíli, odrazil se od něj a nějaká měřitelná část dopadla na detektor dálkoměru.

Laserový paprsek na své cestě k cíli prochází atmosférou, která je značně nehomogenním prostředím pro šíření světla a zejména na velké vzdálenosti podstatným způsobem ovlivňuje charakter vyslaného paprsku. Tyto nestejnorodosti se nejvíce uplatňují ve spodních vrstvách atmosféry blízko zemského povrchu. Atmosférické nestejnorodosti mění nejvíce propustnost, tvar dráhy paprsku a rychlost paprsku. Měříme-li vzdálenost laserovými dálkoměry, tak chyby měřené vzdálenosti jsou závislé na vlhkosti vzduchu, teplotě, tlaku, srážkách, na přítomnosti různých plynů a pevných látek jako je např. prach v atmosféře. Zmíněné faktory budou podrobněji rozebrány v následujícím textu.

Při interakci zemské atmosféry a laserového paprsku záleží na složení zemské atmosféry. Zemská atmosféra je tvořena pěti základními vrstvami: troposféra, stratosféra, mezosféra, termosféra a exosféra. Tato práce se bude zabývat pouze troposférou, protože naprostá většina dálkoměrů je používána a konstruována v této vrstvě zemské atmosféry. Chemické složení troposféry je na následujícím obrázku.

plyn	zkratka plynu	objem v atmosféře (%)
dusík	N ₂	78,08
kyslík	O ₂	20,94
argon	Ar	0,93
oxid uhličitý	CO ₂	0,04
neon	Ne	0,00182
helium	He	0,00052
krypton	Kr	0,00014
vodík	H ₂	0,00005
xenon	Xe	0,000009
ozón	O ₃	0,0 - 0,000007
oxid siřičitý	SO ₂	0,0 - 0,000100

Tab. 1: Složení zemské atmosféry (převzato z [12]).

Troposféra je neaktivnější vrstvou atmosféry, protože se v ní utváří počasí. To znamená, že se v ní šíří vítr a související změny atmosférického tlaku, padají srážky od jemného mrhnutí až po velice intenzivní srážky, sněží, vytváří se mlha, mraky atd.. Troposféra má také značný teplotní gradient průměrně 0,65°C na 100 výškových metrů, to také značně ovlivňuje měření. Součástí troposféry je i vlhkost vzduchu, která může být až 100% v tropických oblastech. V průmyslových oblastech a hustě osídlených městech je zvýšené množství polétavého prachu [12].

8.2 Vliv prostředí na rychlost světla

Rychlost světla v prostoru není konstantní, nejvyšší rychlosti světlo dosahuje ve vakuu, protože je v něm nejméně částic bránících šíření světla. Rychlost světla klesá s hustotou prostředí, ve kterém se šíří. Bylo změřeno, že rychlost světla ve vakuu je $299\,792\,458\text{ m/s}$, v zemské atmosféře je světlo pomalejší přibližně o 0,1% rychlosti světla ve vakuu. Ve vodě má světlo rychlost $225\,308\,160\text{ m/s}$, ve skle přibližně $201\,168\,000\text{ m/s}$, v diamantu $124\,885\,000\text{ m/s}$ a v rubínu jen $57,9\text{ m/s}$.

Z předchozího vyplývá, že pro přesné měření vzdálenosti musíme započítat vliv rychlosti světla pro různá prostředí, kterými světlo prochází. V případě laserových dálkoměrů (pracujících v zemské atmosféře) vycházející laserový paprsek z laserové diody prochází skleněnou vysílací aperturou, krycím sklem dálkoměru a dále se šíří k cíli zemskou atmosférou. Záření odražené od cíle se šíří zpět zemskou atmosférou k dálkoměru a dále krycím sklem dálkoměru a skleněnou přijímací aperturou, která usměrní toto záření na detektor. Z toho vyplývá, že laserový paprsek nikdy nedosáhne maximální rychlosti světla ($299\,792\,458\text{ m/s}$), ale bude vždy pomalejší. Tento fakt je potřebné pro přesné měření vzdálenosti zohlednit [23].

8.3 Útlum aerosoly

Aerosoly jsou v atmosféře zastoupeny v širokém množství, jako jsou organické materiály, prach, led, voda, atd. Vzhledem k jejich širokému zastoupení mají také velká rozměrová rozpětí. Mohou být velké od zlomků mikrometrů až po desítky mikrometrů. Aerosoly jsou v ovzduší v různých koncentracích, v důsledku toho působí různě na procházející laserový paprsek. Největší koncentrace aerosolů je ve výšce $1 - 2\text{ km}$ nad zemským povrchem. Překročíme-li tuto výšku, tak koncentrace bude exponenciálně klesat. S dalším nárůstem výšky ($10 - 20\text{ km}$) se objevují sulfáty a částice vyvržené sopečnou erupcí. Koncentrace vulkanických aerosolů je v čase konstantní, ale může se podstatným způsobem změnit v důsledku vulkanické činnosti a zůstat zvýšená až několik měsíců. S dalším zvyšováním nadmořské výšky (nad 30 km) se objevuje kosmický prach z komet a mikrometeorů. Aerosoly můžeme dělit do základních skupin podle toho, nad jakou oblastí se vyskytují, na mořské, venkovní, městské a pouštní [19].

Mořské aerosoly se vyskytují nad moři a oceány a jejich typickým složením jsou částičky soli a vodní kapky.

Venkovní aerosoly - tento typ aerosolů se vyskytuje běžně v přírodě mimo velká města zatížená průmyslem a dopravou. Skládají se ze sulfátů, organického materiálu, který pochází z místních rostlin. Velikost a množství aerosolů je závislé na roční době, povětrnostních podmínkách atd.

Městské aerosoly vznikají v hustě obydlených a průmyslem zatížených oblastech. Jejich hlavní složkou je jemný prach vznikající při spalování, husté dopravě atd.

Pouštní aerosoly jsou složené hlavně z jemného pouštního písku, koncentrace písku je závislá na povětrnostních podmínkách.

Index lomu aerosolů n_a je popsán reálnou a imaginární částí, [19]:

$$n_a = n_r - jn_i; [-]; \quad (16)$$

kde n_r je reálná část indexu lomu a jn_i je imaginární část indexu lomu.

Koeficient absorpce α_a je závislý na imaginární části indexu lomu, [19]:

$$\alpha_a = \frac{2\pi}{\lambda} n_i; [-]. \quad (17)$$

Rozptyl aerosolů je popsán teorií Mie, koeficient rozptylu aerosolů je závislý na koncentraci částic, velikosti aerosolů, vlnové délce světla. Pro praktické použití se používá vztah popisující koeficient rozptylu β_a , ve vodorovné dráze s konstantním rozložením aerosolů, [19]:

$$\beta_a = C_1 \lambda^{-\delta}; [-], \quad (18)$$

kde δ je atmosférická viditelnost a pohybuje se od 1 za špatné viditelnost po 1,6 za dobré viditelnosti. Konstanta C_1 se vztahuje k vizuálnímu dohledu, [19]:

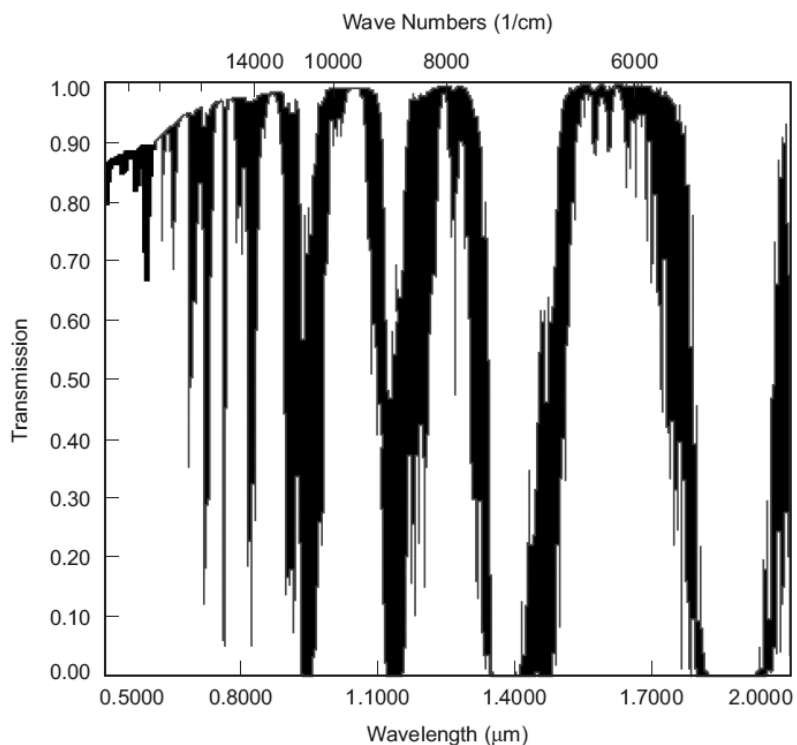
$$C_1 = \frac{3,91}{V} (0,55)^\delta; [-]; \quad (19)$$

kde V je vizuální dohled v kilometrech. Koeficient rozptylu β_a se dá také zapsat jako, [19]:

$$\beta_a = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-\delta}; [-]; \quad (20)$$

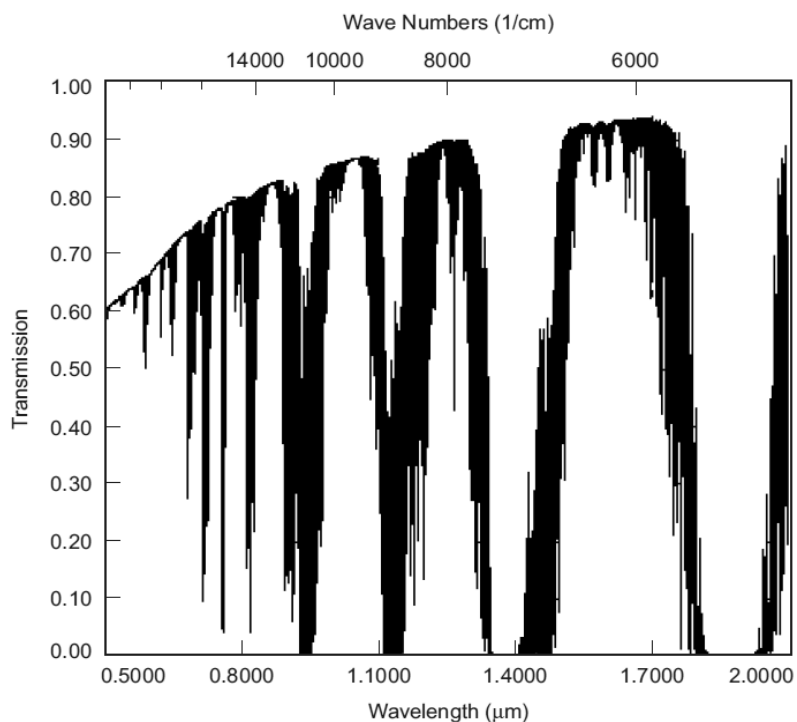
kde vlnová délka je uvedena v mikrometrech. Při silné koncentraci aerosolů je vizuální dohled přibližně 5 km a za jasné oblohy je dohled přibližně 23 km. Je dobré si povšimnout, že i když aerosoly mají řádově nižší koncentraci než je koncentrace atmosférických plynů, tak dominuje rozptyl aerosolů v oblasti optických komunikací (0,5 – 2 μm).

V následujících obrázcích budou rozebrány příklady měření útlumu v atmosféře laserového paprsku v rozmezí vlnových délek 0,5 – 2 μm.

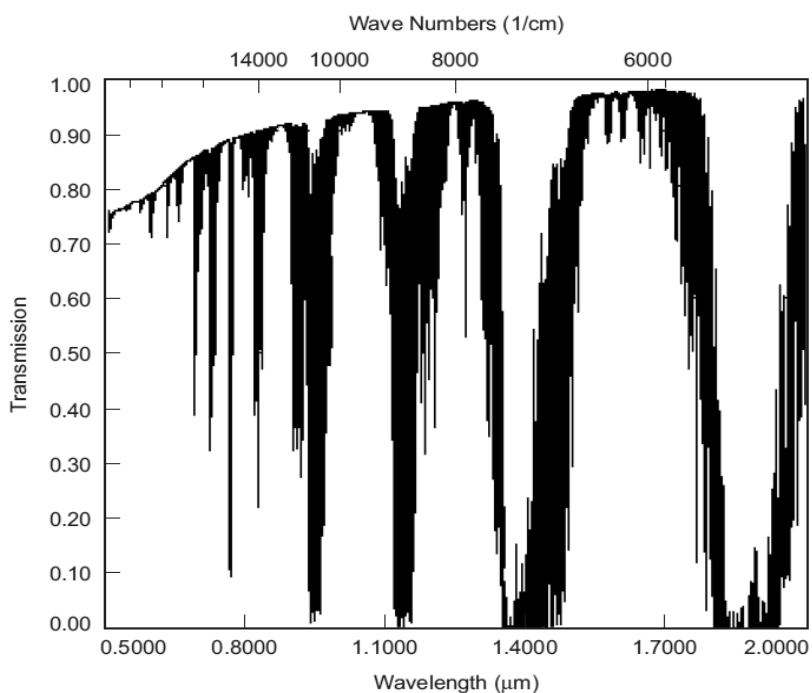


Obr. 15: Přenosové spektrum laserového paprsku nad hladinou moře bez přítomnosti aerosolů (převzato z [19]).

Na obrázku 15 je zobrazen přenos laserového paprsku v závislosti na jeho vlnové délce. Jsou z něj patrné dva velké poklesy přenosu, které jsou zapříčiněny rezonančním kmitočtem molekul v atmosféře. Jeden na $1,4 \mu m$ a druhý na $1,8 \mu m$, na tyto poklesy přenosu nemá koncentrace aerosolů vliv. Jinak se přenos pohybuje od 0,87 až téměř k 1. Na obrázku 16. je vidět znatelný vliv aerosolů, kdy je maximální přenos 0,9 na vlnové délce $1,7 \mu m$ a se zkracující se vlnovou délkou přenos klesá až na 0,6 pro vlnovou délku $0,5 \mu m$. Obrázek 17. znázorňuje přenosové spektrum laserového paprsku pro výšku $2 km$ nad zemským povrchem a můžeme zde pozorovat znatelně větší přenos, který je zapříčiněn úbytkem aerosolů v důsledku vyšší nadmořské výšky. V rozmezí vlnových délek od $1,55 \mu m$ do $1,7 \mu m$ se přenos téměř rovná přenosu v atmosféře bez aerosolů.



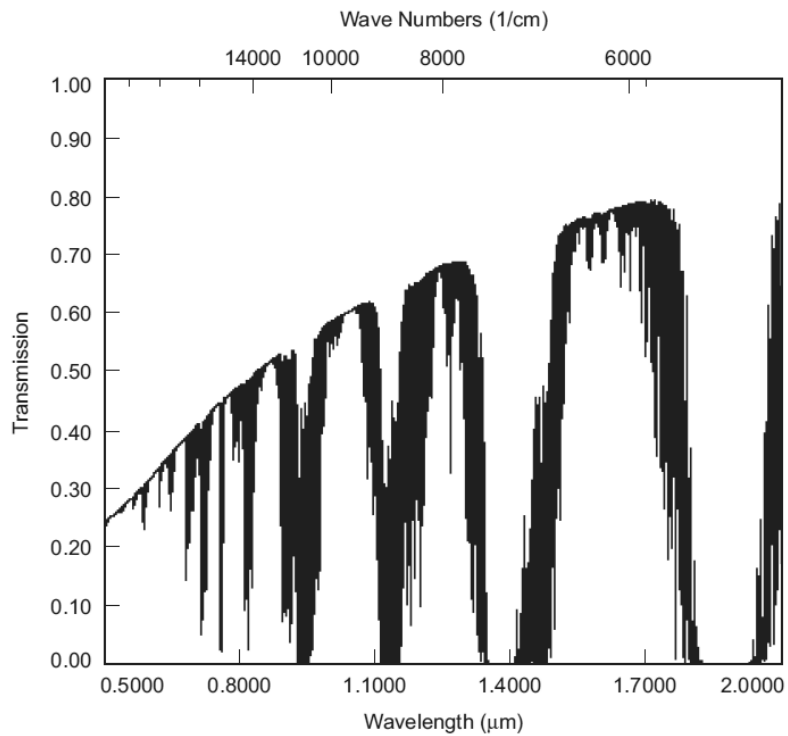
Obr. 16: Přenosové spektrum laserového paprsku nad hladinou moře pro vizuální dohled 23 *km* (převzato z [19]).



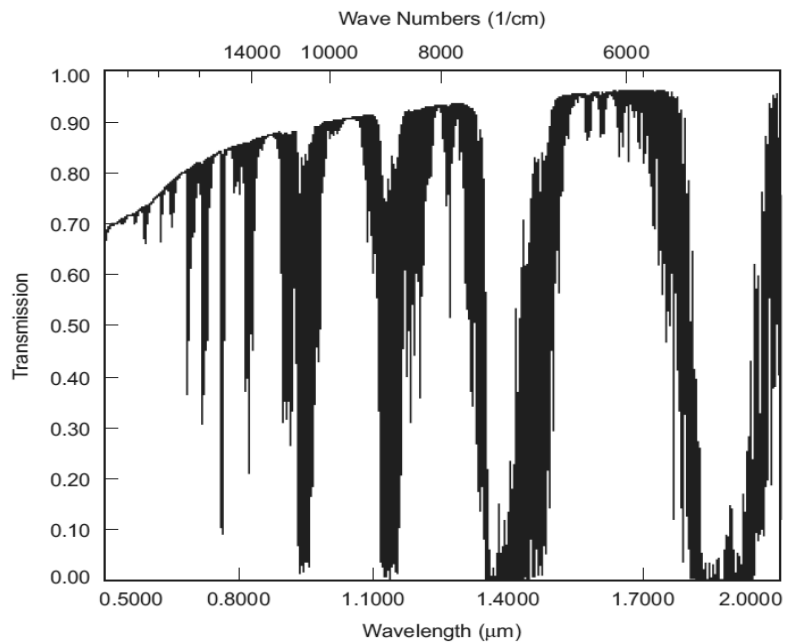
Obr. 17: Přenosové spektrum laserového paprsku pro výšku 2 *km* nad zemským povrchem a vizuální dohled 23 *km* (převzato z [19]).

Obrázek 18 zobrazuje přenosové spektrum pro vizuální dohled 5 *km*, je z něj patrné, že je přenos podstatně horší (až 0,25 pro vlnovou délku 0,5 μm) než v předchozích případech, a to z důvodu

mnohem vyšší koncentrace aerosolů v atmosféře. Z obrázku 19. je opět patrný razantní nárůst přenosu pro výšku nad zemským povrchem 2 km, kde koncentrace aerosolů není tak vysoká.



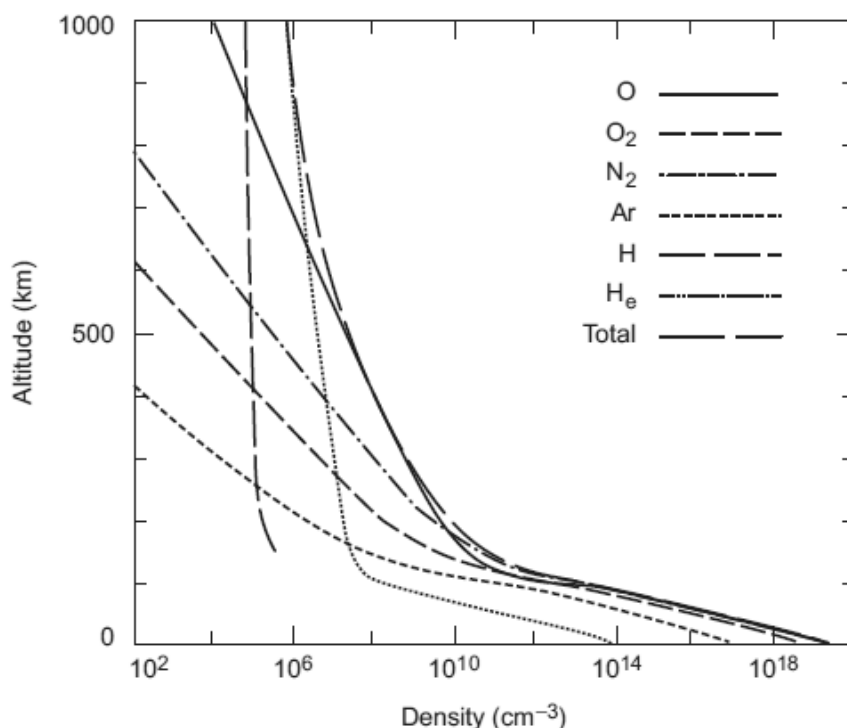
Obr. 18: Přenosové spektrum laserového paprsku nad hladinou moře pro vizuální dohled 5 km (převzato z [19])



Obr. 19: Přenosové spektrum laserového paprsku pro výšku 2 km nad zemským povrchem a vizuální dohled 5 km (převzato z [19]).

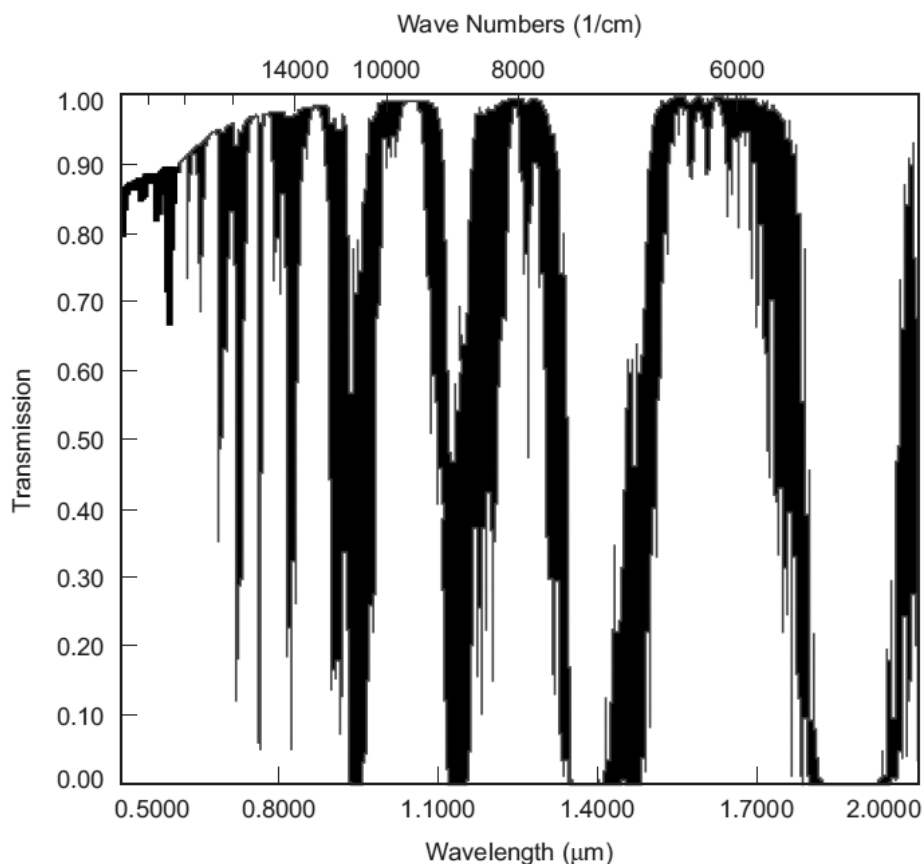
8.4 Molekulární absorpce

Zemská atmosféra je tvořena směsicí plynů, z nichž má největší zastoupení dusík přes 78 % a kyslík s téměř 21 %, další plyny jsou zastoupeny jen ve zlomcích procent. Přesné složení atmosféry uvádí tabulka 1. Složení atmosféry se mění s polohou na Zemi a samozřejmě také s nadmořskou výškou. Hustota vodních par je vyšší nad tropickými oblastmi než nad pouštěmi. Nad průmyslovými zónami a nad velkými městy je vyšší koncentrace oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, přízemního ozonu a hladina látek znečišťujících atmosféru je také zvýšená. Se vzrůstající nadmořskou výškou hustota atmosféry klesá, to má za následek méně atmosférických molekul, které mohou interagovat s laserovým paprskem. Tím je zmenšen negativní vliv na dráhu paprsku. Na obrázku 20 je znázorněna hustota atmosféry v závislosti na nadmořské výšce [19].



Obr. 20: Hustota zemské atmosféry v závislosti na nadmořské výšce (převzato z [19]).

Při průchodu laserového paprsku atmosférou dochází k interakci mezi fotony paprsku a molekulami atmosféry. Tato interakce má za následek změnu rotačních, vibračních a elektrických parametrů molekul atmosféry. Tyto energetické interakce jsou kvantovány a pro určité vlnové délky laserového paprsku dochází k rezonanci molekul atmosféry a úplnému pohlcení paprsku a zamezení jakékoliv komunikace na příslušné vlnové délce. Obrázek 21 zobrazuje vlnové délky (0,5 – 2 μ m), pro které má atmosféra maximální útlum a vlnové délky laserového paprsku, na které má atmosféra minimální vliv. Zakázaná pásma jsou pro vlnové délky 0.7, 0.8, 0.96, 1.1, 1.38, 1.9 μ m, tato výrazná pásma jsou spojena s vodními parami.



Obr. 21: Přenosové spektrum laserového paprsku nad hladinou moře (převzato z [19]).

8.5 Atmosférické turbulence

Atmosférické turbulence dělíme do tří skupin na dynamické, termické a mechanické turbulence. V této práci budou rozebírány pouze termické a mechanické turbulence. Dynamické turbulence vznikají vysoko v atmosféře (5 – 6 km), kde se naprostá většina laserových dálkoměrů nepoužívá.

Termická turbulence vzniká díky nestejnorodému ohřívání zemského povrchu, který následně ohřívá vzduch. Díky tomu, že teplejší vzduch má nižší hustotu, stoupá vzhůru a vzniká neuspořádaný vertikální pohyb vzduchové masy. Vznik termické masy ovlivňuje:

- vítr – bude-li foukat blízko povrchu země silný vítr, nebude stoupat vzhůru ucelená masa vzduchu, ale bude rozbitá na malé bublinky
- charakter terénu – je-li terén členitý a výrazně zbarvený, dochází k většímu prohřívání a stoupání vzduchových mas

Mechanická turbulence vzniká, když proudí vzduch přes terénní překážky, jako jsou hory, údolí, lesy, budovy, atd. Při této turbulenci dochází k posunu vzdušné masy, a tím k míchání různě teplého vzduchu. Pokud je terén méně členitý, tak jsou mechanické turbulence menší [19].

8.5.1 Změna index lomu

Index refrakce n v atmosféře je pro šíření světla důležitý a je velice citlivý na změnu teploty. Tyto změny teplot na rozhraních vzdušných mas v kombinaci s turbulentním prouděním způsobí refrakci atmosférického indexu. Index lomu n v atmosféře můžeme popsat pro optické a infračervené vlnové délky následovně, [19]:

$$n = 1 + 79 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T}; [-]; \quad (21)$$

kde je P tlak v milibarech, T je teplota v kelvinech.

8.5.2 Vliv turbulence

Na procházející laserový paprsek mají jednotlivé vzdušné masy s různými indexy lomu degradující vliv, způsobují fluktuaci směru šíření svazku a zkreslení vlnoplochy, tj. scintilace (mihotání).

Pokud je velikost vzdušné masy menší než poloměr laserového svazku, tak bude svazek odkloněn do různých směrů.

Pokud bude velikost vzdušné masy srovnatelná s poloměrem laserového svazku, tak se nezmění směr, ale mění se pouze úhlová divergence.

Pokud bude velikost vzdušné masy větší než poloměr laserového svazku, tak dochází k ohybu a náhodnému cestování svazku [19].

8.6 Šum v dálkoměru

Šumy můžeme rozdělit na vnitřní a vnější. Za vnitřní šumy považujeme světla dalších zdrojů a zdroj světla v dálkoměru přispívá vlastním šumem. Za vnější zdroje šumu považujeme ve dne přímé nebo odražené sluneční světlo, v noci svit měsíce hvězd a umělých zdrojů. Takovéto zdroje světla generují nežádoucí odezvy a můžeme je chápat jako šum.

Dalším zdrojem šumu jsou elektronické komponenty dálkoměru. Tyto zdroje jsou hlavně temný proud, termální šum, kvantový výstřelový šum atd. Toto jsou zdroje šumu vnitřní.

Další zdroje šumu jsou fotonový šum, šum fotoelektrického proudu, šum vnitřního zisku fotodiody a tepelný šum.

Pro porovnání výkonu šumu a přijatého signálu zavedeme pojem SNR (poměr signálu k šumu), [7]:

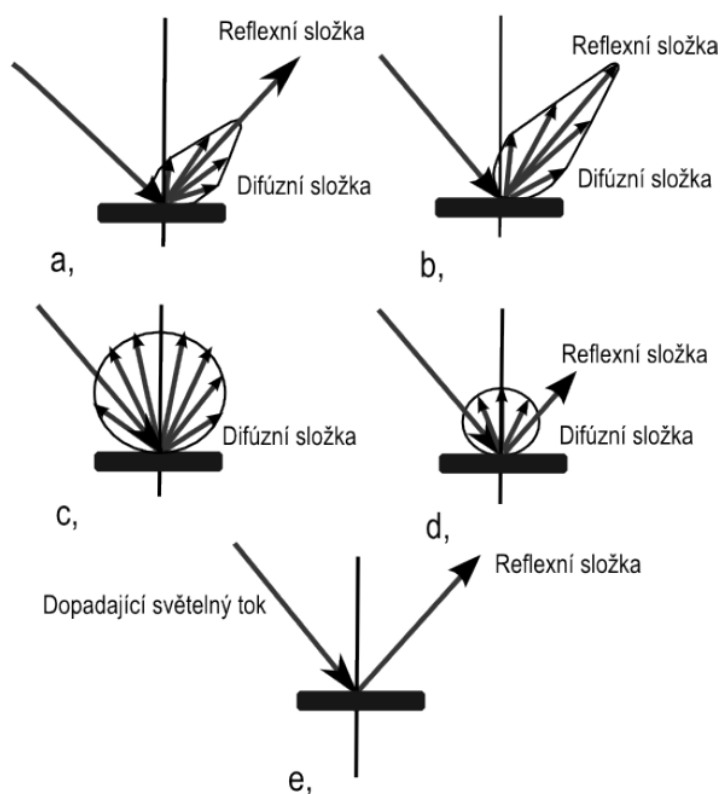
$$SNR = \frac{P_i}{p_n}, \quad (22)$$

kde P_i je střední výkon signálu a p_n je střední výkon šumu. V praxi se vyžaduje, aby SNR byl alespoň 10 dB, abychom dostali kvalitní výsledky měření.

K potlačení vnějších šumů používáme filtry s úzkým pásmem propustnosti a elektronické uzávěrky dovolující detekci pouze v určitém časovém okamžiku. Chceme-li potlačit vnitřní šумы, musíme dálkoměr teplotně stabilizovat [7].

9 POMĚRNÁ SMĚROVÁ ODRAZIVOST

Laserový paprsek, dopadající na měřený objekt, se chová podle fyzikálních zákonů. Vzhledem k cíli práce bude pozornost zaměřena na odraz a rozptyl světelného záření vybraným povrchem. Směrové odrazivé vlastnosti povrchů se dělí na tři typy, a to na difúzní, reflexní (zrcadlový) a smíšený. Různé varianty odrazů jsou znázorněny na obrázku 22.



Obr. 22: Různé typy odrazu a rozptylu na povrchu (převzato z [4]).

Odrazivost ρ se pohybuje v rozmezí $\epsilon < 0; 1 >$ a vypočítá se podle vzorce (23), [4]:

$$\rho = \frac{P_0}{P} ; [-], \quad (23)$$

kde P_0 je odražený optický výkon a P je optický výkon dopadající na odraznou plochu. Pro laserové dálkoměry je důležité znát charakter odrazu laserového záření od cíle. Zrcadlový odraz světla

(viz obr.22e) patří mezi nejjednodušší odrazy světla a vyznačuje se vysokou směrovostí. Dalším typem odrazu je rozptylový či difúzní odraz, při tomto odrazu se světlo rozptýlí do různých směrů (viz obr.22c,d). Dokonale rozptylující povrch, který má rozptylový odraz, se řídí Lambertovým zákonem (24), [4]:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot \cos(\alpha); [cd], \quad (24)$$

kde I_0 je zářivost ve směru normály na odraznou plochu. Z Lambertova zákona vyplývá, že zářivost povrchu zdroje klesá s kosinem úhlu měření α .

Jas plochy L_{jas} , rozptylující dopadající optického záření, vyjadřuje vztah (25), [4]:

$$L_{jas} = \frac{\rho \cdot E}{\pi}; [cd/m^2], \quad (25)$$

kde E je intenzita osvětlení povrchu. Na většině povrchů dochází k smíšenému odrazu. To je kombinace zrcadlového a rozptylového odrazu (viz obr.22a,b). Při smíšeném odrazu lze odraz rozdělit na činitel zrcadlového odrazu a činitel rozptylového odrazu. Povrch, u kterého dochází ke smíšenému odrazu, nazýváme polomatný.

Rovnoměrný difuzér s jednotkovou odrazivostí je těleso, které mění rozložení optického záření převážně rozptylem a má jas ve všech směrech stejnou v jakémkoliv směru dopadu světelného paprsku s hodnotou činitele rozptylu ρ rovnu jedné. Pro zavedení poměrné směrové odrazivosti PSO budeme předpokládat, že světelný paprsek dopadá na rovinnou odraznou plochu se smíšenou charakteristikou. Tato ozářená odrazná plocha má směrové reflexní a difúzní účinky, ty lze popsat poměrnou směrovou odrazivostí povrchů PSO. PSO je definována jako zář reálného povrchu, dělená zář povrchu s ideálními difúzními vlastnostmi a jednotkovou odrazivostí za předpokladu, že jsou obě plochy ozářeny stejnou intenzitou optického záření. Za těchto podmínek můžeme PSO vyjádřit jako (26), [4]:

$$PSO = \frac{L_r}{L_l}; [-], \quad (26)$$

kde L_r je zář reálného povrchu a L_l je zář Lambertovy plochy s jednotkovou odrazivostí. Po dosazení (26) do (27) bude pro PSO platit vztah, [4]:

$$PSO = \frac{L_r \cdot \pi}{E}; [-], \quad (27)$$

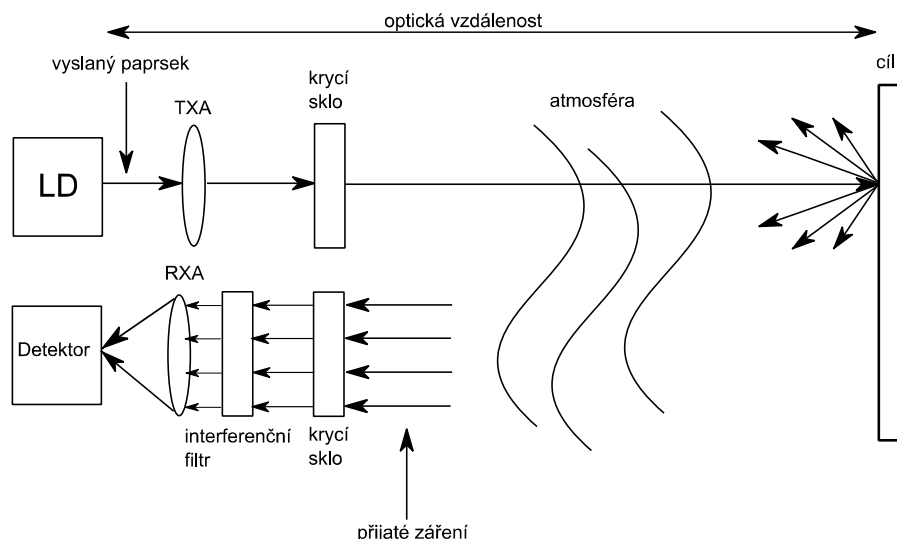
kde L_r je zář reálného povrchu a E je intenzita záření, dopadající na reálnou odraznou plochu. PSO slouží k vyjádření efektivní odrazné plochy v optické oblasti spektra. Efektivní odrazná plocha se vyjadřuje jako:[1]

$$\sigma = 4\rho_r A; [-], \quad (28)$$

kde A je velikost stopy laserového svazku na cíli a ρ_r je PSO cíle v místě jeho ozařování. Takto vyjádřená efektivní odrazná plocha platí jen pro kolmé ozařování dokonale difúzního povrchu a pro zanedbatelnou stopu laseru na povrchu cíle.

10 VÝKONOVÝ ÚROVŇOVÝ DIAGRAM

Výkonový úrovnový diagram je základním návrhovým nástrojem v oblasti optické komunikace a optické metrologie. V diagramu jsou zakresleny výkonové úrovně optického výkonu v nejdůležitějších částech optické cesty. Tuto optickou trasu znázorňuje obrázek 23.



Obr. 23: Obecná cesta světelného paprsku laserového dálkoměru

(TXA – vysílací apertura, RXA – přijímací apertura)

Všechny hodnoty ve výkonovém úrovnovém digramu jsou uvedeny v decibelové míře. Diagram vychází z rovnice (29), vyjadřující energetickou bilanci spoje, [4]:

$$P_p = P_{LD} - L_c + G_c; [dBm], \quad (29)$$

kde P_p je hodnota přijatého výkonu na fotodiodě, P_{LD} je vysílací výkon laserové diody, L_c jsou všechny útlumy přenosové trasy a G_c jsou všechny zisky přenosové trasy. Pro správnou činnost celého systému je nutné, aby přijímaný výkon na fotodiodě P_p byl větší než citlivost optického přijímače a menší než úroveň saturace.

Výchozím bodem výkonového úrovnového digramu je vysílací výkon P_{LD} [dBm]. Velikost vysílaného výkonu je třeba vhodně zvolit, aby nepřekročila bezpečnou hodnotu infračerveného záření z hlediska bezpečnosti očí. Zároveň musí být vysílací výkon dostatečně velký, aby přijatý výkon po průchodu atmosférou a odrazu na měřeném cíli byl větší, než je citlivost přijímače. V laserových dálkoměrech lze použít kolimovaný nebo nekolimovaný svazek. Kolimovaný svazek má optickou intenzitu soustředěnou v blízkosti optické osy a na základě energetické bilance lze volit menší vysílací výkon než u svazku nekolimovaného, který vytváří stopu s větším obsahem a má větší diverzitu.

Přijímaný výkon na fotodiodě P_p musí být větší než citlivost přijímače P_o . Rozdíl přijatého výkonu na fotodiodě P_p a citlivosti přijímače P_o je systémová rezerva ρ_{rez} podle rovnice (30), [4]:

$$\rho_{rez} = P_p - P_o; [dBm], \quad (30)$$

Citlivost přijímače P_o se vyjadřuje jako poměr mezi maximální úrovní šumu a minimální možnou úrovní signálu, kdy je přijímač ještě schopen detekovat signál odražený od měřeného cíle.

Saturační výkon P_s je hodnota maximálního možného výkonu, při které přijímač je schopen rozeznat změnu informace namodulovanou na optický signál. Dynamiku přijímacího systému Δ definujeme jako rozdíl saturačního výkonu P_s a hodnoty minimálního výkonu P_o podle vzorce (31), [4]:

$$\Delta = P_s - P_o; [dB], \quad (31)$$

Důležitou částí výkonového úrovnového diagramu, jsou útlumy, které vznikají při průchodu laserového paprsku v rámci systému L_{SYS} , tedy nejsou závislé na vzdálenosti cíle. Pro systémové ztráty L_{SYS} platí:

$$L_{SYS} = L_T + L_R; [dB], \quad (32)$$

kde L_T jsou ztráty na vysílací části laserového dálkoměru a L_R jsou ztráty na přijímací části laserového dálkoměru.

Pro L_T můžeme psát:

$$L_T = L_{LD/TXA} + L_{TXA} + L_W; [dB], \quad (33)$$

kde $L_{LD/TXA}$ je útlum vazby LD a vysílací apertura, L_{TXA} je útlum vysílací apertury, L_W je útlum krycího skla dálkoměru.

Pro L_R můžeme psát:

$$L_R = L_{RXA/PD} + L_{IF} + L_{RXA} + L_W; [dB], \quad (34)$$

kde $L_{RXA/PD}$ je útlum vazby přijímací apertury a fotodiody pro $L_{RXA/PD}$ rovno 0 dB musí být splněno, že velikost aktivní plochy fotodiody musí být větší než velikost stopy přijatého záření na fotodiodě. L_{IF} je útlum interferenčního filtru, L_{RXA} je útlum na přijímací optické apertuře, L_W je útlum krycího skla.

Významným útlumem na cestě optického svazku je útlum šířením L_S , tento útlum závisí na vzdálenosti optické trasy a parametrech přijímací optické soustavy, [4]:

$$L_S = \left| 20 \cdot \log \frac{L_{12}}{D_{RXA}} \right|; [dB], \quad (35)$$

kde D_{RXA} je průměr přijímací optické soustavy, L_{12} je vzdálenost optické trasy.

Dalším významným útlumem na cestě paprsku k cíli a od něj je útlum atmosféry L_{ATM1} a L_{ATM2} . Tyto útlumy lze vyjádřit jako součet útlumu aerosoly L_A a útlumu turbulencí L_T . Tyto útlumy jsou voleny ze statistického modelu pro L_A z tabulky 2. [5] a pro L_T je zvolen 2 [dB/km] z [8]:

$$L_{ATM1} = L_{ATM2} = L_A + L_T; [dB], \quad (36)$$

V této práci bude útlum atmosféry popsán statistickým modelem, který vychází z přímé viditelnosti a je vyjádřen v následující tabulce[2].

popis	přímá viditelnost [km]	$\lambda=785\text{nm}$	$\lambda=1550\text{nm}$
		útlum [dB/km]	útlum [dB/km]
mlha	0,05	340	340
	0,2	85	85
	0,5	34	34
mlha/opar	1	14	10
opar	2	7	4
	4	3	2
čistá atmosféra	10	1	0,4
	23	0,5	0,2

Tab. 2: Útlum atmosféry v závislosti na přímé viditelnosti (převzato z [5]).

Za předpokladu, že cíl je mnohem větší než stopa paprsku laseru, má odrazivost 1 a jeho odrazivost je jen difúzní, můžeme pro zář L psát, [3]:

$$L = \frac{\phi_1}{A\Omega}; [W/m^2], \quad (37)$$

kde ϕ_1 je dopadající optický výkon na povrch cíle, A ozářená plocha cíle, Ω je prostorový příjmový úhel rozptýleného záření. Po odvození pro zář plochy L můžeme psát, [3]:

$$L = \rho \frac{E}{\pi}; [W/m^2], \quad (38)$$

kde ρ je odrazivost cíle, E je intenzita záření pro které můžeme psát, [3]:

$$E = \frac{\phi_1}{A}; [W/m^2], \quad (39)$$

Po dosazení rovnic (38) a (39) do (37) lze psát pro útlum na odrazné ploše cíle L_p v logaritmicke míře, [4]:

$$L_p = 10 \log(\rho); [dBm], \quad (40)$$

Do výkonového úrovnového diagramu musíme také zahrnout zisk na optické soustavě, [4]:

$$G_{RXA} = 20 \cdot \log\left[\frac{S_{POS}}{S_A}\right]; [dB], \quad (41)$$

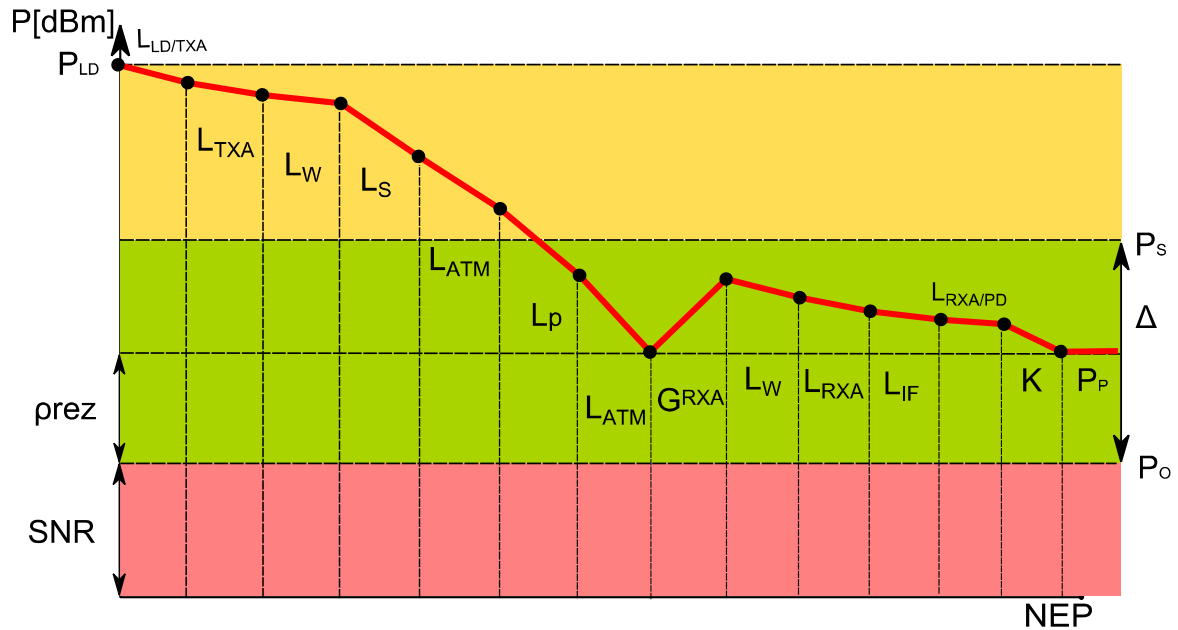
S_{pos} je obsah přijímací apertury, S_a je obsah aktivní plochy fotodiody.

Úplná výkonová bilanční rovnice se zdrojem optického záření LD je:

$$P_p = P_{LD} - L_T - L_S - L_{ATM1} - L_p - L_{ATM2} + G_{RXA} - L_R - K; [dBm], \quad (42)$$

kde P_p je přijímaný výkon na fotodiodě, P_{LD} je výkon laserové diody, L_T jsou ztráty vysílací části laserového dálkoměru, L_S je útlum šířením, L_{ATM1} a L_{ATM2} jsou útlumy atmosféry, L_p útlum na odrazné ploše cíle, G_{RXA} je zisk přijímací apertury, L_R jsou ztráty přijímací části laserového dálkoměru, K je konstanta velikosti 4.

Obrázek 24. znázorňuje obecný výkonový diagram pro optický laserový dálkoměr s využitím laserové diody jako zdroje záření.



Obr. 24: Obecný výkonový úroňový diagram optického laserového dálkoměru s použitím laserové diody.

($L_{LD/TXA}$ – útlum vazby LD vysílací apertura, L_{TXA} – útlum vysílací apertury, L_W – útlum krycího skla, L_S – útlum šířením, L_{ATM} – útlum atmosféry, L_p útlum na odrazné ploše cíle, G_{RXA} – zisk na přijímací apertuře, L_{RXA} – útlum na přijímací optické apertuře, L_{IF} – útlum interferenčního filtru, $L_{RXA/PD}$ – útlum vazby přijímací apertury a fotodiody, P_{LD} – výkon laserové diody, P_s – saturační výkon přijímače, K - konstanta, P_p – přijímaný výkon, P_o – citlivost přijímače, NEP – výkon ekvivalentního šumu, SNR – poměr signál/šum, ρ_{rez} – systémová rezerva, Δ – dynamika přijímače.)

Pokud jsou zvoleny parametry laserového dálkoměru špatně nebo je útlum atmosféry případně útlum cíle příliš velký, tak přijatý optický výkon bude pod hranicí citlivosti přijímače a nebude detekován. V opačném případě, že bude výkon dopadající na detektor příliš velký, dojde k saturaci přijímače a opět nebude možné správně detekovat přijatý optický výkon.

11 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

11.1 Měření směrových odrazivých vlastností materiálů

V experimentální části diplomové práce bylo úkolem proměřit směrové odrazivé vlastnosti vybraných povrchů. Pro popis směrových odrazivých vlastností povrchů byla zvolena poměrná směrová odrazivost (PSO) definovaná vztahem, [3]:

$$PSO(\alpha) = \pi \frac{L(\alpha)}{E_0(\alpha)} [-], \quad (43)$$

kde $L(\alpha)$ je zář rozptylující plochy, $E_0(\alpha)$ je intenzita záření rozptylující plochy a úhel měření α je úhel mezi normálou k měřenému povrchu a optickou osou přijímače (úhel pozorování). Pro měřicí účely je vhodné definici PSO upravit na vztah, [3]:

$$PSO(\alpha) = \frac{4P_p(\alpha)L_{12}^2}{P_L d_{FD}^2 \cos(\alpha)} [-], \quad (44)$$

kde P_p je přijímaný výkon (viz obr.25), L_{12} je vzdálenost aktivní plochy fotodiody od rozptylující plochy, P_L je výkon laserového vysílače a d_{FD} je průměr aktivní plochy fotodiody. Přijatý výkon P_p je daný vztahem, [3]:

$$P_p = \frac{U_{OP}}{S_u} [W], \quad (45)$$

kde S_u je napěťová citlivost a U_{OP} je napětí na výstupu optického přijímače.

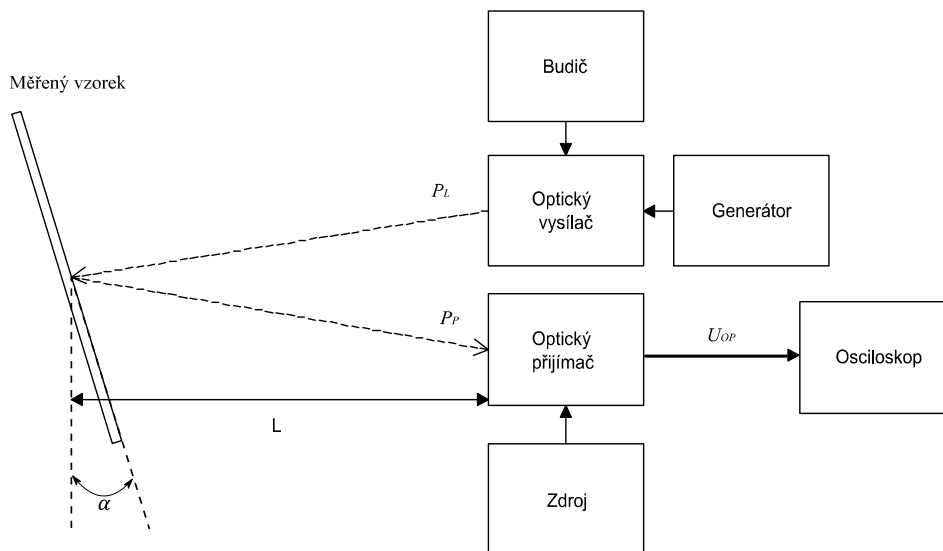
11.2 Postup při měření odrazivých vlastností materiálů

Cílem měření je určit PSO vybraných materiálů. Pro měřicí účely, byly vyrobeny vzorky z pozinkovaného plechu o rozměrech 100 x 100 mm, tyto vzorky byly nalakovány v práškové lakovně. Odstíny barev byly zvoleny z celosvětově uznávaného standardu pro stupnici barevných odstínů RAL. Zvolené odstíny barev byly dodány firmou INVER v podobě jemného prášku (dodavatel bohužel nspecifikuje zrnitost práškové barvy) a jsou uvedené v následující tabulce (tab.3). Dále byly vyrobeny 3 vzorky plastového materiálu, bílé (RAL 9016), šedé (RAL 7040) a černé barvy (RAL 9005) s rozměry 150x100 mm. Tyto plastové vzorky jsou vyrobeny z PVC lišty s matnou povrchovou úpravou. Jako poslední vzorek byla použita hliníková lišta s rozměry 150x100 mm, na které je použita povrchová úprava eloxování. Tato povrchová úprava výrazně zpomaluje proces povrchové oxidace hliníku.

barva	číslo RAL	úprava povrchu		vzorek
bílá	9016	lesklá	matná	ral9016
žlutá	1007	lesklá	matná	ral 1007
červená	3020	lesklá	matná	ral 3020
modrá	5015	lesklá	matná	ral 5015
zelená	6018	lesklá	matná	ral 6018
šedá	7040	lesklá	matná	ral 7040
černá	9005	lesklá	matná	ral 9005

Tab.3: Tabulka RAL barev použitých pro měření

Pro každou barvu byla vybrána úprava povrchu lesklá a matná. Pro povrchy opatřené vybranými barvami byla postupně určovaná PSO. Každý měřený vzorek byl osvětlen laserovým paprskem a následně byly měřeny veličiny U_{OP} a úhel α (úhel pozorování). Úhel α byl vzhledem k osové symetrii odrazivých vlastností povrchů měřen pouze v jedné rovině (rovina měření) dané normálou k povrchu a osou laserového svazku. Z naměřených hodnot byla podle vztahu (44) určena hodnota PSO v bodě osvětlení povrchu laserovým svazkem. Tento postup byl opakován pro všechny měřené vzorky.



Obr. 25: Blokové zapojení měřícího pracoviště pro měření odrazivých vlastností materiálů

Měřicí přístroje a pomůcky využitě při měření poměrné směrové odrazivosti:

- polovodičový laser Kapa ($P_L \approx 3 \text{ mW}$, $\lambda = 670 \text{ nm}$, $f_{\text{mod}} = 1,019 \text{ kHz}$, $U_{\text{mod}} = 0,5 \text{ V}_{\text{RMS}}$)
- stojany k upevnění optického vysílače, optického přijímače a měřených vzorků
- osciloskop Tektronix TDS 380 (přesnost měření $\pm 2\%$ na dílek)
- generátor Agilent 33220A (přesnost $\pm(20 \text{ ppm} + 3 \text{ pHz})$)
- DC zdroj AUL 310
- optický přijímač ($d_{\text{FD}} = 3 \text{ mm}$, napěťová citlivost $S_u = 4.54 \text{ MW}_{\text{RMS}} \cdot \text{W}^{-1}$ pro $\lambda = 670 \text{ nm}$)
- měřené vzorky

Podmínky měření:

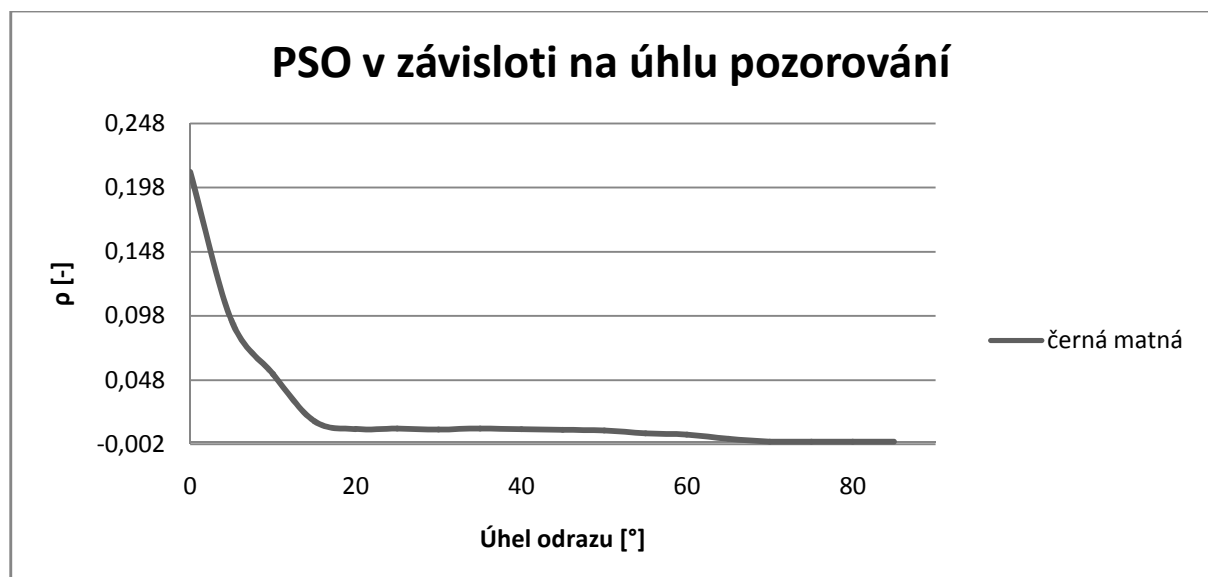
- teplota vzduchu $22 \text{ }^\circ\text{C}$
- atmosférický tlak 1024 hPa
- vlhkost vzduchu 60%

11.3 Výsledky měření poměrné směrové odrazivosti

Měřené hodnoty byly zpracovány formou tabulek a grafů. Jako ukázkové příklady byly zvoleny barvy: černá (RAL 9005), bílá (RAL 9016), šedá (RAL 7040), dále PVC lišty černá (RAL 9005), bílá (RAL 9016), šedá (RAL 7040) a vzorek eloxovaného hliníku. Zbývající grafy a tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze. Při zpracování výsledků měření bylo zjištěno, že barvy s lesklým povrchem jsou vysoce směrové. Měření bylo omezeno na rozsah úhlů 0° až 15°, pro zvýraznění detailu směrovosti materiálu.



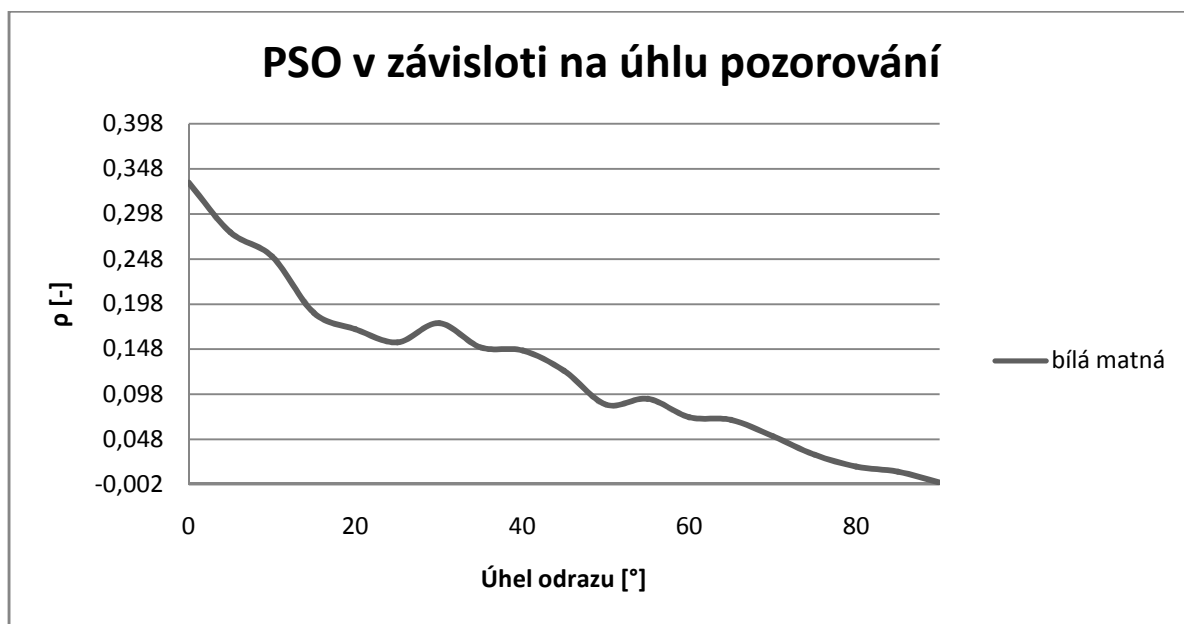
Obr. 26: Poměrná směrová odrazivost pro černou lesklou (RAL 9005)



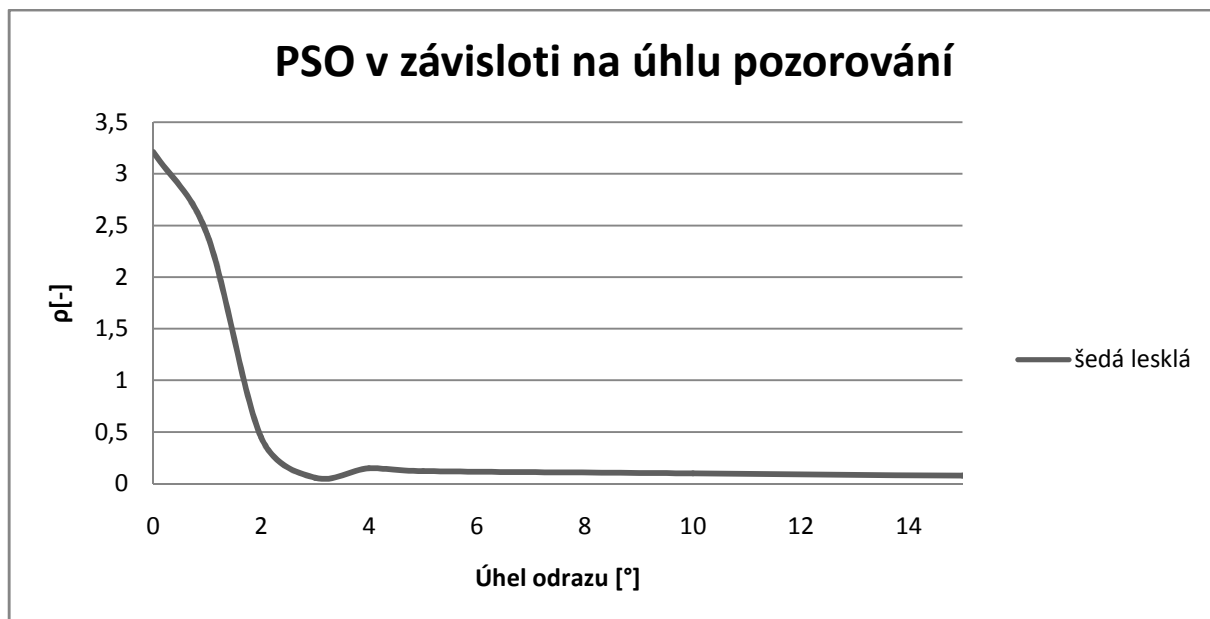
Obr. 27: Poměrná směrová odrazivost pro černou matnou (RAL 9005)



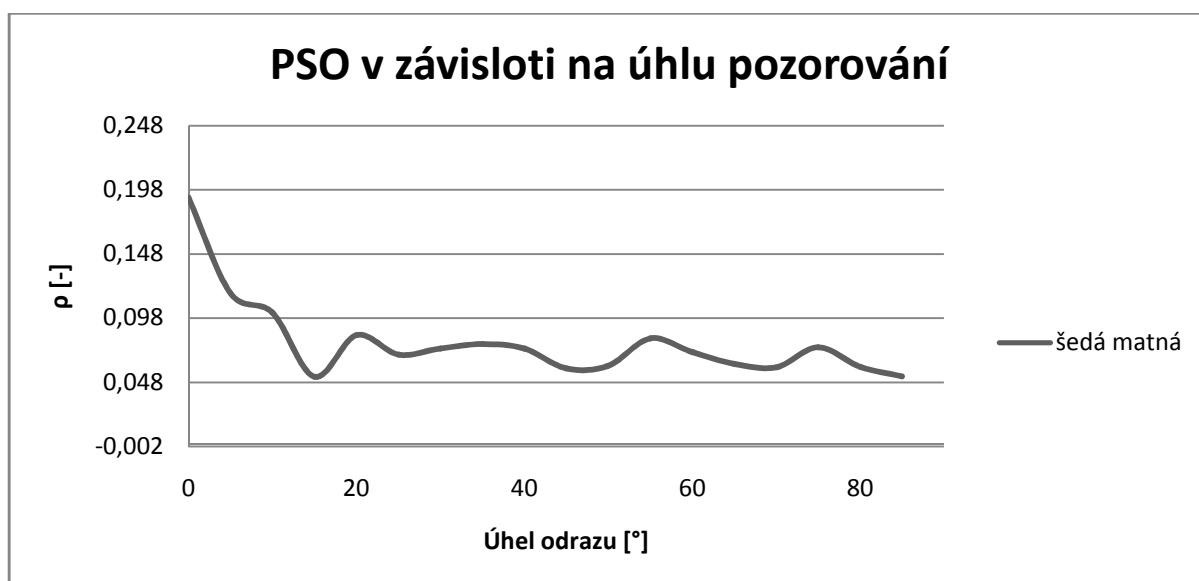
Obr. 28: Poměrná směrová odrazivost pro bílou lesklou (RAL 9016)



Obr. 29: Poměrná směrová odrazivost pro bílou matnou (RAL 9016)



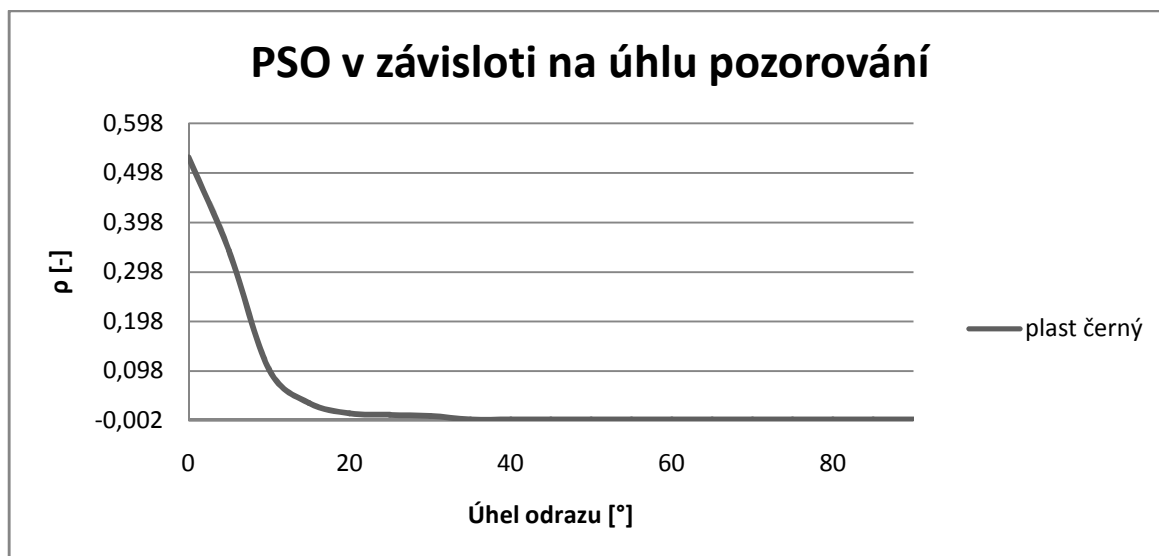
Obr. 30: Poměrná směrová odrazivost pro šedou lesklou (RAL 7040)



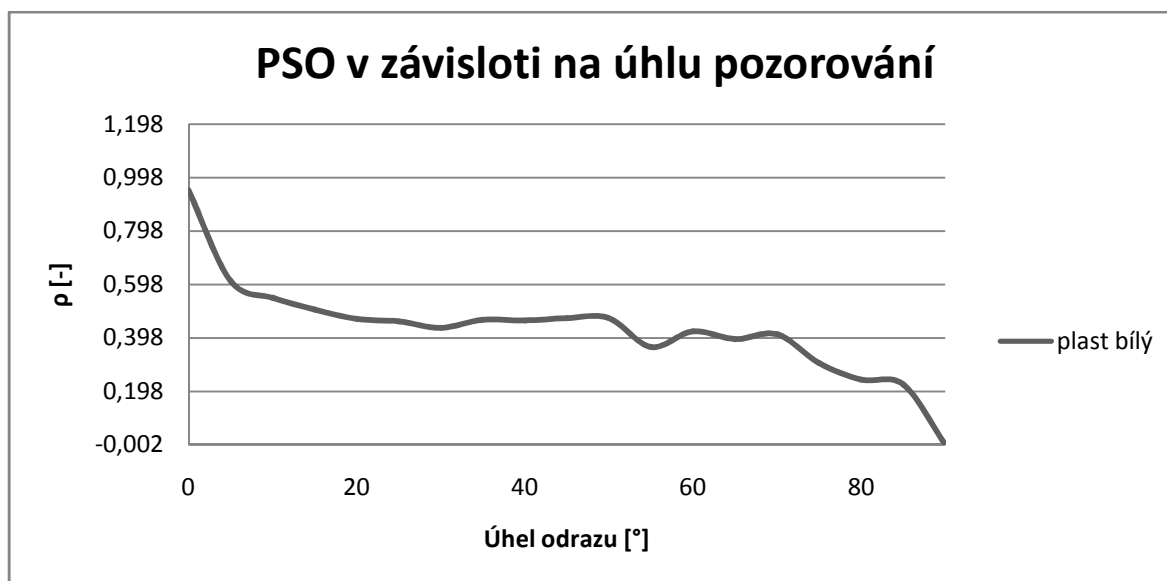
Obr. 31: Poměrná směrová odrazivost pro šedou matnou (RAL 7040)

Jak je patrné z grafů PSO nalakovaného pozinkovaného plechu, povrchy s lesklou úpravou mají charakteristiky poměrné směrové odrazivosti velice ostré, kde převládá reflexní složka odrazivosti nad difúzní složkou. Černá lesklá (RAL 9005) a bílá lesklá (RAL 9016) barva dosahuje poměrné směrové odrazivosti až k hodnotě 8 pro úhel pozorování 0°. Šedá lesklá (RAL 7040) má poměrnou směrovou odrazivost 3,2 pro úhel pozorování 0° a opět zde převládá reflexní složka odrazivosti nad difúzní. Charakteristiky poměrné směrové odrazivosti pro matné úpravy povrchů nejsou zdaleka tak ostré jako pro lesklé povrchy a dosahují o řád menších hodnot. To protože u matných povrchů převládá difúzní složka odrazivosti nad reflexní a laserový paprsek se rozptýluje do většího úhlu. Z charakteristiky poměrné směrové odrazivosti černé matné barvy (RAL 9005) je patrné, že již nepřevládá reflexní složka, jako je tomu u lesklé úpravy barvy, ale je zde stále patrná jistá směrovost odrazivosti.

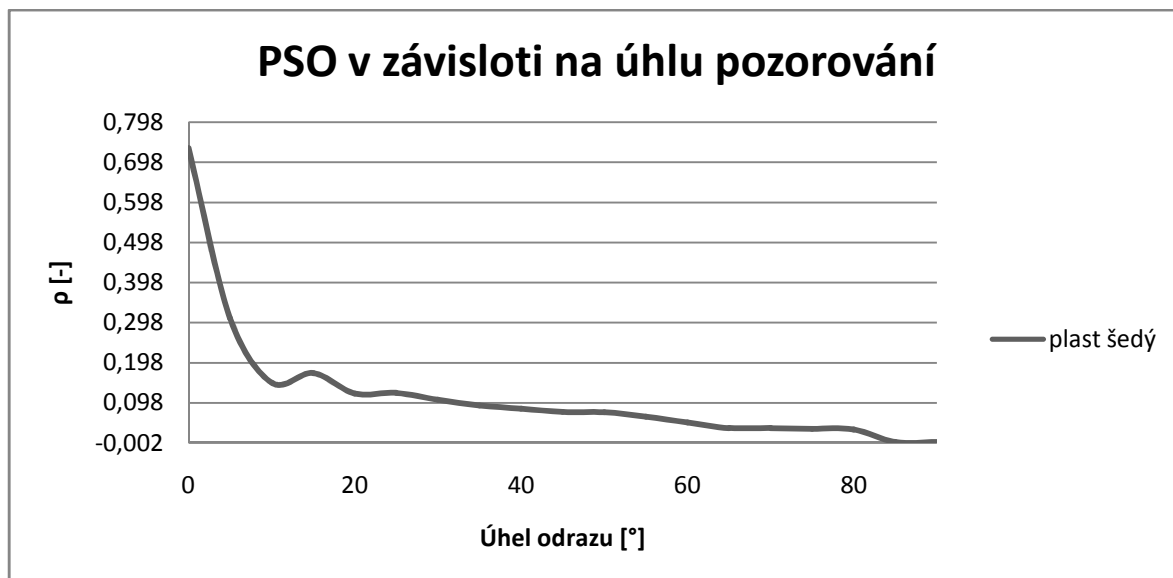
Z poměrné směrové odrazivosti bílé matné barvy (RAL 9016) je vidět jak odrazivost klesá téměř lineárně s úhlem pozorování paprsku k nule. U šedé matné barvy (RAL 7040) je charakteristika zvlněná to mohlo být způsobeno nehomogenitami ozářeného povrchu, na kterých docházelo k sekundárním odrazům a nežádoucí interferenci světla.



Obr. 32: Poměrná směrová odrazivost černého plastu (RAL 9005)

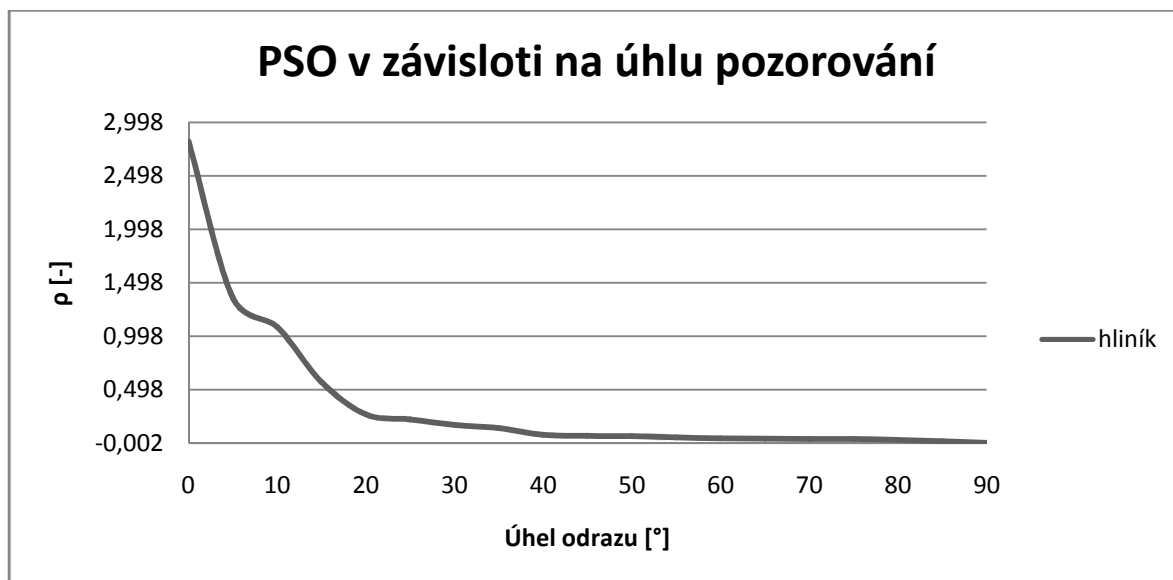


Obr. 33: Poměrná směrová odrazivost bílého plastu (RAL 9016)



Obr. 34: Poměrná směrová odrazivost šedého plastu (RAL 7040)

Z grafu PSO černého plastu (RAL 9005) je patrné, že nejvyšší hodnota PSO je 0,53 pro úhel pozorování 0°. U toho materiálu převládá reflexní složka odrazivosti nad difúzní. PSO pro bílý plast (RAL 9016) je v rozmezí úhlů pozorování 10° až 70° téměř vyrovnaná a vykazuje jen malé směrové vlastnosti. Z toho vyplývá že, převládá difúzní složka odrazivosti nad reflexní. PSO šedého plastu (RAL 7040) má maximum 0,73 pro úhel pozorování 0°. Charakteristika vykazuje opět směrové vlastnosti, kde převládá reflexní odrazivost nad difúzní.



Obr. 35: Poměrná směrová odrazivost eloxovaného hliníku

Charakteristika PSO eloxovaného hliníku má ostré maximum pro úhel pozorování 0° kde hodnota PSO dosahuje 2,82. Pro zvětšující se úhel pozorování hodnota PSO klesá až na hodnotu blízké nule pro úhel pozorování 40°.

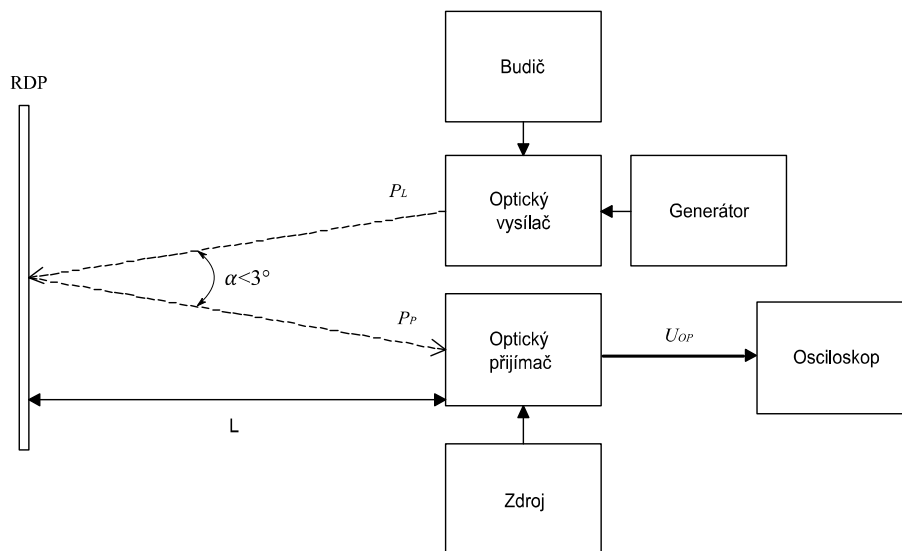
11.4 Ověření numerického modelu výkonové bilance laserového dálkoměru

V druhé experimentální části diplomové práce bylo úkolem ověření numerického modelu výkonové bilance laserového dálkoměru (viz kapitola 10). Tento model popisuje důležité body optického výkonu v nejdůležitějších částech optické trasy, jeho výsledkem je přijatý optický výkon na detektoru v závislosti na různých podmínkách přenosového prostředí (vzdálenosti měřeného objektu, útlumu atmosféry, odrazivosti cíle a výkonu laseru). Numerický model je sestaven pro typické systémové parametry (viz příloha č.1), při uvažování cíle s difúzní odrazivostí a pro stopu laserového parsku mnohem menší než je plocha cíle. Při uvažování atmosférického prostředí, které bylo v laboratorních podmínkách zanedbáno lze přijatý výkon P_P vypočítat podle vztahu (45). Přijatý výkon P_P v decibelové míře je daný vztahem,

$$P_P = 10 \cdot \log(P_P); [\text{dBm}], \quad (46)$$

11.5 Postup měření výkonové bilance laserového dálkoměru

Cílem měření bylo určit přijatý optický výkon P_P v závislosti na vzdálenosti měřeného objektu od zdroje laserového záření. Pro měřicí účely byl použit laser o vlnové délce 670 nm svítící na referenční difúzní plochu (RDP) s $\rho = 0,87$. Odražený světelný výkon byl zaznamenáván na optickém přijímači, který byl připojen k osciloskopu, na kterém bylo měřeno výstupní napětí detektoru U_{OP} . Z naměřených hodnot byla podle vztahu (45) a (46) určena hodnota P_P v bodě aktivní plochy přijímací fotodiody. Tento postup byl opakován pro vzdálenosti RDP od detektoru 0,2 m až 5 m s krokem 0,2 m.



Obr. 36: Blokové zapojení měřícího pracoviště pro měření výkonové bilance laserového dálkoměru

Měřicí přístroje a pomůcky využitě při měření optického výkonu:

- polovodičový laser Kapa ($P_L \approx 3 \text{ mW}$, $\lambda = 670 \text{ nm}$, $f_{\text{mod}} = 1,019 \text{ kHz}$, $U_{\text{mod}} = 0,5 \text{ V}_{\text{RMS}}$)
- stojany k upevnění optického vysílače, optického přijímače a měřených vzorků
- osciloskop Tektronix TDS 380 (přesnost měření $\pm 2\%$ na dílek)

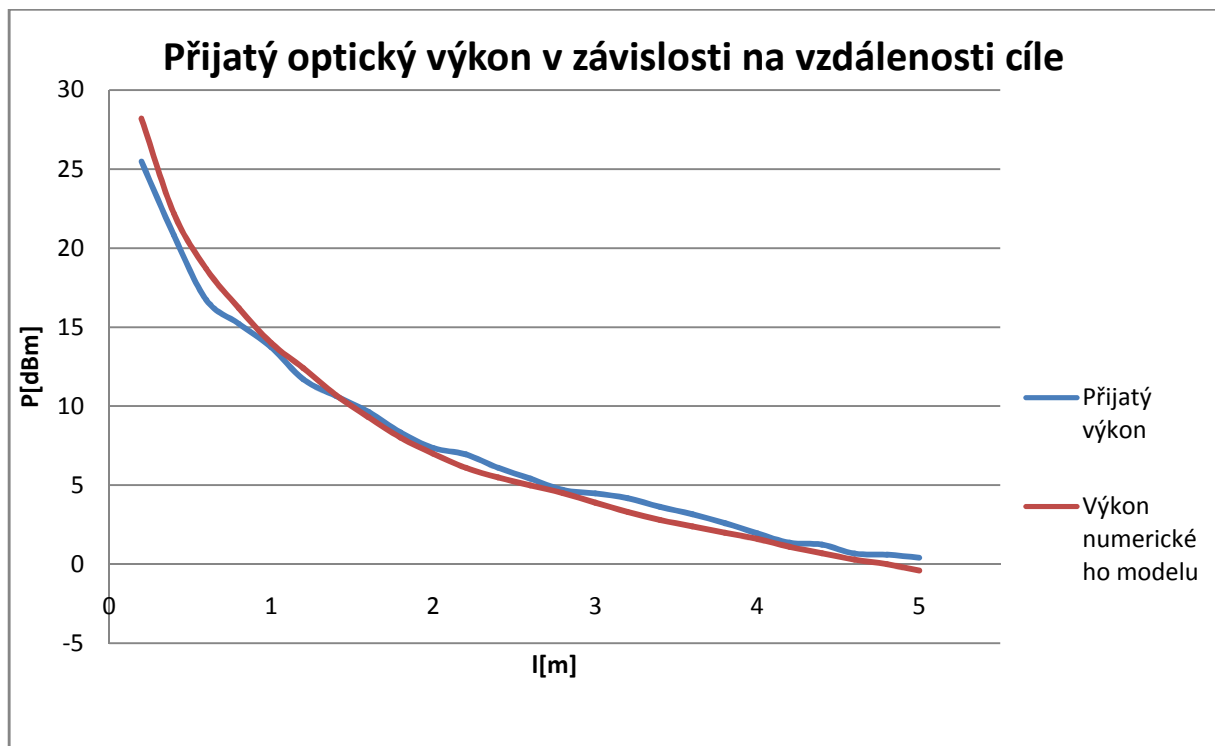
- generátor Agilent 33220A (přesnost $\pm(20 \text{ ppm} + 3 \text{ pHz})$)
- DC zdroj AUL 310
- optický přijímač ($d_{\text{FD}} = 3 \text{ mm}$, napěťová citlivost $S_u = 4.54 \text{ MW}_{\text{RMS}} \cdot \text{W}^{-1}$ pro $\lambda = 670 \text{ nm}$)
- referenční difúzní plocha (RDP) s $\rho = 0,87$ při $\lambda = 670 \text{ nm}$, a $\alpha = 0^\circ$
- měřené vzorky

Podmínky měření:

- teplota vzduchu $24 \text{ }^\circ\text{C}$
- atmosférický tlak 1026 hPa
- vlhkost vzduchu 65%

11.6 Výsledky měření výkonové bilance laserového dálkoměru

Měření bylo zpracováno formou tabulek a grafů. Z grafu závislosti přijatého optického výkonu na vzdálenosti cíle je patrné, že vypočtený výkon numerickým modelem odpovídal přijatému optickému výkonu při experimentálním měření.



Obr. 37: Srovnání přijatého a vypočítaného optického výkonu numerickým modelem

12 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá výkonovou bilancí laserových dálkoměrů. Pro pochopení tohoto rozsáhlého tématu, byly popsány nejdůležitější části laserových dálkoměrů. Hlavními součástmi laserových dálkoměrů jsou optické vysílače, vysílací a přijímací optická soustava, modulátory a demodulátory a další podpůrná elektronika, zajišťující správnou funkci dálkoměrů. Dále byla popsána metoda tranzitního času, která je nejčastěji používána v laserových dálkoměrech. Tato metoda umožňuje měření velkých vzdáleností.

Prochází-li laserový paprsek prostředím, toto prostředí má na něj vliv. Drtivá většina dálkoměrů je používána v zemské atmosféře, proto byly popsány jevy, které mají na laserový paprsek největší vliv. Jedná se zejména o vliv aerosolů a atmosférické turbulence na útlum přijímaného signálu. Odrazivé vlastnosti cíle jsou charakterizovány pomocí poměrné směrové odrazivosti, které byla věnována jedna celá kapitola. V této práci se předpokládá, že laserový paprsek dopadá na cíl vždy kolmo a stopa paprsku je mnohem menší než celková plocha cíle. Cíl má pouze difúzní složku odrazivosti. Za takovéto situace je efektivní odrazná plocha cíle daná součinem poměrné směrové odrazivosti ozařovaného místa cíle a velikosti ozařované plochy.

V první polovině experimentální části bylo úkolem proměřit směrové odrazivé vlastnosti vybraných povrchů. Pro tento experiment byly vyrobeny vzorky z pozinkovaného plechu nalakované na vybrané odstíny barev standardu RAL, dále byly vyrobeny vzorky z PVC a jeden vzorek eloxovaného hliníku. Experimentálně byla stanovena PSO, která byla vynesena do grafů. Z těchto grafů vyplývá, že barvy s lesklou úpravou povrchu mají PSO vysoce směrovou, kde převažuje reflexní složka odrazivosti nad difúzní. U černé lesklé barvy (RAL 9005) dosahuje PSO hodnoty 8. Poměrná směrová odrazivost pro barvy s matnou úpravou povrchu není tak vysoce směrová, ale z grafů je stále patrná jistá směrovost odrazivosti. PSO eloxovaného hliníku je směrová kde maximální hodnota PSO dosahuje téměř hodnoty 3 pro úhel pozorování 0° . Směrové vlastnosti PSO povrchů jsou použitelné při stanovení jejich efektivní odrazné plochy při jiném než kolmém ozařování.

V druhé polovině experimentální části bylo úkolem ověření modelu pro výkonovou bilanci laserového dálkoměru. Z grafu přijatého optického výkonu v závislosti na vzdálenosti cíle je patrné, že výkon vypočtený pomocí modelu je srovnatelný s přijatým výkonem při experimentálním měření.

13 LITERATURA

- [1] JELALIAN, A.V. Laser Radar Systems. London: Artech House, 1992.
- [2] JENN, D.C. Radar and Laser Cross Section Engineering. Blacksburg: AIAA, 2005.
- [3] WILFERT, O. Optoelektronika Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně, 2004
- [4] HRBÁČKOVÁ. P. Optický spoj pro vnitřní bezkabelovou síť, Diplomová práce, Brno FEKT VUT v Brně, 2010
- [5] LUIS MARTIN CANTERO, Range equation for laser radar, , Diplomová práce, Brno FEKT VUT v Brně, 2011
- [6] WILFERT O. Optické bezkabelové spoje, Habilitační práce, Brno FEKT VUT v Brně, 2004
- [7] HORÁK, R. Fyzikální základy laserových dálkoměrů a gyroskopů, Olomouc 2012, 143 s. ISBN 978-80-903958-6-2
- [8] WILFERT Otakar, DORDOVÁ Lucie, Calculation and Comparison of Turbulence Attenuation by Different Methods, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 6 s.
- [9] Abdulsalam Alkholidi and Khalil Altowij, Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western Asia, 2012, dostupné na WWW: http://cdn.intechopen.com/pdfs/30925/InTech-Effect_of_clear_atmospheric_turbulence_on_quality_of_free_space_optical_communications_in_western_asia.pdf
- [10] BLOOM S. THE PHYSICS OF FREE-SPACE OPTICS, 2005, dostupné na WWW: http://lightpointe.com/images/LightPointe_historical_Free_Space_Optics_info_Physics_of_Free-space_Optics.pdf
- [11] PŘIKRYL, P. Model atmosférického prostředí pro optické bezkabelové spoje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 68 s. Vedoucí semestrální práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc. Dostupné na WWW: [.https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66812](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66812)
- [12] Zemská atmosféra a její složení, dostupné na WWW: <http://www.fsps.muni.cz/inovace-SEBS-ASEBS/elearning/fyziologie/fyziologie-a-patofyziologie>
- [13] Stimulovaná emise, 23.10.2013, dostupné na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1_emise
- [14] LED diody, 3.12.2012, dostupné na WWW: <http://popular.fbmi.cvut.cz/elektrotechnika/Stranky/LED%20diody.aspx>
- [15] Kolimátory, 26.3.2013, dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kolim%C3%A1tor>

- [16] Rozdělovač paprsku, 4.9.2013, dostupné na WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Beam_splitter
- [17] ŘEHOŘ, Z. Optické vlastnosti atmosféry, rekonstrukce optického signálu degradovaného průchodem atmosférou, Vysoké učení technické v Brně, 2010, dostupné na WWW: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1010.pdf
- [18] Atmosféra země, 29.7.2013, dostupné na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Atmosféra_Země
- [19] Abhijit Biswas and Sabino Piazzolla, The Atmospheric Channel, dostupné na WWW: http://descanso.jpl.nasa.gov/Monograph/series7/Descanso%207_chap03.pdf
- [20] Zemská atmosféra a její složení, dostupné na WWW: <http://www.euromarina.cz/pocasi/meteorologie/atmosfera.htm>
- [21] Metody pro měření podélné a transversální rychlosti, dostupné na WWW: http://www.elektrorevue.cz/clanky/03008/index.html#_4.1_Laserová_dopplerovská
- [22] SUEMATSU, Y. a A.R. ADAMS. Handbook of Semiconductor Lasers and Photonic Integrated Circuits. Springer, 1994. ISBN 978-0412547201
- [23] The Speed of Light is slowing down and Gives a Different Time of Creation of the Earth, dostupné na WWW: <http://www.intelligentdesigntheory.info/speed-light.html>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

C_n^2 – parametr indexu lomu

\vec{k} – vlnový vektor

ϕ_7^2 – úhlová šířka vysílacího paprsku

A – ozářená plocha cíle

B - šířka pásma

c – rychlost světla

c_0 – rychlost světla ve vakuu

C_1 – koeficient vztahující se k vizuálnímu dohledu

E – intenzita záření

\vec{E} – vektor elektrického pole

E_0 – amplituda elektrického pole

e – fotoelektron

f – kmitočet

f_f – ohnisková vzdálenost

f_r – opakovací kmitočet

GaAsP –gallium-arsenid-fosforid

GaP – gallium-fosforid

G_c – zisk přenosové trasy

$\overline{G_{PD}}$ - střední hodnota zisku

G_{PD} – vnitřní zisk fotodiody

G_{RXA} – zisk na přijímací apertuře

\vec{H} – vektor magnetického pole

H_0 – amplituda magnetického pole

I_0 – svítivost

L – zář odrazné plochy cíle

L – útlum na odrazné ploše cíle

L_{12} – vzdálenost optické trasy
 L_A – útlum aerosoly
 L_{ATM} – útlum atmosféry
 L_{ATM1} – útlum atmosféry od laserového dálkoměru k cíli
 L_{ATM2} – útlum atmosféry od cíle k detektoru
 L_c – útlum přenosové trasy
LED – light emitting diode
 L_{IF} – útlum interferenčního filtru
 L_l – zář Lambertovy plochy s jednotkovou odrazivostí
 $L_{LD/TXA}$ – útlum vazby LD vysílací apertura
 L_{max} – maximální vzdálenost
 L_r – zář reálného povrchu
 L_R – ztráty na přijímací části laserového dálkoměru
 L_{RXA} – útlum na přijímací optické apertuře
 $L_{RXA/PD}$ – útlum vazby přijímací apertury a fotodiody
 L_S – útlum šířením
 L_{SYS} – systémové ztráty
 L_T – útlum turbulencí
 L_T – ztráty na vysílací části laserového dálkoměru
 L_{TXA} – útlum vysílací apertury
 L_{vzd} – vzdálenost
 L_W – útlum krycího skla
 n – index lomu
NA – numerická apertura
 n_a – index lomu aerosolů
NEP – výkon ekvivalentního šumu
 n_r – reálná část indexu lomu
 P – tlak
 P_{LD} – výkon laserové diody

P_o – citlivost přijímače

P_p – přijímaný výkon

P_s – saturační výkon přijímače

PSO – poměrná směrová odrazivost

S_a – obsah aktivní plochy fotodiody

R - zatěžovací odpor

SNR – poměr signál/šum

S_p – hodnota prahového signálu

S_{pos} – obsah přijímací apertury

T – čas

T – teplota

T_m – modulační perioda

TNR – práh diskriminátoru pro falešné poplachy

TOF – metoda spočívající v měření časového zpoždění doby letu paprsku

T_r – čas měřících impulzů

U – napětí

V – vizuální dohled

α_a – koeficient absorpce

β_a – koeficient rozptylu

δ – atmosférická viditelnost

Δ – dynamika přijímače

Δt – rozdíl času

λ – vlnová délka

μm – mikrometr

ρ_{rez} – systémová rezerva

τ – délka pulzu

Φ – světelný tok dopadající na odraznou plochu

Φ_0 – odražený světelný tok

Φ_I – dopadající optický výkon

Ω – úhel odrazu paprsku

ω – úhlová frekvence

ρ – odrazivost

μ_0 – permeabilita vakua

ε_0 – permitivita vakua

ε_r – relativní permitivita prostředí

SEZNAM PŘÍLOH

<u>Příloha 1: Energetická bilance laserového dálkoměru pro vzdálenost k cíli 5 m</u>	64
<u>Příloha 2: Útlumový diagram laserového dálkoměru</u>	67
<u>Příloha 3: Program pro výpočet členů energetické bilance laserového dálkoměru</u>	68
<u>Příloha 4: Poměrné směrové odrazivosti pro žlutou barvu RAL 1007</u>	70
<u>Příloha 5: Poměrné směrové odrazivosti pro modrou barvu RAL 5015</u>	71
<u>Příloha 6: Poměrné směrové odrazivosti pro červenou barvu RAL 3020</u>	72
<u>Příloha 7: Poměrné směrové odrazivosti pro zelenou barvu RAL 6018</u>	73
<u>Příloha 8: Tabulky vypočtených hodnot PSO</u>	74
<u>Příloha 9: Tabulky vypočtených a změřených hodnot optického výkonu</u>	76
<u>Příloha 10: Obrázky měřených vzorků PSO</u>	77

Příloha 1: Energetická bilance laserového dálkoměru pro vzdálenost k cíli 5 m

$P_{LD} = 3 [mW]$	výkon LD
$P_{LDDb} = 10 \cdot \log_{10}(P_{ld}) [dBm]$	výkon LD [20]
$P_{LDDb} = 4,77 [dBm]$	
$\lambda = 670 \cdot 10^{-9} [m]$	vlnová délka laserového záření
$L_{LDTXA} = 1.5 [dB]$	útlum vazby LD a vysílací apertury [6]
$L_{TXA} = 1 [dB]$	útlum vysílací apertury [6]
$L_W = 1.5 [dB]$	útlum krycího skla [6]
$L_{RXA} = 1 [dB]$	útlum přijímací apertury [6]
$L_{IF} = 1 [dB]$	útlum interferenčního filtru [6]
$L_{RXAPD} = 0 [dB]$	útlum vazby přijímací apertury fotodiody [6]
$L_{VZD} = 5 [m]$	vzdálenost optické trasy
$\Phi = 9 [mrad]$	úhlová šířka energetického ekvivalentního svazku
$L_A = 10 [db/km]$	koeficient útlumu aerosoly [5]
$L_A = L_A \frac{L_{VZD}}{1000} [db/km]$	koeficient útlumu aerosoly
$L_T = 2 [db/km]$	koeficient útlumu turbulence [8]
$L_T = L_T \frac{L_{VZD}}{1000} [db/km]$	koeficient útlumu turbulence
$L_{ATM1} = L_A + L_T [dB]$	celkový útlum atmosféry k cíli
$L_{ATM2} = L_A + L_T [dB]$	celkový útlum atmosféry k detektoru
$D_{TXA} = 60 [mm]$	efektivní průměr vysílací apertury [4]
$D_{RXA} = 60 [mm]$	efektivní průměr přijímací apertury [4]
$L_S = \left 20 \cdot \log \frac{L_{12}}{D_{RXA}} \right [dB]$ $L_S = 41,13$	útlum šířením [4]
$\phi_1 = 0,33 [dB]$	dopadající optický výkon

$A = 1 \text{ [mm}^2\text{]}$		ozářená plocha cíle (zvoleno)
$\Omega = \cos(0) \text{ [-]}$		úhel odrazu paprsku
$\rho = 0,87$		odrazivost cíle (zvoleno)
$L = \frac{\phi_2}{A\Omega} \text{ [W/m}^2\text{]}$	$L = 0,33$	zář plochy přijímací apertury [3]
$\phi_2 = \sigma_2 A \Omega \text{ [W]}$	$\phi_2 = 0,33$	dopadající optický výkon [3]
$\Phi_{1dB} = P_{LDDDB} - (L_{TDTXA} + L_{TXA} + L_W) \text{ [dB]}$ $\Phi_{1dB} = 0,77 \text{ [dB]}$		vyslaný výkon minus vliv systému
$\phi_1 = 10^{\frac{\Phi_{1dB}}{10}} \text{ [W]}$	$\phi_1 = 1,2$	
$E = \frac{\phi_1}{A} \text{ [W/m}^2\text{]}$	$E = 1,19$	intenzita záření [3]
$S_{POS} = \pi \cdot \left(\frac{D_{RXA}}{2}\right)^2 \text{ [m}^2\text{]}$	$S_{POS} = 2,8 \cdot 10^{-3}$	obsah přijímací apertury
$S_A = 5.2441 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$		obsah aktivní plochy fotodiody
$G_{RXA} = 20 \cdot \log\left(\frac{S_{POS}}{S_A}\right) \text{ [dB]}$	$G_{RXA} = 52,38$	zisk na přijímací optické soustavě [4]

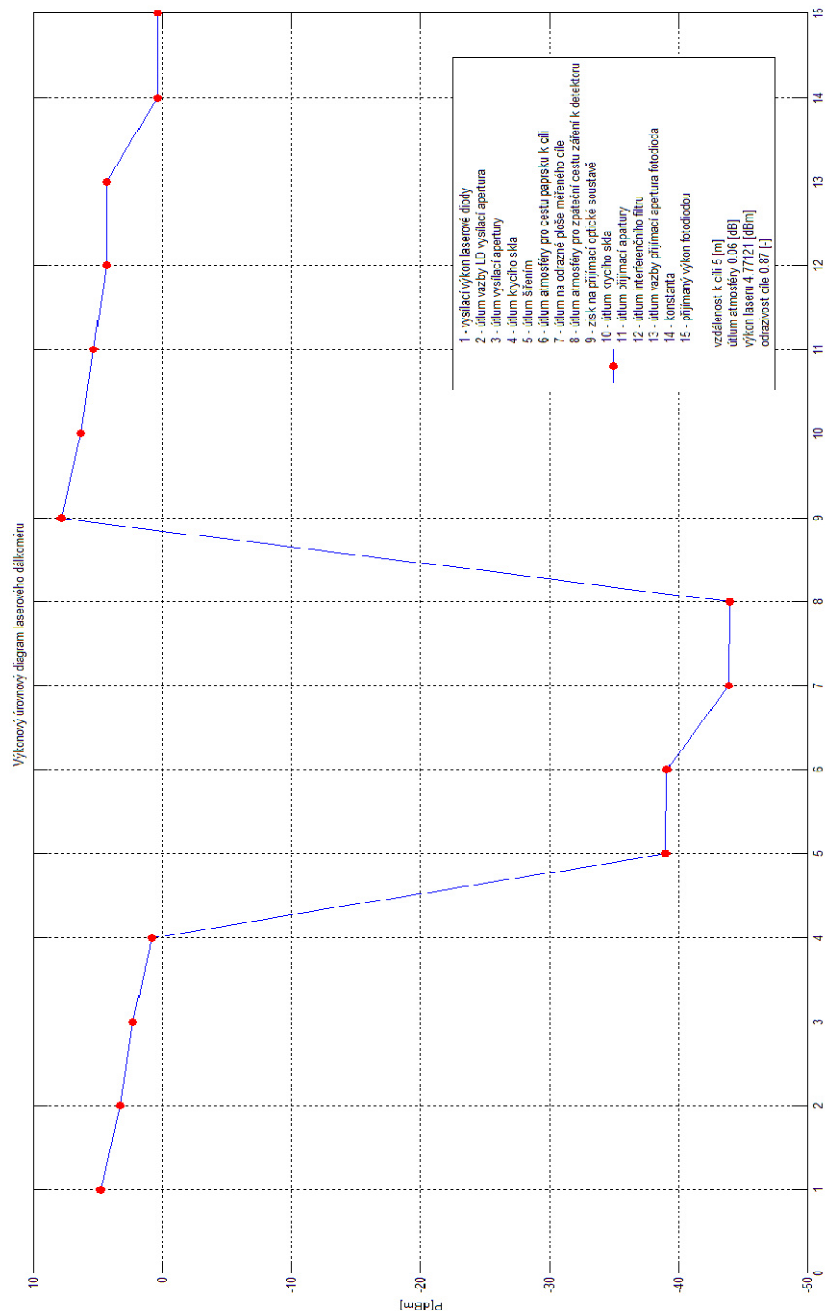
Výpočet jednotlivých útlumů

$P_{a1} = P_{lddB}$	výkon LD
$P_{a2} = P_{a1} - L_{LDTXA} $	útlum vazby LD vysílací apertura
$P_{a3} = P_{a2} - L_{TXA} $	útlum vysílací apertury
$P_{a4} = P_{a3} - L_W $	útlum krycího skla
$P_{a5} = P_{a4} - L_S $	útlum šířením
$P_{a6} = P_{a5} - L_{ATM1} $	útlum atmosféry pro cestu paprsku k cíli
$P_{a7} = P_{a6} - L $	útlum na odrazné ploše měřeného cíle
$P_{a8} = P_{a7} - L_{ATM} $	útlum atmosféry pro zpáteční cestu záření k detektoru
$P_{a9} = P_{a8} + G_{RXA} $	zisk na přijímací optické soustavě
$P_{a10} = P_{a9} - L_W $	útlum krycího skla
$P_{a11} = P_{a10} - L_{RXA} $	útlum přijímací apertury
$P_{a12} = P_{a11} - L_{IF} $	útlum interferenčního filtru
$P_{a13} = P_{a12} - L_{RXAOD} $	útlum vazby přijímací apertura fotodiody
$P_{a14} = P_{a13} - 4$	odečtení konstanty
$P_{a15} = P_{a14}$	přijatý výkon

jednotlivé výkony	[dBm]
Pa1	4,77
Pa2	3,27
Pa3	2,27
Pa4	0,77
Pa5	-40,35
Pa6	-40,43
Pa7	-45,23
Pa8	-45,31
Pa9	7,07
Pa10	5,57
Pa11	4,57
Pa12	3,57
Pa13	3,57
Pa14	3,57
Pa15	-0,4

Tab.4: Jednotlivé útlumy laserového dálkoměru

Příloha 2: Útlumový diagram laserového dálkoměru



Příloha 3: Program pro výpočet členů energetické bilance laserového dálkoměru

```
close all
clear all

%----- Výkonový úrovnový diagram -----
% Pp = Pld-Lsys-Ls-Latm1-ro-Latm2-Gvp

% Pp - přijímaný výkon
% Pld - vysílací výkon laserové diody
% Lsys - utlum systémových prvků dálkoměru
% Ls - útlum šířením
% Latm1 - útlum atmosféry ve směru od dálkoměru k cíli
% ro - poměrná směrová odrazivost (PSO)
% Latm2 - útlum atmosféry ve směru od cíle k dálkoměru
% Gvp - zisk na přijímací optické soustavě

%-----vysílací výkon laseru-----
Pld = 3; %výkon vysílací diody [mW]
PlddB = 10*log10(Pld); %výkon vysílací diody v [dBm]
%-----

%-----útlum systému-----
Lldtxa = 1.5; %útlum vazby LD vysílací apertura [dB]
Ltxa = 1; %útlum vysílací apertury [dB]
Lw = 1.5; %útlum kracího skla [dB]
Lrxa = 1; %útlum přijímací apertury [dB]
Lif = 1; %útlum interferenčního filtru [dB]
Lrxapd = 0; %útlum vazby přijímací apertura fotodiody [dB]
Lsys = Lldtxa + Ltxa + 2*Lw + Lrxa + Lif + Lrxapd;
%-----

%-----útlum atmosféry-----
Lvzd = 5; %vzdálenost optické trasy k cíli [m] -----
lambda = 670e-9; %vlnová délka [m]

La = 10; %útlum aerosoly [db/km] -----
La = La*(Lvzd/1000); %útlum aerosoly [db/km]
Lt = 2; % útlum turbulence [db/km]
Lt = Lt*(Lvzd/1000);% útlum turbulence [db/km]

Latm1 = La + Lt; %celkový útlum atmosféry k cíli[dB]
Latm2 = La + Lt; %celkový útlum atmosféry k detektoru[dB]
%-----

%-----útlum šířením-----
Dtxa = 60e-3; %průměr vysílací apertury [m]
Drxa = 51e-3; %průměr přijímací optické soustavy [m]
fi = 9e-3; %úhlová šířka svazku [mrad]
Ls = 20*log10(Lvzd/Drxa); %útlum šířením [dB]
%-----

%-----odrazivost cíle-----

S = 1; %ozářená plocha [mm^2]
uhel = 0; %úhel odrazu [ ]
omega = cos(uhel); %cosinus úhlu odrazu [ ]
odrazivost = 0.87;
fildB = PlddB - (Lldtxa + Ltxa + Lw); % vyslaný výkon minus vliv atmosféry [dB]
fil = 10^(fildB/10);
E = fil/S; %velikost ozáření [W.m^2]
zar = odrazivost*(E/pi);
fi2 = zar*S*omega; %přijatý výkon přijímacem bez vlivu atmosféry [W]
L = fi2/(S*omega); %optický výkon ozářeného tělesa [W.m^2]
LdB = 10*log10(L/1); %optický výkon ozářeného tělesa [dB]
ro = LdB;
%-----

%-----zisk na přijímací optice-----
Spos = pi*(Drxa/2)^2; %obsah přijímací apartury [m^2]
Sa = 5.2441e-6; %obsah aktivní plochy fotodiody [m^2]
Grxa=20*log10(Spos/Sa); %zisk na přijímací optické soustavě [dB]
%-----
```

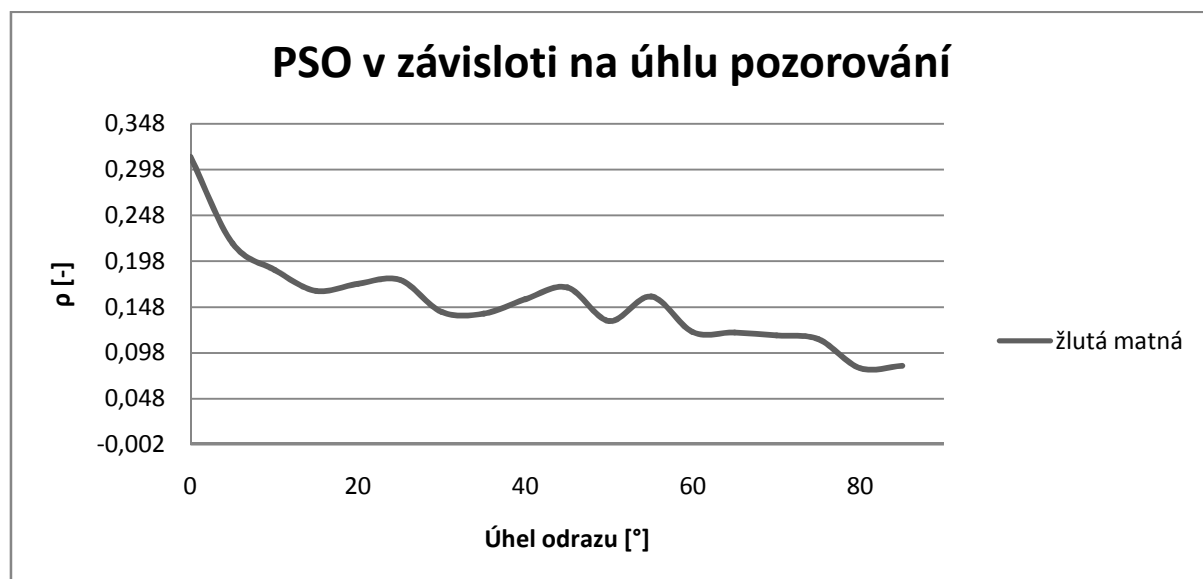
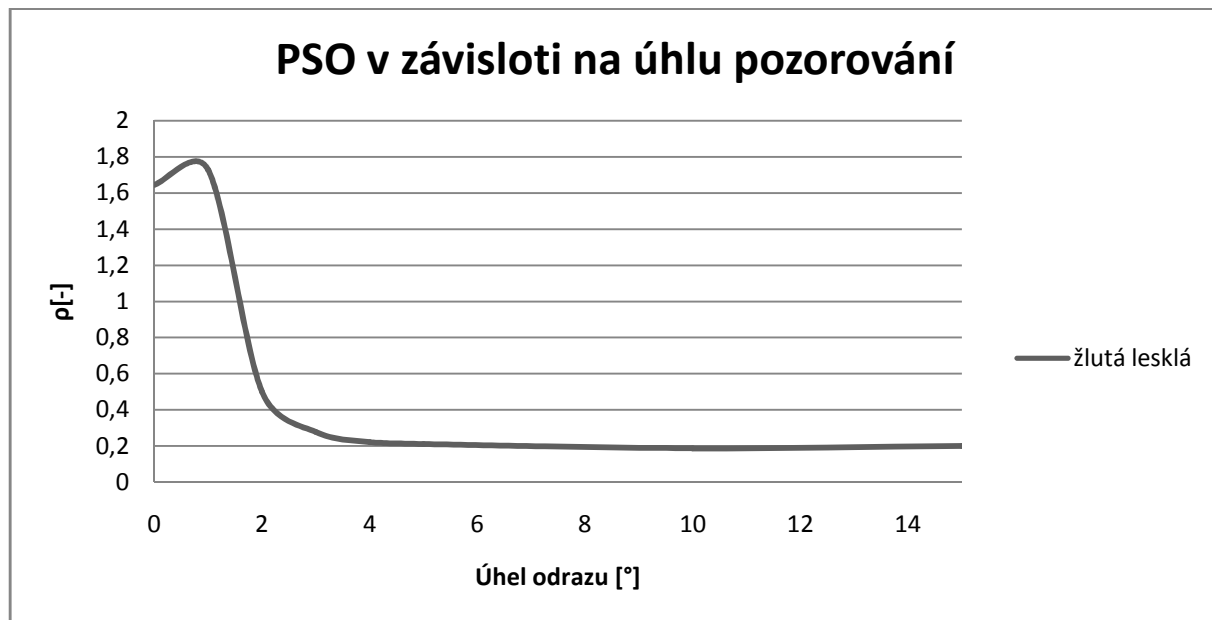
```

%-----výpočet jednotlivých útlumů-----
Pa1 = Plddb; %výkon LD
Pa2 = Pa1 - abs(Lldtxa); %útlum vazby LD vysílací apertura
Pa3 = Pa2 - abs(Ltxa); %útlum vysílací apertury
Pa4 = Pa3 - abs(Lw); %útlum kracího skla
Pa5 = Pa4 - abs(Ls); %útlum šířením
Pa6 = Pa5 - abs(Latm1); %útlum atmosféry pro cestu paprsku k cíli
Pa7 = Pa6 - abs(ro); %útlum na odrazné ploše měřeného cíle
Pa8 = Pa7 - abs(Latm2); %útlum atmosféry pro zpáteční cestu záření k detektoru
Pa9 = Pa8 + abs(Grxa); %zisk na přijímací optické soustavě
Pa10 = Pa9 - abs(Lw); %útlum kracího skla
Pa11 = Pa10 - abs(Lrxa); %útlum přijímací apertury
Pa12 = Pa11 - abs(Lif); %útlum interferenčního filtru
Pa13 = Pa12 - abs(Lrxapd); %útlum vazby přijímací apertura fotodiody
Pa14 = Pa13-4;
Pa15 = Pa14;

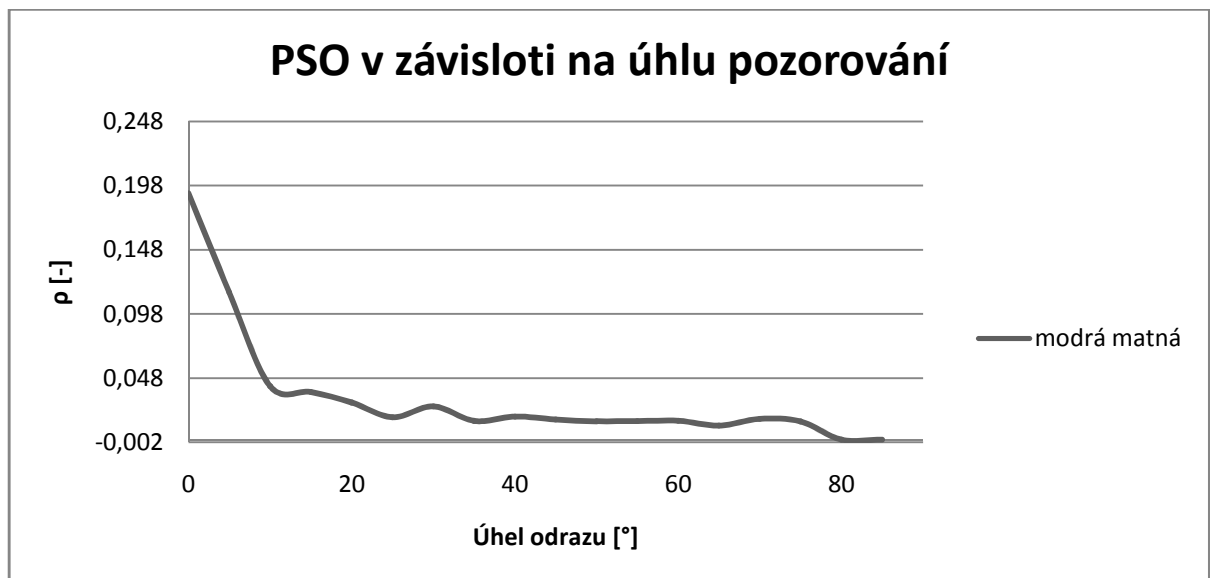
Pa=[Pa1 Pa2 Pa3 Pa4 Pa5 Pa6 Pa7 Pa8 Pa9 Pa10 Pa11 Pa12 Pa13 Pa14 Pa15]; %vektor pro vykreslení
diagramu
n=length(Pa);
t=1:n;
figure1 = figure;

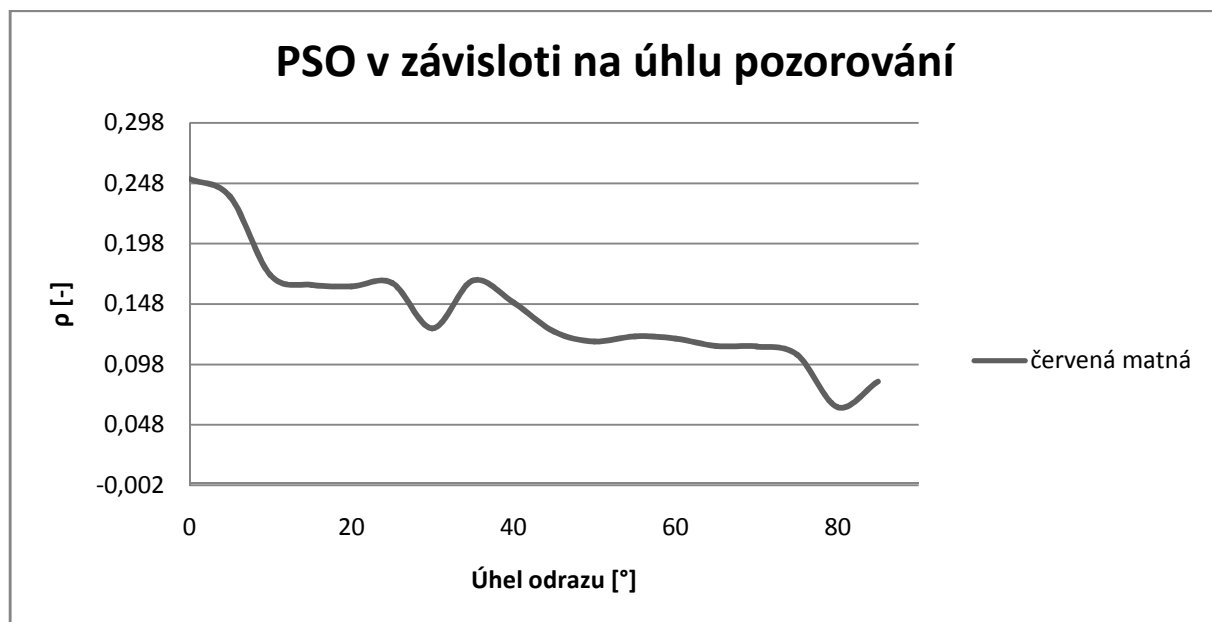
axes1 = axes('Parent',figure1,'XTick',[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15]);
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot (t,Pa,'Parent',axes1,'MarkerFaceColor','r','MarkerEdgeColor','r',...
'MarkerSize',7,...
'Marker','o',...
'LineWidth',1,...
'Color','b',...
'DisplayName',[' 1 - vysílací výkon laserové diody',...
sprintf('\n'),' 2 - útlum vazby LD vysílací apertura',...
sprintf('\n'),' 3 - útlum vysílací apertury',...
sprintf('\n'),' 4 - útlum krycího skla',...
sprintf('\n'),' 5 - útlum šířením',...
sprintf('\n'),' 6 - útlum atmosféry pro cestu paprsku k cíli',...
sprintf('\n'),' 7 - útlum na odrazné ploše měřeného cíle',...
sprintf('\n'),' 8 - útlum atmosféry pro zpáteční cestu záření k detektoru',...
sprintf('\n'),' 9 - zisk na přijímací optické soustavě',...
sprintf('\n'),' 10 - útlum krycího skla',...
sprintf('\n'),' 11 - útlum přijímací apertury',...
sprintf('\n'),' 12 - útlum interferenčního filtru',...
sprintf('\n'),' 13 - útlum vazby přijímací apertura fotodiody',...
sprintf('\n'),' 14 - konstanta',...
sprintf('\n'),' 15 - přijímaný výkon fotodiodou',...
sprintf('\n'),...
sprintf('\n'),'vzdálenost k cíli',sprintf(' %g',Lvzd),' [m]',...
sprintf('\n'),'útlum atmosféry',sprintf(' %g',Latm1),' [dB]',...
sprintf('\n'),'výkon laseru',sprintf(' %g',Plddb),' [dBm]',...
sprintf('\n'),'odrazivost cíle',sprintf(' %g',odrazivost),' [-]');
title('Výkonový úrovnový diagram laserového dálkoměru');
ylabel('P[dBm]');
grid on;
leg=legend(axes1,'show');
set(leg,'Location','Best');
Prijaty_vykon = Pa14

```



Příloha 5: Poměrné směrové odrazivosti pro modrou barvu RAL 5015







Příloha 8: Tabulky vypočtených hodnot PSO

úhel	černá lesklá	žlutá lesklá	modrá lesklá	šedá lesklá	červená lesklá	zelená lesklá	bílá lesklá
	RAL 9005	RAL 1007	RAL 5015	RAL 7040	RAL 3020	RAL 6018	RAL 9016
[°]	PSO						
0	7,94	1,65	2,91	3,21	4,11	8,05	7,98
1	0,61	1,73	1,26	2,41	2,04	0,65	1,23
2	0,17	0,50	0,29	0,45	0,57	0,13	0,45
3	0,04	0,28	0,20	0,06	0,22	0,04	0,30
4	0,03	0,22	0,07	0,15	0,21	0,03	0,27
5	0,02	0,21	0,04	0,12	0,19	0,03	0,22
10	0,01	0,19	0,04	0,10	0,13	0,02	0,24
15	0,01	0,20	0,03	0,08	0,15	0,03	0,25

Tab.5: Tabulka vypočtených hodnot PSO pro nalakovaný pozinkovaný plech

úhel	černá matná	žlutá matná	modrá matná	šedá matná	červená matná	zelená matná	bílá matná
	RAL 9005	RAL 1007	RAL 5015	RAL 7040	RAL 3020	RAL 6018	RAL 9016
[°]	PSO						
0	0,21	0,31	0,19	0,19	0,25	0,15	0,33
5	0,09	0,22	0,11	0,12	0,24	0,05	0,28
10	0,05	0,19	0,04	0,10	0,17	0,03	0,25
15	0,02	0,17	0,04	0,05	0,16	0,03	0,19
20	0,01	0,17	0,03	0,08	0,16	0,03	0,17
25	0,01	0,18	0,02	0,07	0,17	0,02	0,16
30	0,01	0,14	0,03	0,07	0,13	0,02	0,18
35	0,01	0,14	0,01	0,08	0,17	0,02	0,15
40	0,01	0,16	0,02	0,07	0,15	0,02	0,15
45	0,01	0,17	0,02	0,06	0,13	0,02	0,12
50	0,01	0,13	0,01	0,06	0,12	0,02	0,09
55	0,01	0,16	0,01	0,08	0,12	0,02	0,09
60	0,01	0,12	0,01	0,07	0,12	0,02	0,07
65	0,00	0,12	0,01	0,06	0,11	0,02	0,07
70	0,00	0,12	0,02	0,06	0,11	0,02	0,05
75	0,00	0,11	0,01	0,08	0,11	0,02	0,03
80	0,00	0,08	0,00	0,06	0,06	0,02	0,02
85	0,00	0,08	0,00	0,05	0,08	0,01	0,01
90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab.6: Tabulka vypočtených hodnot PSO pro nalakovaný pozinkovaný plech

úhel	plast			hliník
	plast bílý	plast šedý	plast černý	
	RAL 9016	RAL 7040	RAL 9005	
[°]	PSO			
0	0,95	0,73	0,53	2,82
5	0,61	0,31	0,34	1,36
10	0,55	0,15	0,10	1,08
15	0,50	0,17	0,03	0,57
20	0,47	0,12	0,01	0,27
25	0,46	0,12	0,01	0,22
30	0,44	0,11	0,01	0,17
35	0,47	0,09	0,00	0,14
40	0,46	0,08	0,00	0,07
45	0,47	0,07	0,00	0,07
50	0,47	0,07	0,00	0,06
55	0,36	0,06	0,00	0,05
60	0,42	0,05	0,00	0,04
65	0,39	0,03	0,00	0,04
70	0,41	0,03	0,00	0,04
75	0,30	0,03	0,00	0,03
80	0,24	0,03	0,00	0,03
85	0,22	0,00	0,00	0,01
90	0,00	0,00	0,00	0,00

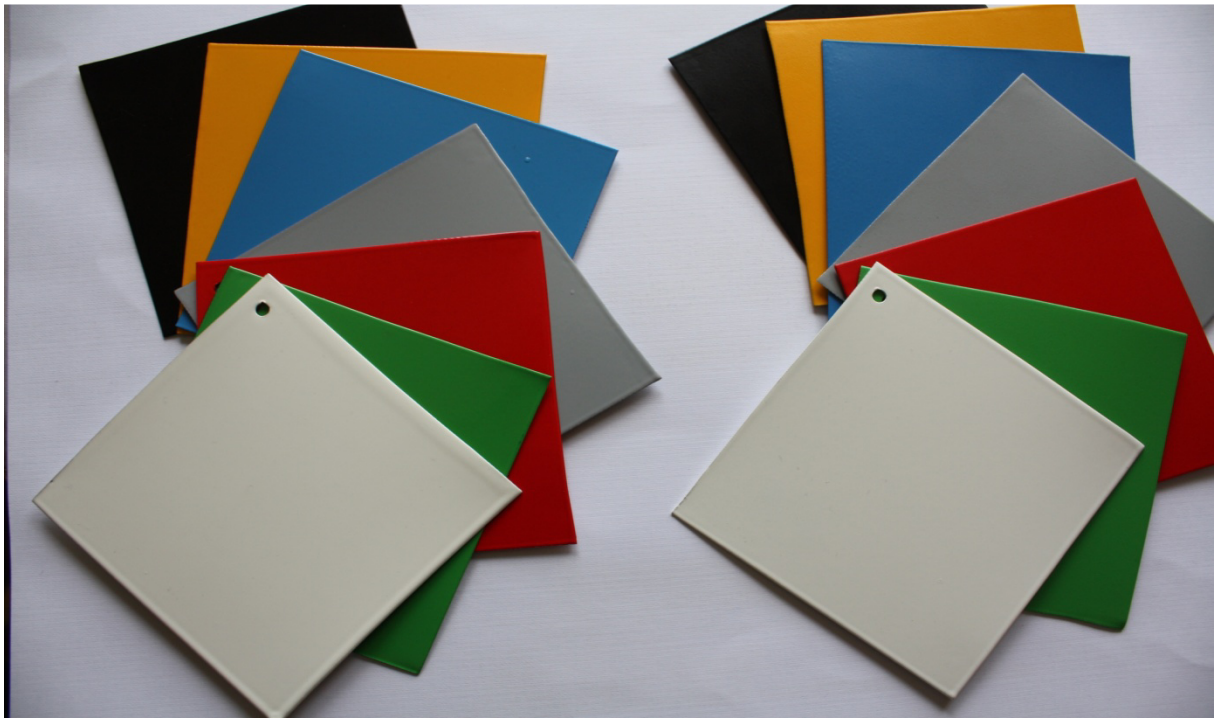
Tab.7: Tabulka vypočtených hodnot PSO pro hliníkový a plastové vzorky

Příloha 9: Tabulky vypočtených a změřených hodnot optického výkonu

L	Přijatý výkon	Vypočítaný výkon
[m]	[dBm]	
0,2	25,48	28,20
0,4	20,83	22,20
0,6	16,74	18,70
0,8	15,21	16,20
1	13,73	14,00
1,2	11,70	12,40
1,4	10,64	10,70
1,6	9,64	9,30
1,8	8,34	8,00
2	7,36	7,00
2,2	6,95	6,10
2,4	6,11	5,50
2,6	5,42	5,00
2,8	4,70	4,50
3	4,49	3,90
3,2	4,18	3,30
3,4	3,64	2,80
3,6	3,16	2,40
3,8	2,60	2,00
4	1,96	1,60
4,2	1,37	1,10
4,4	1,24	0,70
4,6	0,68	0,30
4,8	0,61	0,00
5	0,41	-0,40

Tab.8: Tabulky vypočtených a změřených hodnot optického výkonu

Příloha 10: Obrázky měřených vzorků PSO



Obr. 38: Vzorky pozinkovaného plechu nalakovaného na odstíny RAL



Obr. 39: Vzorky PVC v odstínech RAL a eloxovaný hliník