



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

KONSTRUKCE AKTIVNÍHO BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU LIDAR PRO DETEKCI PODZVUKOVÝCH STŘEL

DESIGN OF AN ACTIVE PROTECTION SYSTEM LIDAR FOR THE DETECTION OF SUBSONIC MISSILES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. SEBASTIÁN GEDEON

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN ANTOŠ, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Bc. Sebastián Gedeon**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce: **Ing. Martin Antoš, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukce aktivního bezpečnostního systému LIDAR pro detekci podzvukových střel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Systém aktivní ochrany je moderní řešení na ochranu vojenských cílů, který má aktivně zabránit zasažení bráněného cíle protitankovými raketami a projektily s podzvukovou rychlostí. K primární detekci vzdálených objektů se používá RADAR, který na základě Dopplerova jevu určuje rychlost objektu a jeho přibližnou polohu v prostoru. K sekundární detekci přesné polohy pohyblivého objektu, se využívá systém LIDAR. Systém měří vzdálenost na základě výpočtu doby šíření paprsku odraženého od snímaného objektu. Pro účely detekce střel se používá záření o vlnové délce v rozmezí od 1064 nm do 1550 nm. Výsledkem mapování je shluk bodů, který se po analýze obrazu může interpolovat do podoby digitálního modelu povrchu či 3D modelu.

Cíle diplomové práce:

Zpracujte problematiku konstrukce aktivních bezpečnostních systémů LIDAR s důrazem na řešení o existujících optických uspořádáních. Specifikujte základní optomechanické parametry, kterých má navrhovaný systém dosahovat. S využitím softwaru Zemax realizujte u zvoleného uspořádání optický návrh systému zajišťující vyslání a příjem signálu ve stanoveném zorném úhlu. Vytvořte počítačový 3D model mechanického uložení u vybraných optických prvků systému. Vypracujte výkresovou dokumentaci a proveďte výběr komerčně dostupných komponent pro stavbu systému.

Seznam doporučené literatury:

MCMANAMON, Paul F. LiDAR technologies and systems. Bellingham. Washington, USA: SPIE Press, 2019.

DONG, Pinliang and CHEN, Qi. LiDAR Remote Sensing and Applications. CRC Press, 2017.

KASUNIC, Keith. Optomechanical Systems Engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2015.

YODER, Paul. Mounting optics in optical Instruments. Bellingham: SPIE Press, 2008.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá návrhom aktívneho bezpečnostného systému LiDAR s dôrazom kladeným na rešerš fungovania týchto systémov a komponent, z ktorých sa systém skladá. Špecifikuje základné optomechanické parametre, ktorých musí navrhovaný systém dosahovať. Práca disponuje koncepčným návrhom optického systému pre pozemné účely a návrhom pre letecké účely. Pre jednotlivé koncepčné prevedenia sú zhotovené optické návrhy systému LiDAR, tvorené mimoosovým alebo Cassegrainovým ďalekohľadom. Súčasťou optických návrhov sú taktiež návrhy osvetľovacieho optického systému a objektívu zoom pre infračervené kamery.

Summary

The diploma thesis focuses on the design of an Active protection system LiDAR, with emphasis on the research for the operation of these systems and the components of which the system consists. It specifies the basic optomechanical parameters that the designed system must achieve. The thesis introduces a conceptual design of an optical system for ground surveillance and aviation surveillance. LiDAR systems are made of off-axis or Cassegrain telescopes. As a part of this thesis are also designs of an optical illuminating system and a zoom lens for infrared imaging.

Klíčová slova

LiDAR, aktívny bezpečnostný systém, optický návrh, Zemax.

Keywords

LiDAR, Active protection system, optical design, Zemax.

GEDEON, S. *Konstrukce aktivního bezpečnostního systému LIDAR pro detekci podzvukových střel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. 111 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Antoš, Ph.D..

Prehlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením Ing. Martina Antoša, Ph.D.. Zároveň vyhlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

Bc. Sebastián Gedeon

Podakovanie by som chcel venovať svojim rodičom a vedúcemu záverečnej práce Ing. Martinovi Antošovi, Ph.D. pre ich neskonalú trpezlivosť a ochotu mi vždy pomôcť. V neposlednej rade moja vďaka patrí môjmu dobrému kamarátovi Martinovi Milotovi.

Bc. Sebastián Gedeon

Obsah

1	Úvod	3
2	Súčasný stav poznania	4
2.1	História systémov LiDAR	4
2.2	Princíp činnosti LiDARu	5
2.3	Delenie systémov LiDAR	6
2.4	Svetelný zdroj a modulácia signálu	8
2.4.1	Aktívne prostredie	8
2.4.2	Čerpanie	9
2.4.3	Pracovný režim	10
2.4.4	Seeding a zosilňovače	13
2.4.5	Lasery používané v systémoch LiDAR	16
2.4.6	Modulácia signálu	19
2.5	Mechanické metódy skenovania	20
2.5.1	Rýchlo polohovateľné zrkadlo	20
2.5.2	Risley hranoly	21
2.5.3	Zrkadlové n-uholníky	22
2.5.4	Mikroelektrickomechanické systémy	22
2.6	Optické metódy skenovania	24
2.6.1	Opticky sfázované pole	24
2.6.2	Metóda optického dráhového rozdielu	25
2.7	Detektory	25
2.7.1	Lavínové fotodiódy	25
3	Koncepcné návrhy	28
3.1	Koncepcný návrh pre pozemné účely	28
3.1.1	Princíp činnosti koncepcného návrhu	29
3.2	Koncepcný návrh pre letecké účely	29
4	Požiadavky na optický systém	32
4.1	Kritéria pre voľbu spektrálneho rozsahu svetelného zdroja	32
4.1.1	V závislosti na bezpečnosti	32
4.1.2	Vplyv atmosféry na prestup žiarenia	34
4.1.3	Vlnová dĺžka svetelného zdroja	39
4.2	Účinnosť optického systému	40
4.2.1	Rovnica výkonu optického systému	40
4.2.2	Šum spôsobený pozadím	44
5	Zostavenie funkčných častí	46
5.1	Systém pozemného LiDARu	46
5.1.1	Sprievodná optika	47
5.2	Systém leteckého LiDARu	48
5.2.1	Ostatné funkčné časti	49

6	Návrh optického systému	50
6.1	Návrh optiky emitora	50
6.1.1	Optické požiadavky	50
6.1.2	Spôsob definície optických rozhraní	50
6.1.3	Jednošošovkové riešenie	52
6.1.4	Optimalizácia	53
6.1.5	Analýza	55
6.1.6	Riešenie mimoosovým ďalekohľadom	57
6.1.7	Analýza	60
6.1.8	Riešenie Cassegrainovým typom ďalekohľadu	61
6.2	Návrh optiky infračervenej kamery	61
6.2.1	Optické požiadavky	61
6.2.2	Spôsob definície optických rozhraní	66
6.2.3	Analýza	71
6.3	Návrh optiky detektora	79
6.3.1	Optické požiadavky	79
6.3.2	Riešenie mimoosovým ďalekohľadom	79
6.3.3	Analýza	80
6.3.4	Riešenie ďalekohľadom Cassegrainovho typu	81
6.3.5	Spôsob definície optických rozhraní	82
6.3.6	Analýza	89
7	Mechanický návrh	92
7.1	Návrh pre pozemné účely	92
7.1.1	Svetelný zdroj	92
7.1.2	Uloženie optiky detektora	93
7.1.3	Objektív infračervenej kamery	94
7.2	Návrh pre letecké účely	96
7.2.1	Svetelný zdroj	98
7.2.2	Uloženie optiky emitora a IR kamery	99
7.2.3	Uloženie optiky emitora	101
8	Záver	103
9	Zoznam použitých symbolov	109
10	Zoznam príloh	111

1. Úvod

Technológia LiDAR zažíva v poslednej dobe veľký rozmach vo všetkých technických sférach a zároveň sa stáva prístupnejšia pre bežného užívateľa. Príkladom toho môžu byť autonómne vozidlá alebo umiestnenie systému LiDAR do moderných smartfónov. Technológia má širokú škálu využitia od bežného 3D skenovania, cez analýzu atmosféry až po skúmanie dna oceánov. Vo vojenskom priemysle sú systémy LiDAR využívané vo forme aktívnych bezpečnostných systémov, ktoré slúžia k sekundárnej detekcii napríklad podzvukových striel. V našej práci sa budeme venovať koncepčnému návrhu takéhoto systému. Systém bude slúžiť k diaľkovému mapovaniu terénu a rekonštrukcií jeho 3D modelu s možnosťou sekundárnej detekcie a sledovanie rýchlo sa pohybujúcich objektov.

V prvej časti práce si objasníme princíp fungovania a rozdelenie systémov LiDAR. Budeme sa venovať metódam generovania, modulovania, vychyľovania a detekcii svetelného signálu. Predstavíme si jednotlivé komponenty, ktoré dominujú v dnešných systémoch LiDAR a sú nevyhnutné pre ich správne fungovanie. Následne si predstavíme dva koncepčné návrhy, ktorými sú návrh pre pozemné účely a návrh pre letecké účely. Princíp fungovania oboch koncepčných návrhov bude rovnaký, líšiť sa budú dizajnom prevedení jednotlivých funkčných častí systému.

V druhej časti práce sa budeme venovať požiadavkám kladených na optický systém. Objasníme si problematiku bezpečnosti používania laserov, vplyv atmosféry na šírenie svetelného žiarenia a určíme vlnovú dĺžku svetelného zdroja navrhovaných systémov. Ďalej stanovíme teoretickú účinnosť detekcie signálu na rôzne vzdialenosti.

V tretej časti navrhujeme zostavu oboch navrhovaných systémov ako kombináciu nakupovaných a navrhovaných komponent. V software ZEMAX zhotovíme optické návrhy osvetľovacích a zobrazovacích systémov, ktoré sú nevyhnutné pre diaľkové skenovanie. Nakoniec si predstavíme konštrukčné prevedenie oboch koncepčných návrhov.

2. Súčasný stav poznania

2.1. História systémov LiDAR

Prvé kroky technológie LiDAR

Počiatkové myšlienky použiť svetlo na meranie vzdialenosti, pochádzajú od írskoho fyzika Edwarda Hutchinsona Syngeho, ktorý v roku 1930 prvý krát teoreticky navrhol použitie svetlometu na štúdium atmosféry. O osem rokov neskôr použil svetelné pulzy na meranie výšky mrakov. Pri experimente sa inšpiroval pokročilou technológiou RaDAR, ktorá využívala rádiové vlny. Synge si však uvedomoval výhodu použitia koherentného svetla, keďže má kratšiu vlnovú dĺžku, čo umožňuje detegovať alebo merať oveľa menšie objekty s väčšou presnosťou. Synge mal však jeden problém, že v tej dobe ešte nebol vynájdený koherentný zdroj svetla.[1, 2]

Vynález laseru

V roku 1957 fyzici Charles Townes a Arthur Schawlow v Bellových laboratóriách v USA prvý krát úspešne amplifikovali mikrovlnné žiarenie stimulovanou emisiou žiarenia (MASER) pomocou molekúl amoniaku. V tom istom roku Townes a Gordon Gould, postgraduálny študent Kolumbijskej univerzity, prišli s nápadom na zostavenie prvého laseru, ktorý zahŕňal myšlienku otvoreného rezonátora. V nasledujúcom roku publikoval Aleksandr M. Prochorov návrh na použitie otvoreného rezonátora. V roku 1960 bol Theodorom Maimanom z Hughesových výskumných laboratórií zostavený prvý fungujúce laser, ktorému sa podarilo použiť svetelnú výbojku k pumpaniu syntetického rubínu k produkcii červeného svetla s vlnovou dĺžkou 694 nm. Laser bol schopný iba pulznej prevádzky, z dôvodu troj úrovňového čerpania a tiež pre zlý rozptyl tepla. V tom období sa ukázali ako účinné materiály schopné stimulovanej emisie napríklad Ytrium-hliník-granát (YAG) alebo zmes hélia a neónu (HeNe), ktorý bol vynájdený trojicou fyzikou Ali Javanom, Williamom Bennetom a Donaldom Herriotsonom a stal v roku 1961 prvým kontinuálnym laserom operujúcim v IR spektre (1150 nm). V roku 1962 predstavili Don Nelson a Willard Boyle prvý kontinuálny rubínový laser, v ktorom bola svetelná výbojka nahradená oblúkovou lampou, bola zhotovená verzia HeNe lasera pracujúceho vo viditeľnom spektre (623,8 nm) a bol Robertom Hallom, zhotovený prvý diódový laser arzenitu gália (GaAs), ktorý emitoval v blízkom IR spektre (850 nm). V tom istom roku bola predstavená Nickom Holonyakom, Jr. jeho verzia operujúca vo viditeľnom spektre (735 nm), ktorá používala zliatinu gálium arzenid fosfid (GaAsP). Táto verzia sa stala účinným a kompaktným zdrojom viditeľného koherentného svetla. Tieto polovodičové a plynové lasery boli pre komerčný trh nevhodné pre ich vysokú cenu a nutnosť prevádzkovať ich pri chladení kvapalným dusíkom na teplotu 77 K (-196,15 °C). Až v roku 1970 v Sovietskom zväze vyvinul Žores Ivanovič Alfjorov prvý diódový laser, ktorý fungoval pri izbovej teplote. Postupom času sa rôzne druhy laserov začali využívať v rôznych odvetviach priemyslu. Od zapisovacej hlavy CD a DVD, komunikácie cez optické vlákna, cez rezacie vysoko-výkonné CO₂ lasery, až po excimerové lasery (KRF, ARF, XeF), ktoré produkujú žiarenie v UV spektre a používajú sa na lekárske účely alebo na podmorské aplikácie, napríklad komunikáciu s ponorkami. [3, 4]

Vývoj LiDARu

Po vynájdení laseru už nič nestálo v ceste k rozvinutiu Syngeho myšlienok a zostrojeniu prvého LiDARu. Technologický vývoj pokračoval, pretože vojenský priemysel videl využitie systému aplikácie na poly obrany, taktiež možnosti študovať atmosféru do hĺbky, napríklad určiť množstvo znečistenia vo vzduchu. Ďalej boli atraktívne možnosti pozemného mapovania, pre ktorú NASA investovala do technológie LiDAR na mapovanie Marsu, Merkúra a Mesiaca. Zároveň by si technológia našla uplatnenie aj v geológii, lesníckych vedách, oceánografií a v stavebnom priemysle. V roku 1961 len rok po vynájdení prvého laseru, sa pod vedením Malcolma Stitchsa v tom istom

inštitúte (Hughesové výskumné laboratóriá) podarilo zostrojenie prvého fungujúceho LiDARu, ktorý pôvodne nazývali CoLiDAR (coherent light detecting and ranging). O dva roky neskôr bol predstavený CoLiDAR Mark II, ktorý pripomínal tvarom skôr zbraň, obrázok 2.1, bol schopný detegovať objekt na vzdialenosť 11 km s presnosťou 4,5 m. Stal sa prvým komerčne vyrábaným LiDARom a využívala ho najmä armáda na zameriavanie. Široká verejnosť sa o presnosti a užitočnosti LiDARových systémov dozvedela v roku 1971 počas misie Apollo 15, keď astronauti použili technológiu na zmapovanie povrchu Mesiaca. Odvtedy sa rozmach systémov LiDAR začal rozširovať do rôznych odvetví priemyslu až do podoby v akej sa technológia nachádza dnes. [2]



Obr. 2.1: Ing. Rod Smith mieri CoLiDAR Mark II, ktorý bol prvý komerčne vyrábaný LiDAR na svete. Prevzaté z [60]

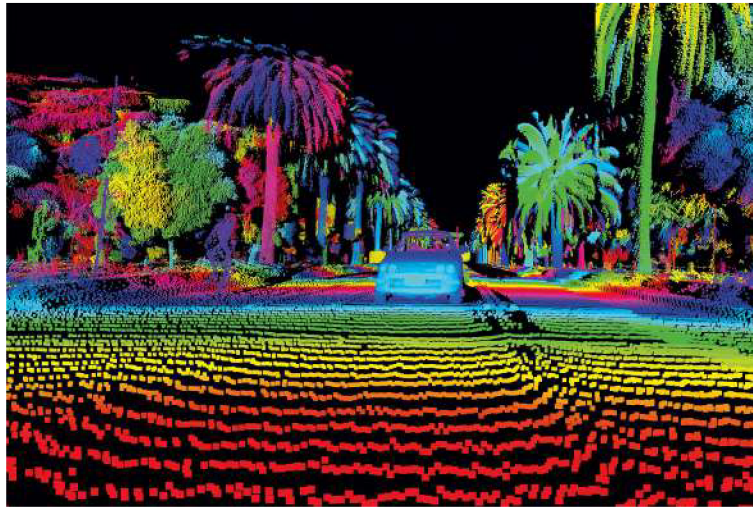
2.2. Princíp činnosti LiDARu

Svetelný pulz je zhluk časovo označených fotónov emitovaných známym smerom. Keď tento pulz interaguje s povrchom objektu, časť fotónov sa odrazí späť smerom k zariadeniu. LiDAR obsahuje detektor, ktorý deteguje odrazené fotóny s časovým označením a riadiaca jednotka následne počíta čas medzi počiatočnou emisiou a návratom signálu na detektor. Tento proces sa alternatívne nazýva aj svetelné echo (t.j. ozvena emitovaného pulzu). Systém určuje miesto, odkiaľ echo vzniklo na základe znalosti rýchlosti šírenia pulzu (rýchlosť svetla), pôvodu pulzu (miesto emisie), vektora smerovania a čas dráhy pulzu. Svetelné pulzy často poskytujú viacnásobné echá, pretože nie všetky fotóny musia byť odrazené len jedným povrchom. Okrem polohy zariadenie môže zaznamenávať aj intenzitu vracajúceho sa echa, jeho polarizáciu, alebo frekvenciu modulovaného signálu, čo vytvára ďalšie možnosti detekcie a spracovania signálu. Moderné komerčné systémy LiDAR môžu vysielat až 150 000 pulzov za sekundu a keďže každý pulz môže vytvoriť viaceré echá, tak rýchlosť spracovania môže byť až 1,5 milióna bodov za sekundu na jeden detektor. Výsledkom je mračno bodov, z ktorého každý bod má svoje XYZ súradnice v priestore, obrázok 2.2. Vzdialenosť echa R vypočítame zo vzťahu 2.1.[5, 6]

$$R = \frac{1}{2}ct_p \quad (2.1)$$

2.3. DELENIE SYSTÉMOV LIDAR

kde c je rýchlosť svetla a t_p je doba letu laserového pulzu.



Obr. 2.2: Mračno bodov tvorené echami laserových pulzov. Prevzaté z [61].

2.3. Delenie systémov LiDAR

V časti 2.1 sme uviedli, že technológia si našla uplatnenie v rôznych odvetviach priemyslu, čo viedlo k prirodzenej kategorizácii týchto systémov, ktoré sa postupom času začali od seba mierne odlišovať, tak aby spĺňali požiadavky daného priemyselného odvetvia. V dnešnej dobe môžeme systémy LiDAR rozdeľovať podľa mnohých kritérií. V základe delíme systémy na LiDARy, ktoré skenujú povrch, kedy je systém dizajnovaný tak, aby detegoval predovšetkým svetlo, ktoré sa rozptýli na skenovanom povrchu a LiDARy skenujúce objem, kedy sa systém naopak snaží detegovať signál rozptýlený samotným prostredím, ktorým tento signál prechádza. LiDARy skenujúce objem sa používajú najmä v meteorológii. Ďalšie delenie systémov LiDAR spočíva v metóde získavania informácií. Prvým typom sú skenovacie LiDARy. Princíp fungovania spočíva vo vytváraní 3D obrazu pomocou úzkeho laserového zväzku, ktorý skenuje zorné pole. Väčšinou u skenovacích LiDARoch stačí použitie detektora s jedným aktívnym pixelom. Druhým typom sú Flash LiDARy, ktoré pracujú s detektorom obsahujúcim pole aktívnych pixelov pripomínajúcich kamerový senzor. Flash LiDARy krátkym svetelným zábleskom osvetlia zorné pole systému a pole aktívnych pixelov zaznamenáva svetelné echá zvlášť pre každý pixel poľa.[4]

Podľa miesta aplikácie ďalej delíme LiDARy na:

Pozemný LiDAR

Pozemný LiDAR je systém, ktorý funguje na zemi. Môže byť namontovaný na pohybujúce sa vozidlo alebo použitý na statickom mieste. Pozemné LiDARy sú vhodné pre aplikácie, ktoré vyžadujú podrobný prieskum zeme alebo „bližší pohľad“ na objekty. Niektoré aplikácie pozemného LiDARu našli uplatnenie v stavebníctve a autonómnych vozidlách. Pozemný LiDAR možno ďalej rozdeliť na mobilné a statické verzie. Mobilný LiDAR obsahuje senzor, globálny polohový systém (GPS), inerciálny navigačný systém (INS) a niekoľko kamier. Mobilný LiDAR je umiestnený na pohybujúcom sa vozidle, ako je auto alebo vlak. Z tohto pohybujúceho sa vozidla systém LiDAR vysiela laserové pulzy do všetkých smerov, tak vytvára mračná 3D bodov, ktoré sa následne spracúvajú. Na druhú stranu je v niektorých aplikáciách výhodné mať systém LiDAR upevnený v nepohyblivom bode. Takéto aplikácie využívajú statický LiDAR. V tomto nastavení je systém namontovaný na statickom objekte, ktorým je zvyčajne statív. V prípade potreby je

možné celú jednotku spolu so statívom presunúť na iné miesto. Statické LiDARy našli uplatnenie v aplikáciách, ako je výstavba budov, baníctvo alebo strojárstvo.[7]

Letecký LiDAR

Letecký LiDAR je systém umiestnený buď v lietadle, vo vrtuľníku alebo na drone. Letecký LiDAR dokáže skenovať rozsiahle oblasti za kratší čas v porovnaní s pozemným LiDARom. Vďaka tomu sú vzdušné systémy LiDAR vhodné pre aplikácie, ktoré vyžadujú pohľad z vtáčej perspektívy na oblasť rozprestierajúcu sa na veľkých územiach. Na základe toho, akú oblasť systém LiDAR skenuje, možno letecké systémy ďalej klasifikovať na topografický a batymetrický LiDAR. Topografický LiDAR sa používa na skenovanie akéhokoľvek druhu krajiny. Aplikácie topografického LiDARu sa využívajú v lesníctve, mestskom plánovaní, ekológii, mapovaní infraštruktúry, geomorfológii atď. Zatiaľ čo topografický LiDAR dokáže veľmi efektívne skenovať suchozemskú krajinu, nefunguje veľmi dobre pri skenovaní vo vode. Na tieto účely sa používa iný typ leteckého systému LiDAR nazývaný batymetrický LiDAR. Batymetrický LiDAR emituje signál vo viditeľnom spektre, zelené svetlo (532 nm). Takýto signál preniká vodou s nižšími stratami ako u bežných topografických LiDARoch. Preto si našiel systém uplatnenie v pobrežnom inžinierstve a námorných vedách.[4, 7]

Satelitný LiDAR

Satelitné LiDARy môžu byť umiestnené v satelitoch obiehajúcich zem. So satelitnými systémami LiDAR je možné skenovať väčšie časti nielen zeme, ale aj atmosféry. Viacero takýchto vesmírnych systémov LiDAR použila NASA na pochopenie polohy oblakov nad zemou, vegetácie alebo stavu ľadu na póloch.[7]

Hoci väčšina systémov LiDAR je podobná v základnom princípe fungovania, určité aplikácie vyžadujú špecifické vlastnosti. Na základe týchto vlastností môžeme ďalej klasifikovať niektoré systémy LiDAR následovne:

LiDAR s diferenciálnou absorpciou

LiDAR s diferenciálnou absorpciou (Differential absorption LiDAR, DIAL) sa používa na meranie koncentrácií plynov v atmosfére, na monitorovanie hladín ozónu, úrovne znečistenia. Systémy DIAL môžu byť pozemné a vzdušné. Systém využíva ladiateľný laser na vytváranie dvoch vlnových dĺžok laserových pulzov, ktoré zaznamenávajú rozdielnu absorpciu jednotlivých vlnových dĺžok. Zvyčajne je jedna vlnová dĺžka volená tak, aby dochádzalo k silnej absorpcii prostredím a druhá, pri ktorej dochádza k minimálnej absorpcii. Preto názov, diferenciálna absorpcia.[8]

Veterný LiDAR

Meranie pohybu vetra môže byť zložitá pomocou akéhokoľvek zariadenia na diaľkové snímanie, predovšetkým preto, že vietor rýchlo mení smer. Veterný LiDAR bol navrhnutý práve na tieto účely. Systémy LiDAR poskytujú nepretržité monitorovanie vetra, detekciou jemných odchýlok vlnových dĺžok vracajúceho sa signálu spôsobeného Dopplerovým javom. Dopplerov jav je zapríčinený neustálym pohybom aerosolu v atmosfére.[4]

Ramanovský LiDAR

Ramanovský LiDAR je pozemný systém LiDAR, ktorý sa špecificky používa na detekciu a meranie vodných pár a aerosólov v prostredí. Zatiaľ čo bežný systém deteguje a spracováva údaje zo spätného rozptylu laserových pulzov, Ramanovský LiDAR môže detegovať signály prítomné pri spätnom rozptyle v rôznych vlnových dĺžkach, spôsobenom tzv. nepružným rozptylom. Tieto signály sú v podstate produkované prítomnosťou rôznych molekúl. Pomocou tejto techniky môže

2.4. SVETELNÝ ZDROJ A MODULÁCIA SIGNÁLU

LiDAR vyhodnotiť prítomnosť konkrétnych látok v atmosfére. Ramanovský LiDAR je bežne používaný aj v armádnom priemysle na detekciu napr. použitia chemických zbraní. [4]

LiDAR s vysokým spektrálnym rozlíšením

LiDAR s vysokým spektrálnym rozlíšením (High Spectral Resolution LiDAR, HSRL) je ďalším spôsobom, ako určiť prítomnosť aerosólov v atmosfére. Na rozdiel od Ramanovského LiDARu je HSRL letecký systém. Jednotka dokáže zachytávať molekulami a aerosólmi rozptýlený signál v širokom pásme vlnových dĺžok. Následne HSRL určí ich chemické zloženie a charakter oblakov, keďže rôzne častice s rôznym chemickým zložením rozptyľujú svetlo v iných vlnových dĺžkach, rovnako ako u Ramanovského LiDARu. [9, 10]

Polarizačný LiDAR

Polarizačný LiDARu funguje na princípe detekcií odrazeného signálu s odlišnou polarizáciou s akou bol signál vyžiarený. Táto zmena polarizácia je následkom vplyvu tvaru častíc obsiahnutých v aerosólu a oblakov, ktoré ovplyvňujú rozptyl svetla a aj jeho polarizáciu. Ak sa v danom médiu nachádzajú prevažne častice rovnakého tvaru, dá sa predpokladať konkrétna polarizácia spätného signálu. Sférické častice nemenia stav polarizácie, zatiaľ čo častice iného tvaru spôsobujú depolarizáciu rozptýleného svetla. [10]

2.4. Svetelný zdroj a modulácia signálu

Koherentné svetlo laserového zdroja je časovo a priestorovo koherentné a dokáže prenášať vysokú koncentráciu žiarenia v malom priestorovom uhle v úzkom spektrálnom intervale. Ďalšou výhodou koherentného svetelného zdroja je možnosť detegovať chemické alebo biologické zbrane, pretože vlnová dĺžka týchto zdrojov je porovnateľná s veľkosťami molekúl a baktérií, ktoré túto zbraň tvoria. Keďže koherentné zdroje svetla majú väčšinou krátke vlnové dĺžky dovoľuje to optickému systému rekonštruovať obraz s vysokým rozlíšením. Vysoké frekvencie žiarenia koherentného zdroja tiež dovoľujú vysoký prenos dát.[11]

Existuje mnoho kritérií podľa ktorých môžeme rozdeľovať lasery. My ich budeme rozdeľovať podľa nasledujúcich troch kriterií.

2.4.1. Aktívne prostredie

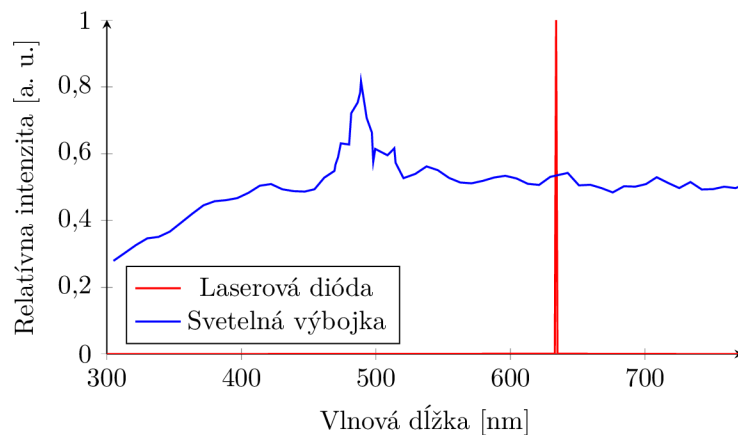
Prvým kritériom je materiál aktívneho prostredia, ktoré zodpovedá za generovanie žiarenia pri procese zvanom čerpanie.[4, 12]

1. Pevnolátkové aktívne prostredie, medzi ktoré patrí napríklad Nd:YAG, Nd:YVO₄, Ti:safir alebo Yb:YAG, môžu operovať v rôznych režimoch a rôznych prevádzkových podmienkach a sú veľmi jednoduché na manipuláciu a konštrukciu. Medzi pevnolátkové lasery patria aj vláknové lasery.
2. Plynné aktívne prostredie, kam patria lasery ako He-Ne, Ar, Kr, CO₂, KrO a excimérové lasery, pokrývajú široký rozsah vlnových dĺžok. Homogenita prostredia taktiež zaisťuje vysokú kvalitu žiarenia s výbornými parametrami. Nevýhodou je malý výkon.
3. Kvapalné aktívne prostredie, vyrobené z fluoresceínu alebo rhodaminu, nazývajú sa aj farbivové a využívajú sa hlavne v spektrometrií. Hlavnou výhodou takýchto laserov je možnosť plynulého korigovania výkonu a vlnovej dĺžky.

4. Polovodičové aktívne prostredie, medzi ktoré patria: GaAs, GaN, InAsSb (diódové lasery), všeobecne patria medzi najpoužívanéjšie lasery. Výhodou takýchto laserov sú malé rozmery, vysoká účinnosť a jednoduchá integrovateľnosť s elektrickými súčiastkami. Pokrývajú širokú škálu vlnových dĺžok a môžu dosahovať výkon až 10 W.

2.4.2. Čerpanie

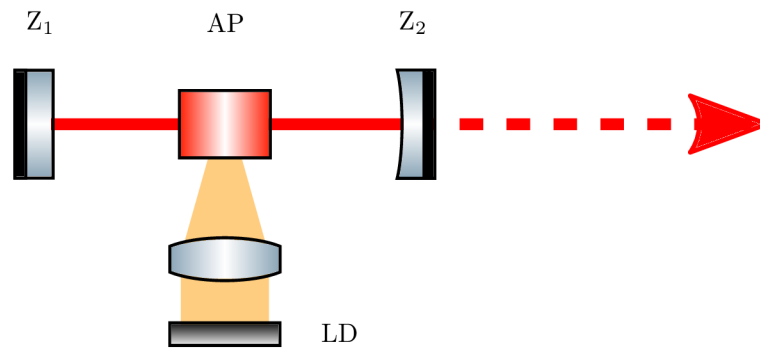
Druhým kritériom, ktorým posudzujeme lasery je spôsob akým dochádza k čerpaniu žiarenia v aktívnom prostredí. Za generovanie svetelného žiarenia zodpovedá čerpanie, ktorým je proces, kedy aktívne prostredie vystavujeme elektromagnetickému žiareniu externého zdroja v rozsahu od ultrafialových až po rádiové vlnové dĺžky svetelného žiarenia. Taktiež môžeme aktívne prostredie vystavovať elektrickému poľu, chemickej reakcii, elektronovému zväzku, rekombinácií alebo injekcií s nosičom náboja. V minulosti sa na čerpanie používali hlavne svetelné výbojky, ktoré boli neefektívne a nespoľahlivé. Svetelné výbojky generujú široko spektrálne žiarenie podobné vyžarovaniu čierneho telesa, ale väčšina aktívnych médií absorbuje len úzku časť tohoto spektra. Postupom času sa pre svoju jednoduchosť a kvalitu žiarenia najviac presadila metóda čerpania diódovým laserom a nahradila svetelnú výbojku. V dnešnej dobe sú takmer všetky svetlom čerpané lasery čerpané laserovými diódami. Laserové diódy môžu byť účinné a zároveň vyžarovať v úzkom spektre, takže dochádza k veľmi účinnému čerpaniu aktívneho média, obrázok 2.6.[4]



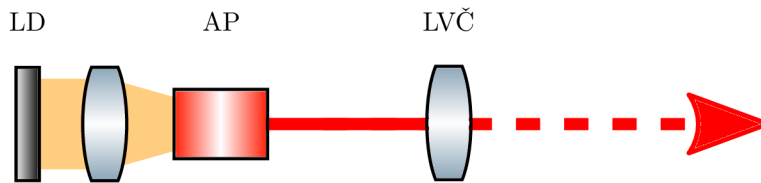
Obr. 2.3: Rozdiel spektrálnej krivky vyžarovania laserovej diódy a svetelnej výbojky. Prevzaté z [62] a upravené.

Pri splnení spektrálnych požiadaviek aktívneho prostredia diódovým laserom je miera účinnosti celého systému definovaná účinnosťou samotnej laserovej diódy a geometriou čerpania aktívneho prostredia. Geometria čerpania môže byť priečna alebo pozdĺžna. Výhodou priečného čerpania je, že aktívne prostredie môžeme ožarovať súčasne mnohými laserovými diódami, obrázok 2.4 na rozdiel od pozdĺžneho čerpania znázorneného na obrázku 2.5, preto môžeme aktívnemu prostrediu poskytnúť oveľa väčší výkon, ktorým čerpáme.[12]

2.4. SVETELNÝ ZDROJ A MODULÁCIA SIGNÁLU



Obr. 2.4: Schéma s priečnym čerpaním aktívneho prostredia, kde Z_1 je nepriepustné zrkadlo, AP je aktívne prostredie, Z_2 je polopriepustné zrkadlo, LD je laserová dióda. Prevzaté z [12] a upravené.



Obr. 2.5: Schéma s pozdĺžnym čerpaním aktívneho prostredia, kde LD je laserová dióda, AP je aktívne prostredie a LVČ je laserový väzbový člen. Prevzaté z [12] a upravené.

2.4.3. Pracovný režim

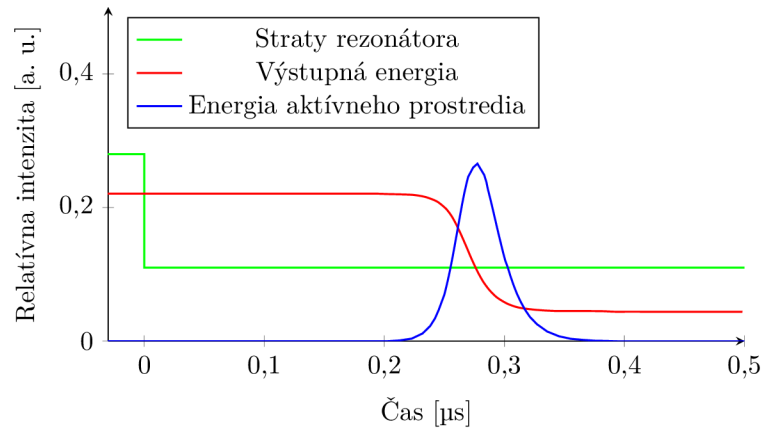
Tretím veľmi dôležitým kritériom je režim v akom laser pracuje. Systémy LiDAR pracujú buď s pulzným signálom o vysokej frekvencii niekedy až 10 GHz alebo pracujú s modulovaným signálom, viac o modulácii signálu v časti 2.4.6. Pre používanie systému LiDAR v pulznom režime musí svetelný zdroj vytvárať pulzy o vysokej energii v krátkom čase pravidelne za sebou. Existujú viaceré možnosti generovania pulzov svetelným zdrojom.

Q-spínanie

Q-spínanie je technika generovania nanosekundových pulzov s vysokou energiou a vysokým špičkovým výkonom. Pulzy sú generované v pevnolátkových laseroch moduláciou činiteľa akosti (Q-factor), odtiaľ aj meno Q-spínanie. Činiteľ akosti vo fyzike a inžinierstve je bezrozmerný parameter popisujúci faktor kvality, ktorý vyjadruje, akou mierou je tlmený oscilátor alebo rezonátor. Je približne definovaný ako pomer počiatkovej energie uloženej v rezonátore k energii stratenej v jednom radiálnom cykle oscilácie. Činiteľ akosti laseru možno popísať podľa vzťahu 2.2.[13]

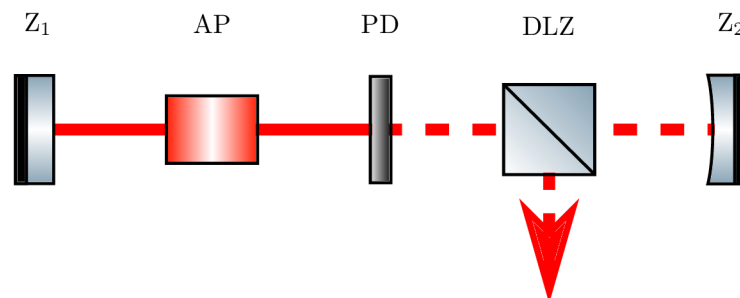
$$Q = \frac{P_r}{P_s} \quad (2.2)$$

kde P_r je výkon obsiahnutý v rezonátore a P_s je stratový výkon. Generovanie pulzu Q-spínaním možno popísať spočiatku, ako udržiavanie vysokej úrovne strát rezonátora. Tým pádom je činiteľ akosti naopak na nízkej úrovni. V tomto štádiu sa vysoká úroveň strát rezonátora udržuje aktívnym alebo pasívnym zabránením oscilovať optickému signálu tam a späť. K tomu slúži Q-spínač. Energia privedená do aktívneho média čerpaním sa tam potom hromadí (population inversion), keďže svetelný signál len v malom množstve interaguje s aktívnym prostredím. Množstvo uloženej energie je často obmedzené spontánnou emisiou, najmä pri nepretržitom čerpaní, v iných prípadoch je obmedzené vznikom parazitného laserového žiarenia alebo zosilnenej spontánnej emisie.



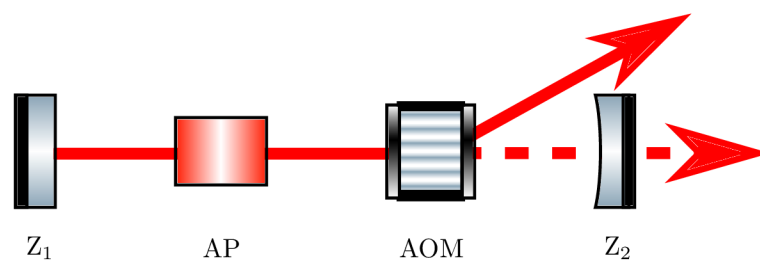
Obr. 2.6: Časový vývoj zisku a strát Q-spínač laseru s akusticko-optickým modulátorom. Prevzaté z [63] a upravené.

Po nahromadení dostatočného množstva energie v aktívnom prostredí sú následne straty rezonátora náhle znížia na nízku hodnotu opätovným vyradením Q-spínača, takže energia uložená v aktívnom prostredí náhle podľahne spontánnej emisii laserového žiarenia, ktoré môže veľmi rýchlo opustiť rezonátor v krátko trvajúcim a vysoko energetickým pulze, obrázok 2.6. Tento proces je zvyčajne sprevádzaný pukavým zvukom spontánnej emisie. Ako sme si vyššie uviedli k modulácii činiteľa akosti slúži Q-spínač. Poznáme dva princípy fungovania Q-spínačov. Prvým princípom je aktívne Q-spínanie, ktorého Q-spínač môžu byť založený napríklad na zmene polarizácie žiarenia, kedy len konkrétne polarizované svetlo môže opustiť rezonátor, obrázok 2.7. [12, 14]



Obr. 2.7: Schéma laseru s použitím aktívneho Q-spínania za pomoci polarizačného Q-spínača, niekedy nazývaného aj Pockelsov spínač, kde Z_1 a Z_2 sú nepriepustné zrkadlá, AP je aktívne prostredie, PD je polarizačná doštička a DLZ je delič laserového zväzku. Prevzaté z [12] a upravené.

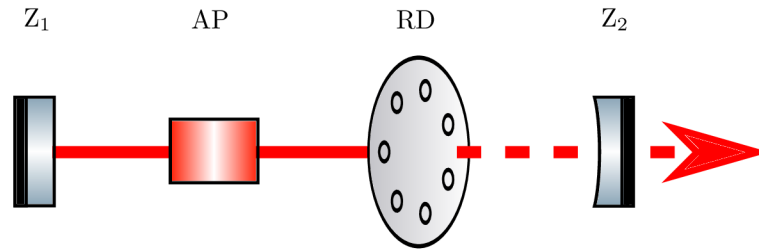
Ďalej môže byť Q-spínač založený na zmene indexu lomu, deflektovať laserový lúč mimo laserového rezonátora akusticko-optickým modulátorom (AOM) a tým spôsobovať laserovému rezonátoru vysokú hodnotu strát, obrázok 2.8.



Obr. 2.8: Schéma laseru s použitím aktívneho Q-spínania za pomoci AOM, kde Z_1 a Z_2 sú nepriepustné zrkadlá a AP je aktívne prostredie. Prevzaté z [12] a upravené.

2.4. SVETELNÝ ZDROJ A MODULÁCIA SIGNÁLU

Taktiež môže laserový rezonátor obsahovať rotujúci disk s otvormi, ktorý straty rezonátora spôsobuje tienením disku pri rotácii, obrázok 2.9.



Obr. 2.9: Schéma laseru s použitím aktívneho Q-spínania za pomoci rotačného disku s otvormi, kde Z_1 je nepriepustné zrkadlo, AP je aktívne prostredie, RD je rotačný disk s otvormi a Z_2 je polopriepustné zrkadlo. Prevzaté z [12] a upravené.

Druhým princípom je pasívne Q-spínanie. Jedna z metód pasívneho Q-spínania je použitie saturovateľného absorbéra, čo je materiál, ktorého priepustnosť sa zvýši, keď intenzita žiarenia prekročí určitú hranicu. Výhodou pasívneho Q-spínania je absencia potreby ovládať Q-spínač, ale sú menej variabilné a preto sú vhodné len pre špecificky zamerané aplikácie.

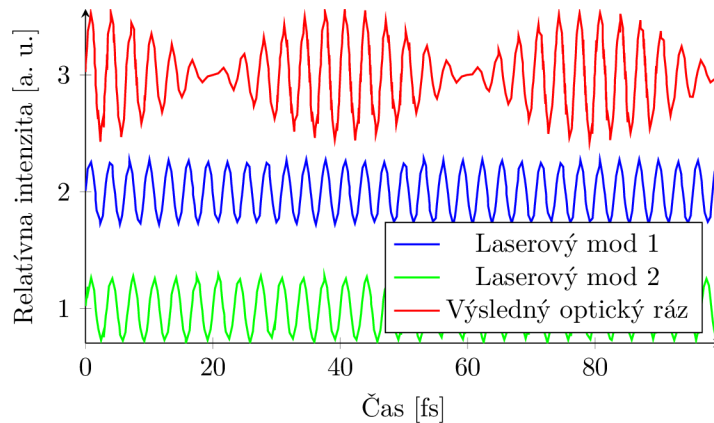
Q-spínanie sa využíva v systémoch LiDAR pre diaľkové skenovanie, ktorých optická dráha je väčšia ako 100 m. Pri skenovaní menšej vzdialenosti nie je potrebné využívať metódy Q-spínania, takže pri komerčných LiDARoch napríklad v automobilovom priemysle sa používa technológia pulzného čerpania.[4, 12]

Pulzné čerpanie

Pulzné čerpanie funguje na báze pulzného dodávania energie aktívnemu prostrediu napríklad svetelnou výbojkou, iným pulzným laserom alebo diódovým laserom. Pulzné čerpanie sa v minulosti používalo pri laseroch na báze farebného pigmentu vo forme kvapalného roztoku, ktorého vybudovaný energetický stav aktívneho prostredia sa udrží len zopár nanosekúnd a následne túto energiu vyžiari vo forme pulzu. LiDARy používajúce laser s pulzným čerpaním sa používajú najmä na ozometriu.[4, 10]

Laser so synchronizáciou módov

Laser so synchronizáciou módov (Mode-locking laser, ML laser) využíva superpozíciu (interferenciu) pozdĺžnych módov laseru k vytvoreniu optických rázov, zobrazenom na obrázku 2.10. Čerpanie synchronizáciou módov je schopné vyžarovať extrémne krátke pulzy v trvaní od 10^{-15} s do 10^{-12} s. Príkladom vhodného materiálu pre aktívne prostredie je titánom dopovaný, umelo vypestovaný zafír (Ti:sapphire), ktorý môže produkovať pulzy trvajúce len niekoľko femtosekúnd. ML čerpanie je najuniverzálnejším nástrojom na výskum procesov vyskytujúcich sa v extrémne krátkych časových intervaloch. Vďaka veľkému výkonu pulzu sa taktiež využívajú v ablačných aplikáciách.[12]



Obr. 2.10: Princíp superpozície dvoch pozdĺžnych modov laseru. Prevzaté z [4] a upravené.

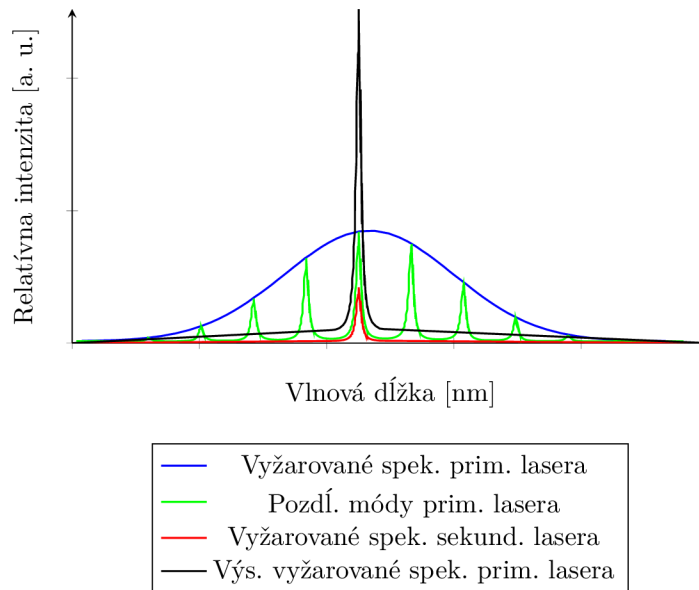
2.4.4. Seeding a zosilňovače

Pri používaní laserov s vysokým výkonom dochádza prevažne k problému s kvalitou svetelného signálu (signál obsahuje nežiadúci šum) alebo problémom so správnou spektrálnou šírkou žiarenia. Naopak ak chceme použiť laser s týmito kvalitami sú výkony takýchto laserov často nepostačujúce pre správne fungovanie systémov LiDAR. Tieto nedostatky sa v bežnej praxi riešia dvoma metódami.

Injektovanie

Injektovanie (Injection seeding, IS) je technika, ktorá sa používa u pulzných laseroch a optických parametrických oscilátoroch, zvyčajne s hlavným cieľom dosiahnuť emisiu s užšou spektrálnou čiarou pri vysokom výkone lasera. V podstate to znamená, že dopujeme aktívne prostredie primárneho lasera energiou z jedného alebo viacerých sekundárnych laserov s nízkym výkonom, ale zato kvalitným lúčom s úzkou spektrálnou čiarou. Zvyčajne sú sekundárne lasery jednofrekvenčné, t.j. existuje v jednom pozdĺžnom móde a pracujúce v kontinuálnom režime. Bez dopovania by hlavný laser alebo optický parametrický oscilátor normálne vyžaroval vo viacerých frekvenciách rezonátora, keďže rôzne vlnové dĺžky hlavného lasera nadobúdajú rôzne pozdĺžne módy a energia sa rozdeľuje medzi všetky tieto pozdĺžne módy primárneho lasera. To vedie k nerovnomernej distribúcii energie medzi jednotlivé pozdĺžne módy, čo má za následok kolísanie energie od jedného pulzu k druhému. Ak však frekvencia sekundárneho lasera bude dostatočne blízka rezonančnej frekvencii jedného konkrétneho pozdĺžneho módu primárneho lasera, tento pozdĺžny mód sa stane dominantným s oveľa vyšším výkonom ako všetky konkurenčné pozdĺžne módy, a preto môže silne dominovať vo výstupnom pulze, obrázok 2.11. Touto metódou dosiahneme emisiu lasera s úzkou spektrálnou čiarou a stabilnými pulzmi.[12]

2.4. SVETELNÝ ZDROJ A MODULÁCIA SIGNÁLU

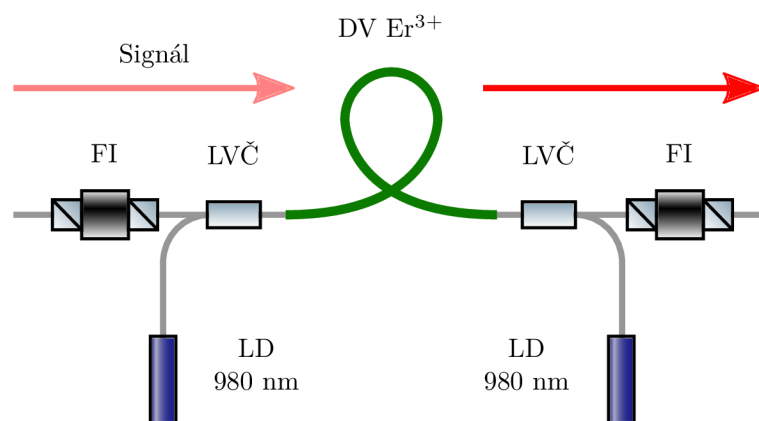


Obr. 2.11: Princíp fungovania IS.

Druhou metódou ako získať kvalitný signál s úzkou spektrálnou čiarou a zároveň s vysokým výkonom je použitie optického zosilňovača. Existuje niekoľko rôznych fyzikálnych mechanizmov, ktoré možno použiť na zosilnenie svetelného signálu.

Vláknový zosilovač

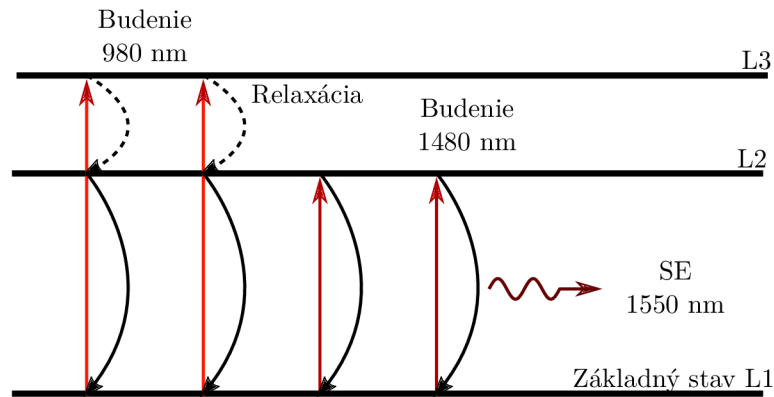
Vláknový zosilovač je založený na zosilňovacom médiu v optickom vlákne. Vo väčšine prípadov je zosilňovacím médiom sklenené vlákno dopované iónmi vzácnych zemín, ako je erbium (EDFA=erbium dopované vlákno zosilňovač), neodým, ytterbium (YDFA), prazeodým alebo thulium. Tento aktívny dopant je čerpaný (dopovaný energiou) zo svetla čerpaceho lasera zosilňovača, akým je napríklad diódový laser s vláknovou väzbou. Takmer vo všetkých prípadoch sa svetlo čerpaceho lasera zosilňovača šíri jadrom vlákna spolu so signálom, ktorý sa má zosilniť.



Obr. 2.12: Schéma zapojenia vláknového zosilovača čerpaním laserom o vlnovej dĺžke $\lambda=980$ nm, kde FI je Faradayou izolátor, LVČ je laserový väzbový člen a LD je laserová dióda. Prevzaté z [12] a upravené.

K zosilneniu signálu dochádza, keď signál laseru s nízkym výkonom, ale kvalitným signálom, prechádza zosilňovacím médiom, ktoré je čerpané čerpacím laserom, napríklad v prípade erbium dopovaným vláknovým zosilňovačom je to diódový laser o vlnovej dĺžke 1480 nm alebo 980 nm, ako je znázornené na obrázku 2.12. Čerpací laser vybudzuje voľné elektróny zosilňovacieho média na vyššiu požadovanú energetickú hladinu L2 v prípade lasera s vlnovou dĺžkou 1480 nm,

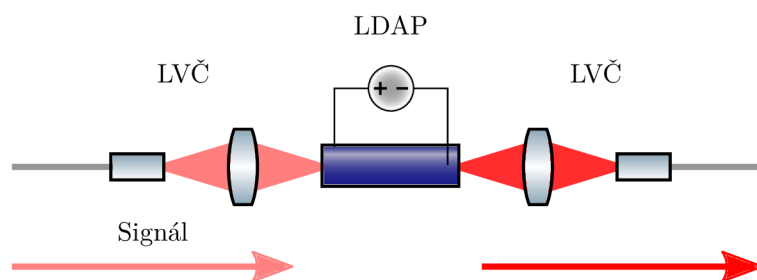
na ktorých pretrvávajú, obrázok 2.13. Môžu sa vybudíť ešte na vyššiu energetickú úroveň L3 použitím lasera s vlnovou dĺžkou 980 nm, kedy elektróny relaxujú a klesajú následne na požadovanú energetickú L2 hladinu. Tieto voľné elektróny sú následne zasiahnuté fotónmi hlavného lasera s vlnovou dĺžkou 1550 nm a klesajú do základnej energetickej hladiny, pričom emitujú fotón v taktiež vlnový dĺžke 1550 nm. Takáto stimulovaná emisia má za následok lavínový efekt, ktorá vedie k zosilneniu signálu.[12]



Obr. 2.13: Jablonského diagram popisujúci priebeh čerpania EDFA, kde SE je stimulovaná emisia. Diagram popisuje čerpanie laserom o vlnovej dĺžke 980 nm a 1480 nm. Prevzaté z [64] a upravené.

Polovodičový zosilovač

Ďalším typom zosilňovača je polovodičový optický zosilňovač, u ktorých mechanizmom zosilnenia je rekombinácia elektrón-diera. Zosilňovacím médiom u polovodičových optických zosilňovačov je polovodičové zosilňovacie médium. Je to v podstate laserová dióda spojená s vláknom, kde boli koncové zrkadlá nahradené antireflexnými vrstvami. Na ďalšie zníženie koncovej odrazivosti možno použiť aj naklonený vlnovod. Signál je privádzaný do polovodičového zosilňovača s priečnymi rozmermi napr. 1 μm až 2 μm a dĺžkou rádovo 0,5 mm až 2 mm. Vlnovod lasera je napojený na polovodičový optický zosilňovač a výrazne sa prekrýva s aktívnou (zosilňovacou) oblasťou, ktorá je čerpaná elektrickým prúdom. Elektrický prúd vytvára určitú hustotu voľných elektrónov, ktoré sa po interakcii s fotónom následne rekombinujú s dierami a uvoľňujú tak ďalšie fotóny, obrázok 2.14.[12]



Obr. 2.14: Schéma zapojenia polovodičového zosilovača, kde LVČ sú laserové väzbové členy a LDAP je laserová dióda s antireflexnými povrchmi. Prevzaté z [12] a upravené.

Ramanovský zosilovač

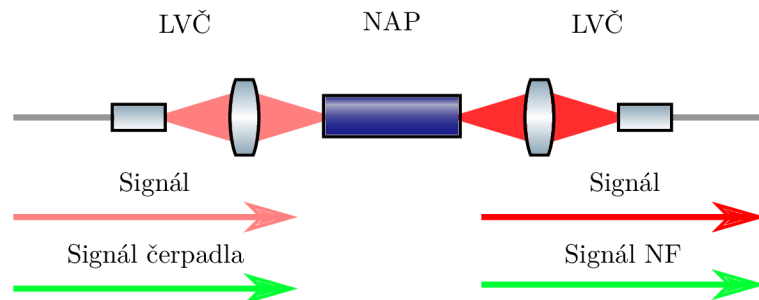
Ramanovský zosilňovač je optický zosilňovač založený na Ramanovom zosilnení, ktorý je výsledkom efektu stimulovaného Ramanovho rozptylu. Aktívne prostredie Ramanovského zosilovača môže byť optické vlákno (zvyčajne vysoko nelineárne vlákno), pevnolátkový kryštál, zosilňovač s plynným, alebo kvapalným aktívnym médiom. Schémou pripomína vlákňový zosilovač. Vstupný signál môže byť zosilnený pri súbežnom alebo proti bežnom chode s laserovým zväzkom čerpajú-

2.4. SVETELNÝ ZDROJ A MODULÁCIA SIGNÁLU

ceho laseru. Vlnová dĺžka čerpajúceho laseru je zvyčajne o niekoľko desiatok nanometrov kratšia, tým pádom má fotón vyššiu energiu. Pri kontakte fotónu čerpajúceho laseru s elektrónom, vybudí fotón tento elektrón na vyššiu energetickú hladinu, ktorá však nie je pre elektrón stabilná a pri následnej interakcii s fotónom signálu z hlavného laseru dochádza k prepadu elektrónu do vibračného pásma, pričom sa vylúči fotón s nižšou energiou a väčšou vlnovou dĺžkou, ktorý zosilňuje signál hlavného laseru. Princíp fungovania je podobný vláknovému zosilňovaču, až na ten rozdiel, že vláknový zosilovač potrebuje pre chod dopované vlákno napr. erbiom, naopak Ramanov zosilovač dopovaný materiál nepotrebuje a spolieha sa na stimulovaný Ramanovský rozptyl.[12, 15]

Parametrický zosilovač

Kryštálové materiály bez inverznej symetrie môžu vykazovať takzvanú $\chi(2)$ nelinearitu. Okrem zdvojenia frekvencie a generovania súčtu a rozdielu frekvencií, taktiež umožňuje táto vlastnosť parametrické zosilnenie, obrázok 2.15. Tu sa lúč signálu šíri cez kryštál spolu s lúčom čerpajúceho laseru s kratšou vlnovou dĺžkou. Fotóny čerpajúceho laseru sa potom v dôsledku $\chi(2)$ nelinearity premenia na signálne fotóny (menej energetické) a rovnaký počet tzv. nečinných fotónov. Keďže energia žiarenia čerpadla je plne premenená na energiu zosilňujúcu signál hlavného laseru a signál nečinných fotónov, kryštálový materiál zosilňovača sa pri procese nezohrieva.[12]



Obr. 2.15: Schéma zapojenia parametrického zosilovača, kde LVČ sú laserové väzbové členy, NAP je nelineárne aktívne prostredie a NF sú nečinné fotóny. Prevzaté z [12] a upravené.

2.4.5. Lasery používané v systémoch LiDAR

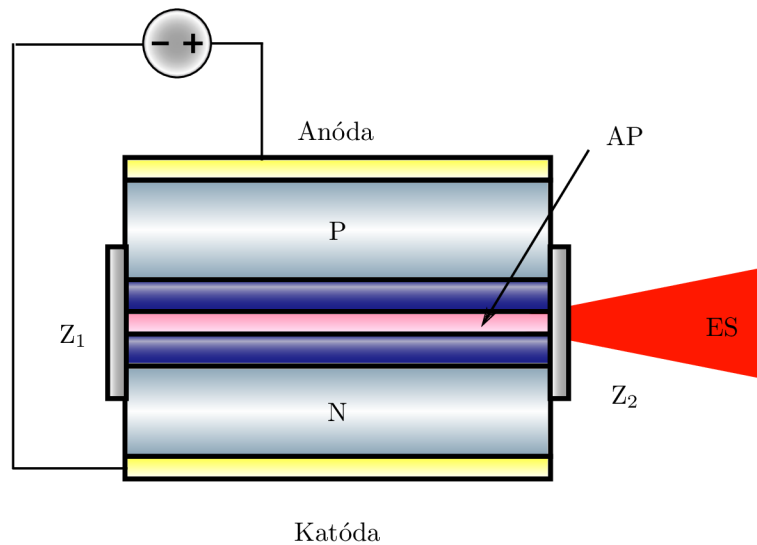
Z počiatku sa používali CO_2 lasery, keďže sa v tej dobe Nd:YAG lasery používali len ako laserové označovače vo vojenskom priemysle. CO_2 lasery boli čerpané svetelnými výbojkami, ktoré však neboli natoľko účinné a pre požiadavky systémov LiDAR neboli vhodné. V súčasnosti sa ako čerpadlá začali využívať diódové lasery alebo príbuzný typ tzv. kvantový kaskádový laser. Diódové a kvantové kaskádové lasery vo väčšine prípadov plnia úlohu čerpadla pre pevnolátkové lasery, keďže sú čerpané elektrickým prúdom, časť 2.4.5 V niektorých prípadoch sa môžu používať aj ako samotný svetelný zdroj. Diódové lasery dosahujú najvyššej účinnosti spomedzi všetkých typov laserov využívaných v systémoch LiDAR. Nedávno sa začali používať aj tzv. kaskádové diódové lasery, ktoré sa používajú hlavne ako svetelný zdroj pre systémy operujúce v infračervenom vlnovom spektre MWIR a LWIR. Ak má diódový laser úzku šírku spektrálnej čiary, je možné ho použiť pre generovanie modulovaného signálu ako napr. chirp signal alebo pseudonáhodne kódovaného signálu, časť 2.4.6.[4]

Medzi základné typy diódových laserov patria:

Hranovo-emitujúce lasery

Hranovo-emitujúce lasery (Edge-emitting Lasers, EEL) sú pôvodnou, ale zato stále populárnou

formou diódových laserov. Dĺžka ich rezonátora je zvyčajne medzi niekoľkými stovkami mikrometrov až niekoľkými milimetrami. To postačuje na dosiahnutie vysokého zosilnenia, takže EEL laser môže vyžarovať svetlo, aj keď sú straty rezonátora dosť vysoké. Konštrukčne teda umožňuje použitie koncových plôch rezonátora, ktoré nie sú potiahnuté reflexnou optickou vrstvou a dochádza len k Fresnelovmu odrazu na rozhraní polovodič-vzduch, obrázok 2.16. V rámci štruktúry EEL lasera je laserový zväzok vedený v štruktúre vlnovodu. Bežne sa používa dvojitá heteroštruktúra, ktorá sústreďuje generované nosiče (elektróny a diery) na úzku oblasť a zároveň slúži ako vlnovod. Takéto usporiadanie vedie k nízkemu prahovému výkonu čerpadla a vysokej účinnosti. V závislosti od vlastností vlnovodu, najmä jeho pričných rozmerov, je možné dosiahnuť buď výstupu s vysokou kvalitou lúča, ale obmedzeným výstupným výkonom (niekoľko stoviek miliwattov), alebo (pri širokoplošnej laserovej dióde) výstup s vysokým výstupným výkonom (10 W až 100 W), ale so zlou kvalitou lúča. Nevýhodou EEL je aj geometria výstupného lúča, ktorú je potrebné kompenzovať dodatočnou valcovou optikou.[12]

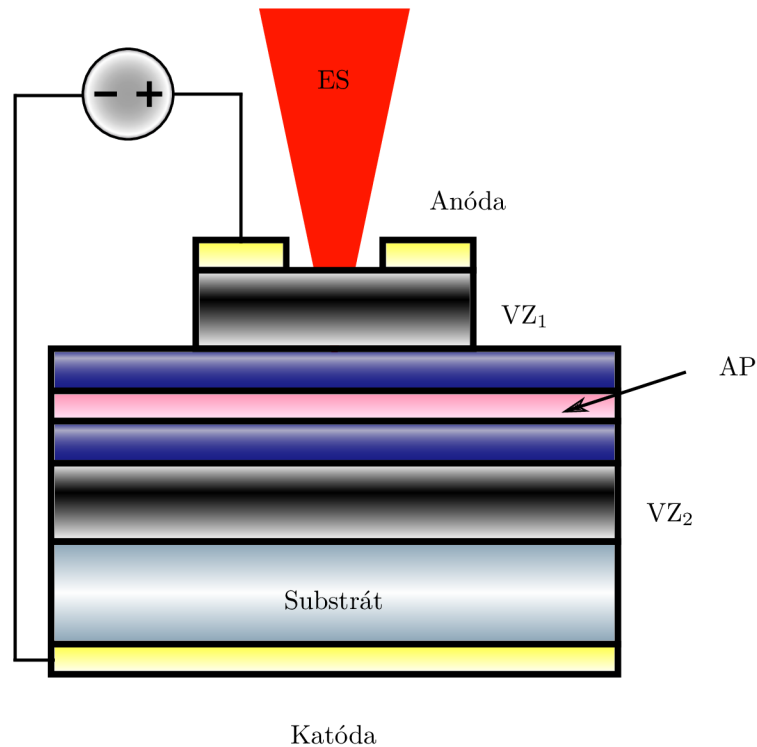


Obr. 2.16: Pričný rez EEL, Z_1 je nepriepustné zrkadlo, Z_2 je polopriepustné zrkadlo, AP je aktívne prostredie a ES je emitovaný signál. Prevzaté z [65] a upravené.

Lasery s vertikálnou kavitou

Lasery s vertikálnou kavitou (Vertical cavity lasers, VCL) sú laserové diódy s monolitickým laserovým rezonátorom, znázorneným na obrázku 2.17, kde vyžarované svetlo opúšťa zariadenie v smere kolmom na povrch čipu. Rezonátor (dutina) je realizovaný dvoma polovodičovými Braggovými zrkadlami. Medzi nimi je aktívne médium s typicky niekoľkými kvantovými jamami a celkovou hrúbkou len niekoľko mikrometrov. Vo väčšine prípadov je aktívne médium elektricky čerpané niekoľkými desiatkami miliwattov a generuje výstupný výkon v rozsahu od 0,5 mW do 5 mW alebo vyšší výkon pre multimódové zariadenia. Prúd sa často aplikuje cez prstencovú elektródu, cez ktorú následne výstupuje žiarenie. Prúd prstencovej elektródy je privedený do oblasti optického rezonátora pomocou elektricky vodivých zrkadlových vrstiev s izolačným materiálom okolo nich.[12]

2.4. SVETELNÝ ZDROJ A MODULÁCIA SIGNÁLU



Obr. 2.17: Priečný rez VCL, kde VZ_1 a VZ_2 sú vrstvy polopriepustných zrkadiel, AP je aktívne prostredie a ES je emitovaný signál. Prevzaté z [65] a upravené.

Kvantové kaskádové lasery

Kvantové kaskádové lasery (Quantum cascade lasers, QCL) sú špeciálnym druhom polovodičového lasera, ktorý vyžaruje v infračervenom vlnovom spektre MWIR. Takýto typ diódového lasera nepracuje na princípe prechodov elektrónov medzi rôznymi energetickými hladinami ako u klasických diódových laserov, ale na princípe subpásmových prechodov elektrónov polovodičovou heteroštruktúrou. Pri svojom fungovaní využíva mnoho fyzikálnych fenoménov akými sú: kvantovanie stavov v kvantových jamách, tunelovanie, žiarivé a nežiarivé energetické prechody, stimulovaná emisia. Použitím niekoľkých desiatok alebo dokonca 100 kvantových jám v sérii (kaskáda) sa získa vyšší optický zisk na úkor vyššieho elektrického napätia. Prevádzkové napätie môže byť rádovo v desiatkách voltov, pričom pre bežné laserové diódy stačí niekoľko voltov.[16, 17]

Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery (Solid-state lasers) Nd:YAG boli jedny z prvých pevnolátkových svetelných zdrojov použitých pre systémy LiDAR. Nd:YAG lasery zvyčajne pracujú v okolí vlnovej dĺžke 1064 nm. Oko túto vlnovú dĺžku svetla nevidí, ale dokáže ho fokusovať na sietnicu, ktorú môže vážne poškodiť. Hranica poškodenia je cca 10 000 krát nižšia ako pri svetle o vlnovej dĺžke 1,5 μm a viac, ktoré nemôže preniknúť do oka a fokusovať sa na sietnicu. Typickým príkladom lasera operujúceho vo vlnovej dĺžke 1,5 μm je pevnolátkový laser Er: YAG. Ďalšími prípad pevnolátkových laserov je Tm:YAG alebo HoTm:YAG, ktoré operujú ešte vo väčších vlnových dĺžkach okolo 2 μm . Nedávno sa objavila jedinečná trieda aktívnych medií dvojmocných prechodových prvkov, z ktorých je najrozvinutejší dvojmocný chróm Cr^{2+} , ktorý je dopovaný v ZnSe. Rovnako ako u Ti:safíru, vibračné prechody vedú k veľmi širokým spektrálnym čiarom v oblasti MWIR, okolo 2500 nm. V prípade Cr:ZnSe sa vlnové dĺžky pohybujú od približne 2000 do 3500 nm. Typickým pevnolátkovým laserom je vláknový laser cylindrického tvaru s aktívnym médiom obklopeným plášťom. Optické vlákno má malý prierez, čo obmedzuje dostupný maximálny výkon

vo vláknových laseroch. V poslednej dobe sú však vyvíjané vlákna z fotonického kryštálu, ktoré umožňujú laseru dosahovať vyšších výkonov pri udržaní jedného priečného módu, bez neželaných vznikov priečných modov a nelineárneho chovania žiarenia vo vlákne ako napr. Brillouinov a Ramanov rozptyl, ktoré môžu výrazne ovplyvniť kvalitu signálu. Kvôli vysokej kvalite signálu a obmedzeniu výkonu žiarenia vo vlákne sú vláknové lasery dobré predovšetkým pre LiDARy s vyššou frekvenciou opakovania pulzov alebo pre kontinuálne LiDARy, časť 2.4.6. Vláknové lasery môžu dosahovať 30 % účinnosť a stále sa stávajú viac a viac populárne v systémoch LiDAR nielen kvôli účinnosti, ale aj pre jednoduchú manipuláciu. Materiály aktívneho média je možné použiť vo forme vlákna a umožňujú fungovanie v režime Q-spínania.[4, 12, 18]

2.4.6. Modulácia signálu

Výber laseru pri návrhu svetelnej jednotky musíme tak isto podmieniť požiadavkom na moduláciu signálu. Existuje mnoho možností ako môžeme signál modulovať a získavať z neho po detekcii informáciu o polohe, rýchlosti, alebo zložení skenovaného objektu. Medzi najbežnejšie používané metódy modulácie signálu patria nasledujúce metódy.

LiDAR s priamou detekciou

Prvou metódou je priama detekcia svetelného pulzu, ktorá meria vzdialenosť skenovaného objektu na základe merania času jedného pulzu od emitácie až po detekciu na detektore. Pri používaní LiDAR s priamou detekciou si našli uplatnenie lasery s možnosťou Q-spínania. Laser s Q-spínaním umožňuje uchovávať veľké množstvo energie v laserovom aktívnom médiu počas určitého časového obdobia a potom celé množstvo kumulovanej energie uvoľniť vo forme jediného vysoko energetického pulzu. Príkladom môže byť Nd:YAG laser, ktorý kumuluje energiu až 220 ms a následne dokáže vyžiariť všetkú energiu v pulze s trvaním niekoľko nanosekúnd, dosahujúc 100 000-násobnú pulznú kompresiu. Podobnú pulznú kompresiu dosahujú aj diódové lasery, ktoré 220 ms kompresiu vyžiaria v pulze s trvaním približne 2 ns.[4]

Druhou metódou modulácie sú LiDARy pracujúce s kontinuálnym signálom, ktorý za pomoci modulátora signálu (napr. Mach-Zehnderov modulátor) moduluje signál do požadovanej formy. Pri LiDARoch s kontinuálnym signálom je väčšinou potrebné, aby navrhovaný systém obsahoval lokálny oscilátor a zmiešavač signálu. Potreba týchto komponent je podmienená faktom, že pri kontinuálnom signále môže systém sledovať frekvenčnú zložku, ale aj fázor frekvencie signálu, ktoré umožňujú lepšie získavať informácie o skenovanom objekte, ako u pulzných LiDARov.

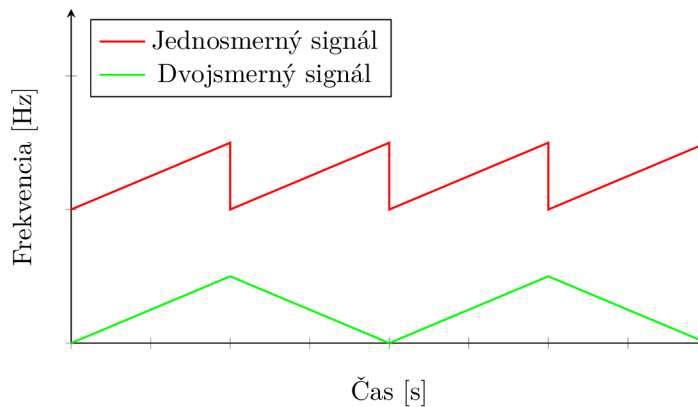
Polypulzný signál

Polypulzný signál spočíva vo vyžarovaní dvoch krátko po sebe idúcich pulzov s rovnakou počiatočnou fázou, ktorých vzájomný časový rozstup nesmie presahovať koherenčnú dĺžku lasera. Metóda umožní presné meranie ako vzdialenosti, tak aj rýchlosti skenovaného objektu počas jedného skenovacieho cyklu. Príkladom by mohli byť dva 1-ns pulzy s časovým rozstupom 10 ms. Takto nastavený signál poskytujúce rozlíšenie vzdialenosti na 0,15 μm s možnosťou rozlíšiť rýchlosť objektu na 7,5 cm/s pri použití svetla s vlnovou dĺžkou 1,5 μm . [4, 19]

Lineárna modulácia frekvencie

Metóda lineárnej modulácie frekvencie (Linear Frequency Modulation, LFM) spočíva v generovaní sínusového signálu, ktorého okamžitá frekvencia v čase lineárne rastie v jednom skenovacom cykle, alebo aj klesá podľa zvoleného tvaru signálu, obrázok 2.18.

2.5. MECHANICKÉ METÓDY SKENOVANIA



Obr. 2.18: Príklad jednosmerného a dvojsmerného signálu lineárne modulovanej frekvencie. Prevzaté z [4] a upravené.

Po návrate signálu na detektor, zmiešame detekovaný signál so signálom lokálneho oscilátora vo frekvenčnom zmiešavači. Produktom zmiešavača je signál s lineárnou frekvenciou a známou počiatočnou fázou, ktorý po prevedení Fourierovej transformácie môžeme priradiť konkrétnej vzdialenosti alebo viacerým vzdialenostiam, pokiaľ sa jedná o signál s viacerými echami. Rýchlosť objektu môžeme opäť ako u polypulzného signálu vyčítať z rozdielu počiatočných fázy dvoch po sebe idúcich skenovacích cyklov na výstupe z frekvenčného zmiešavača.[4, 20]

Pseudo-náhodne kodovaný signál

Pseudo-náhodne kodovaný signál (Pseudo-random Coded signal, PCS) je metódou modulovania signálu koherentného, kontinuálneho LiDARu. Princíp fungovania spočíva v generovaní PCS, ktorého detekcia a následný signál procesing umožňuje filtrovať šum pozadia od signálu.[21]

LiDAR s RF moduláciou (RF Modulation of Lidar, RFM LiDAR)

S rozmachom optických telekomunikačných systémov, je v dnešnej dobe možné modulovať a detekovať amplitúdu optického signálu s frekvenciou desiatok gigahertzov, čo odpovedá mikrovlnnému spektru žiarenia. Je potrebné si uvedomiť, že signál takto modulovaného LiDARu, ktorý operuje napríklad v infračervenom spektre (1,5 μm), dosahuje fázovej frekvencie až 200 THz. Dnešnými detektormi nie je možné detegovať, pri kontakte svetelného signálu s pohybujúcim sa objektom, frekvenčný posun, spôsobený Dopplerovým javom. Ale pri modulácii amplitúdy signálu na frekvenciu napríklad 10 GHz, je možné detegovať frekvenčný posun modulovanej amplitúdy podobne ako u RaDARov. Výhodou použitia RFM LiDARu je, že systém nemusí obsahovať lokálny oscilátor a zmiešavač signálu nato, aby bol schopný detegovať ako polohu, tak aj rýchlosť skenovaného objektu.[4, 22]

2.5. Mechanické metódy skenovania

Skenovacie jednotka má za úlohu vychyľovať svetelný lúč do požadovaného smeru v priestore skenovanej roviny vo forme skenovacej vzorky. Medzi niektoré mechanické metódy vychyľovania svetelného lúča používané v systémoch LiDAR patria:

2.5.1. Rýchlo polohovateľné zrkadlo

Rýchlo polohovateľné zrkadlo (Fast-steering mirrors, FSM) zobrazené na obrázku 2.19, sú rovinové zrkadlá, ktoré sa za pomoci elektromotorov môžu veľmi rýchlo nakláňať o malé uhly. Dopadajúci svetelný lúč sa pri dopade na rovinu plochu zrkadla riadi zákonom odrazu svetla

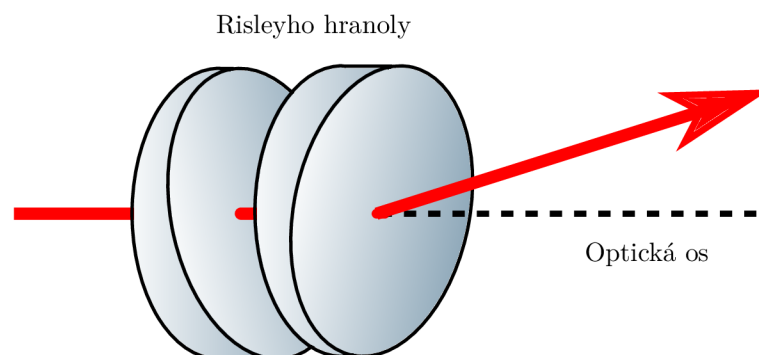
t.j. uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu, takže nakláňaním zrkadla môžeme smerovať svetelný Lúč ľubovoľným smerom. Problémom takýchto zrkadiel je, že čím väčšie zrkadlo použijeme, tým viac energie musíme vynaložiť na jeho nakláňanie, zároveň väčšie zrkadlá majú väčšiu hybnosť, čo spôsobuje pomalšie nakláňanie, preto existuje kompromis medzi veľkosťou zrkadla a rýchlosťou nakláňania. FSM dosahujú bežné frekvenciu polohovania > 1 KHz s dobou ustálenia sa v polohe ≈ 6 ms. Výhodou FSM je nízka cena, veľmi jednoduchá ovládateľnosť s možnosťou vytvárania rôznych skenovacích vzoriek. Na druhej strane nevýhodou je pomerne nízka frekvencia polohovania.[23, 24]



Obr. 2.19: Príklad zostavy dvoch FST, slúžiacich na skenovaní v dvoch na seba kolmých osiach. Prevzaté z [66].

2.5.2. Risley hranoly

Risleyho hranoly sú systémy dvoch alebo viacerých klinových hranolov, ktoré možno použiť na nepretržité vychyľovanie svetelného lúča, obrázok 2.20. Skenovacia technika je vhodná na vychyľovanie svetelného lúča nepresahujúceho priemer 100 mm s možnosťou širokohlábového skenovania, pričom nedochádza ku skresleniu svetelnej stopy. Proces skenovania je čisto mechanický (rotačný) a prebieha vzájomným natáčaním jednotlivých hranolov okolo optickej osi.

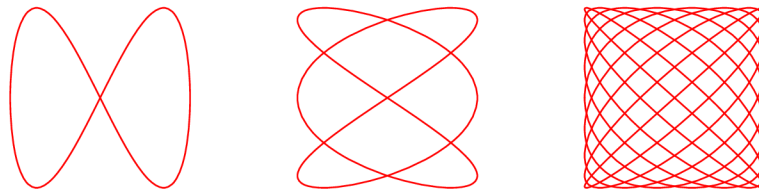


Obr. 2.20: Použitie dvoch Risleyho klinových hranolov k vychyľovaniu svetelného lúča.

Riadenie pomocou týchto hranolov je vo svojej podstate nelineárne. Vychýlka svetelného lúča je opísaná sínusom a kosínusom uhlov vzájomnej orientácie optických klinových hranolov a svetelného lúča. Použitie Risleyho hranolov je koncepčne pomerne jednoduché, ale zložité na mechanické návrhy a riadiace algoritmy. Klasický pár Risleyho hranolov má dva rovnaké hranoly

2.5. MECHANICKÉ METÓDY SKENOVANIA

s indexom lomu n . Výslednými skenovacími vzorkami sú Lissajousové krivky, znázornené na obrázku 2.21.[23, 25]



Obr. 2.21: Príklady Lissajouových krivok. Prevzaté z [67].

2.5.3. Zrkadlové n-uholníky

Ďalšou metódou skenovania je použitie zrkadlových n -uholníkov (Rotating polygonal mirrors, RPM), obrázok 2.22. Šestuholník, ktorý má 6 strán, ktorému jednej strane je vyhradených 60 stupňov, bude schopný skenovať svetelným lúčom až do uhlu 120 stupňov, pretože uhol odrazu lúča od optickej plochy je vždy dvojnásobkom uhlu natočenia RPM. Čím viac strán má RPM, tým menší je uhol skenovania, ale zároveň musí byť fyzicky väčší, pretože na rohoch stien dochádza k rozdrobeniu laserového zväzku. Takéto rozdrobenie laserového zväzku považujeme za straty signálu, je však možné tieto straty kompenzovať nevyužívaním celej odrazovej plochy steny RPM, kedy laserom neosvetľujeme plochu steny RPM pri prechode svetelného lúča z jednej steny na druhú. Veľkosť laserového zväzku v porovnaní s dĺžkami jednotlivých strán polygónu poskytujú predstavu o miere účinnosti skenovania. Ďalšou nevýhodou používania RPM je skutočnosť, že stred rotácie nie je na povrchu zrkadlovej steny, čo spôsobuje mierne posúvanie svetelného lúča sem a tam. Použitie jedného RPM zaručuje skenovanie v jednej dimenzii. Pokiaľ chceme skenovať v dvoch rozmeroch musíme použiť sústavu dvoch na seba kolmých RPM alebo RPM s rôzne naklonenými jednotlivými stenami voči radiálnej rovine RPM, kedy každá jedna stena odpovedá jednému riadku skenu.[23]



(a) Precízny RPM



(b) Osemuholník

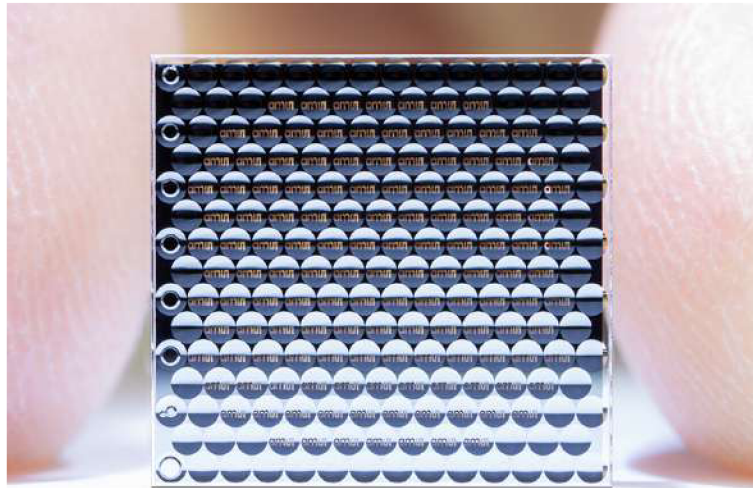
Obr. 2.22: Príklady komerčne vyrábaných RPM. Prevzaté z [68].

2.5.4. Mikroelektrickomechanické systémy

Ďalšou metódou vychyľovania svetelného lúča sú metódy využívajúce mikroelektrickomechanické systémy (MEMS), ktoré tvoria technológiu mikroskopických zariadení umožňujúcich buď transláciu a jej meranie v jednotkách μm alebo náklon a jeho meranie v jednotkách μrad . Medzi najznámejšie metódy patria MEMS mikro šošovkové pole a MEMS zrkadlo.

MEMS mikro šošovkové pole

MEMS mikro šošovkové pole je metóda vychyľovania svetelného lúča za pomoci sústav polí mikro šošoviek, obrázok 2.23. Sústava využíva dve až tri polia mikro šošoviek, ktoré vzájomným priečnym pohybom spôsobujú vyosenie svetelného lúča požadovaným smerom. Tento vzájomný pohyb musí byť nesmierne precízny a preto je zaistený práve systémami MEMS. Precíznosť sa stáva aj nevýhodou takýchto systémov, keďže prípadné jemné otrasy môžu spôsobovať odchýlky od smeru skenovanie. Ďalšou z nevýhod používania poľa s mikro šošovkami je fakt, že svetlo rozkladá medzi mnoho šošoviek. Okraje týchto šošoviek môžu nepriaznivo vplývať na výslednú kvalitu laserového zväzku v dôsledku vnútorných optických vád ako sú absorpcia, odraz alebo rozptyl.[4]

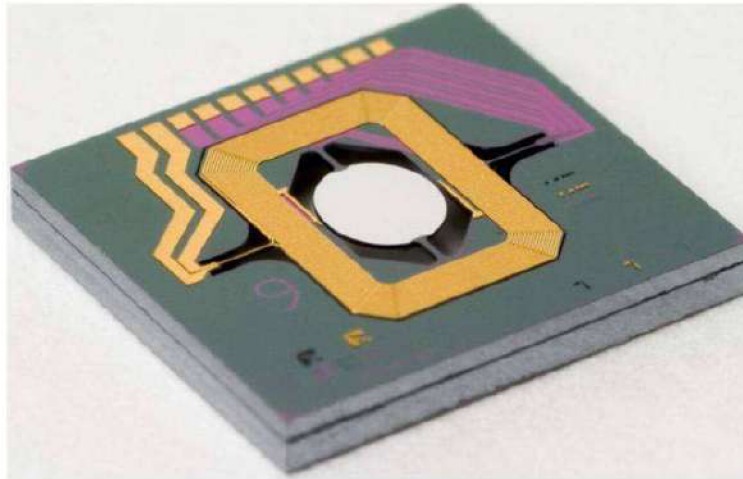


Obr. 2.23: Príklad prevedenia MEMS microlens array. Prevzaté z [69].

MEMS zrkadlo

MEMS zrkadlo je druhou metódou, obrázok 2.24, ktorá využíva možnosti precízneho náklonu MEMS systémov a to tak, že jednoducho samotný MEMS systém nadizajnujú ako zrkadlo s možnosťou náklonu. Takéto mikro zrkadlové zariadenie je následne vychyľované elektromagnetickými poliami generovanými cievkou, ktorá obklopuje zrkadlo. Prúd v cievke vytvára Lorentzovu silu založenú na Flemingovom pravidle ľavej ruky a táto sila uvádza zrkadlo do pohybu. V dnešnej dobe sa stávajú MEMS zrkadlá populárne predovšetkým u systémov LiDAR pre svoju kompaktnosť a rýchlosť skenovania s vysokou presnosťou.[4, 26]

2.6. OPTICKÉ METÓDY SKENOVANIA



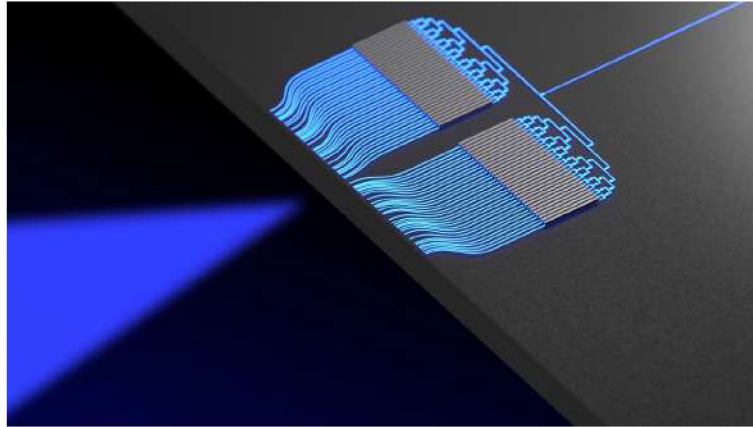
Obr. 2.24: Príklad konštrukčného prevedenia MEMS zrkadla. Prevzaté z [70].

2.6. Optické metódy skenovania

Druhou kategóriou vychyľovania svetelného lúča sú optické metódy. Optické metódy sú v dnešnej dobe stále populárnejšou technológiou, ktorá ešte nedosahuje konkurencieschopnosti v systémoch LiDAR.

2.6.1. Opticky sfázované pole

Prvou metódou je použitie Opticky sfázované pole (Optical phase array, OPA). Myšlienkov OPA je napodobnenie rádiových sfázovaných antén operujúcich s vlnovými dĺžkami v mikrovlnných spektre. Princípom fungovania je vytvoriť pole malých zdrojov svetla, ktoré by mali možnosť modulovať fázu svetla na každom pixeli poľa a tým smerovať svetlo. Tu však dochádza k zásadnému problému s dnešnou technológiou. Na vytvorenie rádiovkej sfázovanej antény operujúceho s vlnovou dĺžkou 3 cm je potreba aby stredy jednotlivých pixelov/elementov antény boli od seba vzdialené na dĺžku polovice vlnovej dĺžky, v ktorej operuje daný phase array. To znamená, že pri použití vlnovej dĺžky 3 cm stačí pixel o veľkosti 1,5 cm. Ak teda chceme navrhnuť mikrovlnný phase array s apertúrou 75 cm stačí nam jeho povrch pokryť približne 2000 až 2500 takýmito pixelmi. Ak by sme však navrhovali phase array operujúci s vlnovou dĺžkou 1,5 μm a apertúrou napr. 30 cm, musel by takýto phase array obsahovať 31 až 160 miliónov pixelov, čo je v dnešnej dobe nerealizovateľné. Konceptuálne sa však už aj dnes vyvíjajú OPA s veľmi malými apertúrami tzv. chip-scale phase arrays, ktoré však zatiaľ nadobúdajú podobu len jednorozmerného pola, čiže jeden riadok pixelov. 2.25.[4, 27, 28]



Obr. 2.25: Príklad jednorozmerného OPA. Prevzaté z [71].

2.6.2. Metóda optického dráhového rozdielu

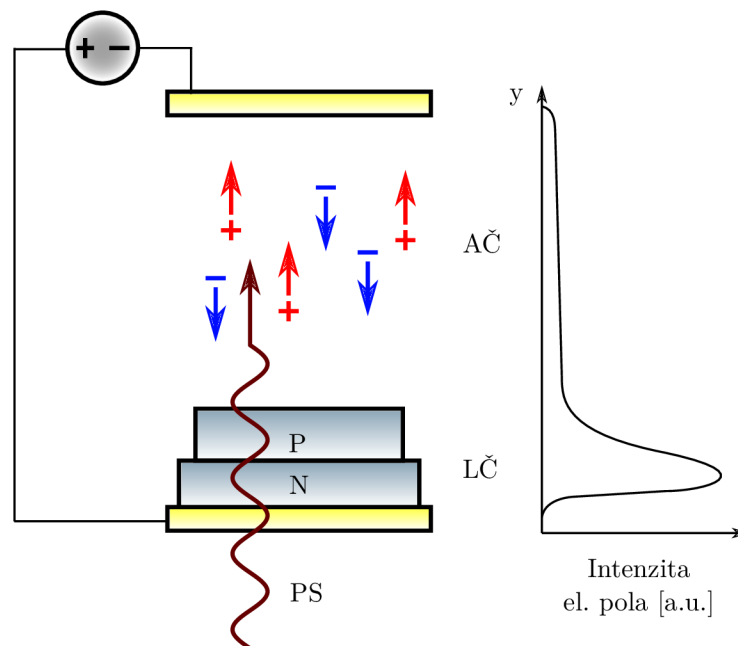
Druhou metódou je použitie tzv. optického dráhového rozdielu (Optical path difference, OPD), v súčasnosti je táto metóda z pohľadu technického pokroku ľahšie realizovateľná a komerčne prístupnejšie. Princípom fungovanie je viesť svetlo cez optické vrstvy, ktoré majú buď možnosť svetlo v rôznych miestach vrstvy pribrzdiť lokálnou zmenou indexu lomu alebo majú možnosť predĺžovania, alebo skracovania optickej dráhy pri prestupe svetla touto vrstvou. Obe tieto metódy majú vo výsledku možnosť takto modulovať lokálne fázu prechádzajúceho svetla na výstupe z optickej vrstvy a tým smerovať svetlo požadovaným smerom.[4]

2.7. Detektory

2.7.1. Lavínové fotodiódy

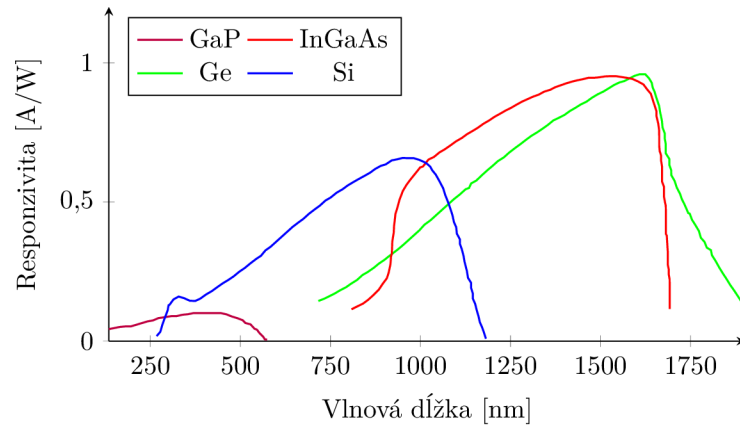
Lavínové fotodiódy (Avalanche photodiodes, AP) je typ polovodičovej fotodiódy, ktorá na rozdiel od klasickej PN fotodiódy pracuje s relatívne vysokým napätím (zvyčajne desiatky až dokonca stovky voltov) aplikovaným tesne pod prieraznou PN vrstvou. V takto vzniknutom elektrickom poli sú elektróny excitované absorbovanými fotónmi v absorpčnej časti a urýchlené späť do tzv. lavínovej časti, kde dochádza k nárazovej ionizácii, ktorá má za následok vznik sekundárnych elektrónov pri tzv. lavínovom procese, obrázok 2.26. Lavínový proces, ktorý môže prebiehať napríklad na vzdialenosť niekoľkých mikrometrov, účinne zosilňuje fotoprúd, aj keď nie tak výrazne ako vo fotonásobiči.

2.7. DETEKTORY



Obr. 2.26: Schéma fungovania AP, kde PS je prichádzajúci signál, AČ je absorpčná časť a LČ je lavínová časť. Prevzaté z [72] a upravené.

Preto je použitie AP vhodné pre veľmi citlivé detektory, ktoré sú menej náchylné na elektronický šum ako u fotonásobičov. Počet takto vytvorených sekundárnych elektrónov na jeden absorbovaný fotón je zisk vnútorným detektorom. Napriek vysokej citlivosti nie je kvantová účinnosť AP nevyhnutne vysoká, to znamená, že niektoré z dopadajúcich fotónov neprispievajú k fotoprúdu, zatiaľ čo iné fotóny do značnej miery prispievajú k spusteniu elektrónovej lavíny pri nárazovej ionizácii. AP sú vyrobené z rôznych materiálov, z dôvodu citlivosti týchto materiálov na rôzne vlnové dĺžky. Napríklad AP na báze kremíka sú citlivé v oblasti vlnových dĺžok od ≈ 450 nm do 1100 nm, pričom maximálna odozva sa vyskytuje okolo 600–800 nm, teda pri o niečo kratších vlnových dĺžkach ako kremíkové pn diódy. V závislosti od konštrukcie a použitého spätného napätia sa multiplikačný faktor (tiež nazývaný zisk) kremíkových AP môže meniť medzi 50 a 1000. Pre dlhšie vlnové dĺžky až do zhruba $1,7 \mu\text{m}$ sa používajú AP na báze arzenidu germánia alebo india a gália (InGaAs). Tieto majú nižšie prúdový multiplikačný faktor 10 až 40. InGaAs AP sú podstatne drahšie ako AP založené na germánium, ale vykazujú omnoho menší elektrický šum s možnosťou detekcie širšieho spektrálneho pásma. Ich vysoký koeficient absorpcie umožňuje použitie pomerne tenkej absorpčnej vrstvy. Ďalšou možnosťou je použitie zariadení germánium/kremík (GeSi). Ďalšími menej bežnými materiálmi pre AP sú nitrid gália (GaN) pre ultrafialové svetlo a Telurid ortuti a kadmia (HgCdTe) pre stredné pásmo infračerveného žiarenia. Obrázok 2.27 znázorňuje responzivitu (pomer počtu kolíznych fotónov a excitovaných elektrónov niektorých bežne používaných materiálov na výrobu fotodiód.[4, 12, 29]



Obr. 2.27: Príklady responzivity rôznych, komerčne používaných materiálov v detektoroch. Prevzaté z [73] a upravené.

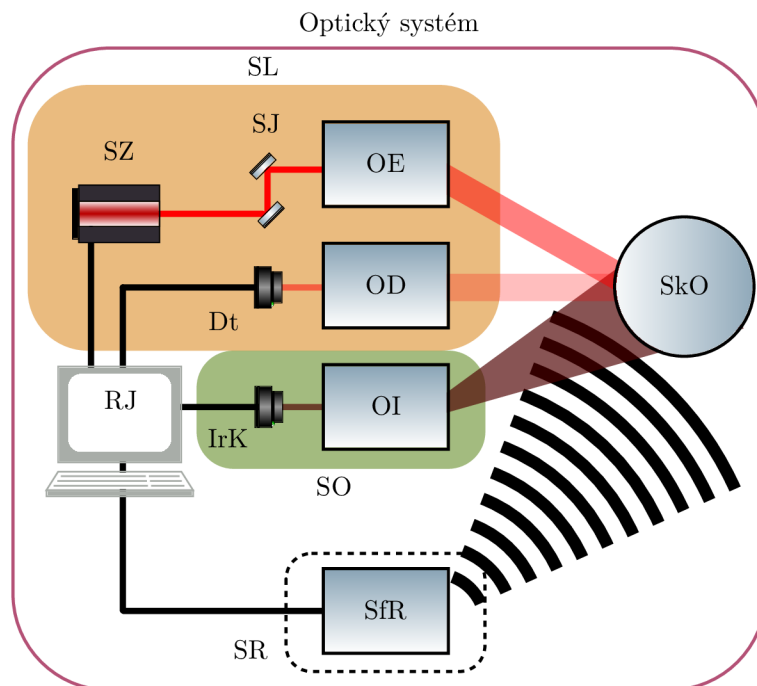
Poznáme dve bežné formy zosilnených detektorov systémov LiDAR s priamou detekciou: AP s lineárnym režimom (LMAPD) a AP s Geigerovým režimom (GMAPD). LMAPD lineárne zosilňujú počet generovaných elektrónov alebo prúd. GMAPD vždy zosilňujú počet elektrónov na nejakú veľkú maximálnu úroveň signálu. GMAPD a LMAPD sa stali veľmi dôležitými v systémoch LiDAR, pričom GMAPD sa často používajú u systémov s veľmi nízkou pravdepodobnosťou detekcie signálu. LMAPD sú prevádzkované pod ich priernym napätím, pričom generujú prúdové pulzy, ktoré sú úmerné sile pulzu optického signálu. LMAPD normálne pracujú s prúdom s vysokým ziskom alebo nabíjacími zosilňovačmi, ktoré vytvárajú priebeh výstupného napätia, ktorý je úmerný tvaru vlny fotoprúdu LMAPD. Na rozdiel od toho majú GMAPD určité predpätie nad ich prierné napätie, vďaka čomu sú citlivé na jediný primárny nosič náboja. Absorpcia jedného alebo niekoľkých fotónov spúšťa lavínový efekt, čím sa generuje silný prúdový pulz, ktorý je ľahko snímateľný. Amplitúda takéhoto pulzu je obmedzená zhášacím obvodom. Zhášací obvod GMAPD, tak zodpovedá aj za ukončenie lavínového efektu, kedy po ukončení prúdenia svetelného signálu na chvíľu zníži aplikovanú spätnú odchýlku pod prierné napätie GMAPD, čím sa ukončí lavínový proces a umožní zachyteným nosičom uvoľniť spojenie pred opätovným zapnutím GMAPD. Ak je GMAPD aktivované predčasne príliš malým signálom, dôjde k následnému pulzovaniu, čo vedie k falošným signálom. To vytvára pre GMAPD charakteristický mŕtvy čas po detekcii. Všeobecne povedané, GMAPD sú citlivejšie na slabšie signály ako LMAPD, ale LMAPD môžu priamo merať tvar amplitúdy prichádzajúceho signálu a dokážu rozlíšiť optické pulzy oddelené len nanosekundou v závislosti od šírky laserového pulzu a lineárneho zisku AP. Niektoré LMAPD s vysokým ziskom, hlavne elektrónové HgCdTe AP, poskytujú dostatočný lineárny zisk na detekciu jednotlivých fotónov bez toho, aby vstúpili do lavínového rozpadu.[4, 12]

3. Konceptčné návrhy

V práci sa budeme zaoberať teoretickým návrhom optického systému slúžiaceho k diaľkovému pozorovaniu, rekonštrukcii 3D modelu terénu vo vysokom rozlíšení a sledovaniu rýchlo sa pohybujúcich objektov v stráženom perimetri. Návrh optického systému bude pozostávať z navrhnutých optických alebo konštrukčných riešení v kombinácii s komerčne dostupnými nakupovanými komponentami. Optický návrh bude zahŕňať dva konceptné návrhy. Prvý návrh bude zostavený pre pozemné účely s väčšími konštrukčnými rozmermi a prihliadnutím na dosiahnutie, čo možno najlepších kvalít optického systému. Druhý konceptný návrh bude určený pre letecké účely a návrh sa bude snažiť dosiahnuť, čo najlepšej rovnováhy medzi konštrukčnými rozmermi a výkonom optického systému s požiadavkou na nízku cenu.

3.1. Konceptný návrh pre pozemné účely

Pri návrhu optického systému pre pozemné účely, nie je návrh závislý na konštrukčných rozmeroch, zároveň môžu byť jednotlivé funkčné časti (ako sú napríklad svetelný zdroj a optika emitora) od seba separované a nemusia sa nachádzať na jednej konštrukčnom ráme. Na obrázku 3.1 je znázornená zostava návrhu optického systému pre pozemné účely.



Obr. 3.1: Zostava konceptného návrhu pre pozemné účely, kde SL je systém LiDARu, SO je sprievodná optika, SR je systém RaDARu, RJ je riadiaca jednotka, SZ je svetelný zdroj, SJ je skenovacia jednotka, OE je optika emitora, OD je optika detektora, Dt je detektor, OI je objektív infračervenej kamery, IrK je infračervená kamera, SfR je sfázovaný RaDAR a SkO je skenovaný objekt.

Konceptný návrh je zložený zo štyroch nezávislých systémov. Prvým systémom je samotný LiDAR. Druhým systémom je sprievodná optika, tretím je systém RaDARu a štvrtým je riadiaca jednotka. V tejto práci sa nebudeme zaoberať tretím a štvrtým systémom, momentálne nám slúžia len na vytvorenie si predstavy, ako celý optický systém funguje.

3.1.1. Princíp činnosti koncepčného návrhu

Optický systém je navrhovaný k spĺňaniu dvoch kľúčových funkcií. Prvou funkciou je 3D rekonštrukcia skenovaného perimetra vo vysokom rozlíšení na maximálnu vzdialenosť 10 km. Správne vykonávanie tejto funkcie je zaručené systémom LiDAR a riadiacou jednotkou, kedy systém LiDARu za pomoci svetelného zdroja, skenovacej jednotky a optiky emitora systém vysiela optický signál o vlnovej dĺžke 1550 nm do priestoru 100mm skenovanej roviny. Pri kontakte signálu s objektom sa časť signálu odrazí naspäť smerom ku systému, kde je signál za pomoci optiky detektora nasmerovaný na detektor, ktorý signál premieňa na merateľný elektrický prúd. Následným spracovaním signálu riadiacou jednotkou, je tento signál interpretovaný ako 3D obraz skenovaného perimetru alebo ako rýchlosť skenovaného objektu. Ďalšou funkčnou časťou optického systému je sprievodná optika vo forme infračervenej kamery, ktorá operuje vo vlnovom spektre žiarenia MWIR od 3 μm do 5 μm . Sprievodná optika má za úlohu sprostredkovať lepšiu predstavu o skenovanom perimetri vo veľkých vzdialenostiach prostredníctvom infračervenej kamery so zväčšovacím objektívom alebo ďalekohľadom.

Druhou funkciou je detekcia a sledovanie rýchlo sa pohybujúcich objektov v skenovanom perimetri, taktiež na maximálnu vzdialenosť 10 km. Táto vzdialenosť tým pádom značí hranicu, pokiaľ musí optický systém zaručovať bezchybné fungovanie. K správne fungovaniu slúži k primárnej detekcii systém RaDARu, ktorý za pomoci sfázovaného RaDARu, operujúcom v frekvenčnom rozsahu od 8,5 GHz do 11 GHz alebo od 13 GHz do 18 GHz, skenuje sledovaný perimeter. Pri strete RaDARového signálu s objektom, ktorý sa rýchlo pohybuje smerom k optickému systému alebo od neho, sa odrazený signál frekvenčne posunie, na základe Dopplerového javu. Odrazený signál je zachytený systémom RaDAR a následne upozorní optický systém na blížiaci sa objekt. K primárnej detekcii sa v dnešnej dobe používajú RaDARové systémy najmä z dôvodu, dnešného nedostatočného výkonu detektorov (nízke obnovovacie frekvencie) systémov LiDAR. Potom ako obdrží optický systém upozornenie od systému RaDAR, začne systém LiDAR tento objekt sledovať pomocou precízneho skenovania blízkeho okolia objektu. Použitie systému LiDAR na sledovanie blížiaceho sa objektu nachádza význam najmä v skutočnosti, že operujú s vlnovými dĺžkami v rádcoch stotín dĺžok oproti vlnovým dĺžkam systémov RaDAR, a tak na základe Rayleigh kritéria môžu systémy LiDAR dosahovať významne väčšieho rozlíšenia a presnosti.[11, 46]

3.2. Koncepčný návrh pre letecké účely

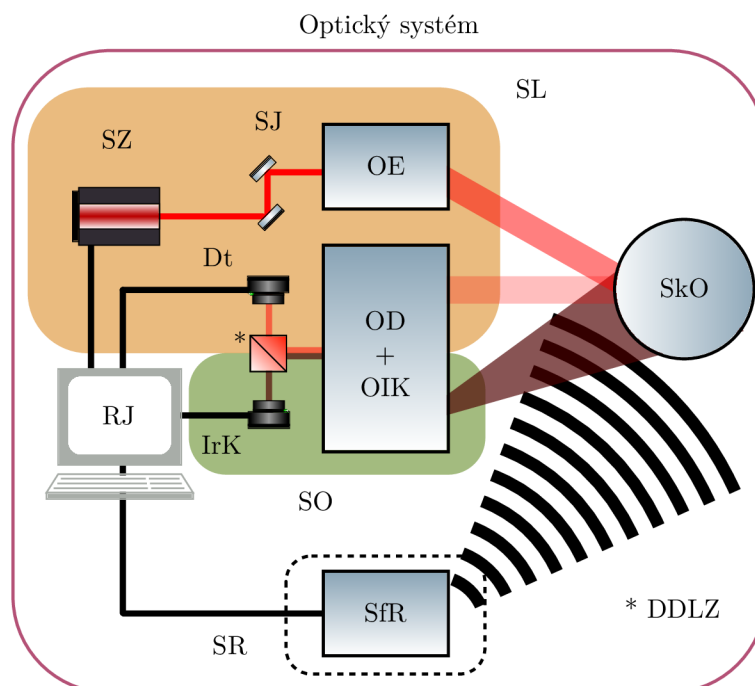
Druhý koncepčný návrh sa sústreďuje na aplikáciu v leteckom priemysle, kedy sú kladené požiadavky na malé konštrukčné rozmery zariadenia a väčšinu funkčných častí optického systému sú uložené na jednom konštrukčnom ráme. Príkladom návrhu pre letecké účely môže byť napríklad letecký optický systém na obrázku 3.2.

3.2. KONCEPČNÝ NÁVRH PRE LETECKÉ ÚČELY



Obr. 3.2: Príklad uloženia funkčných častí optického systému na jednom konštrukčnom ráme bezpilotného drona. Prevzaté z [74].

Kvôli požiadavke na malé konštrukčné rozmery bude optika detektora a sprievodná optika zdieľať spoločný optický systém a pomocou dichroického rozdeľovača laserového zväzku alebo výklopného zrkadielka sa budú jednotlivé signály prenášať na detektor systému LiDAR alebo senzor infračervenej kamery. Návrh bude obsahovať svetelný zdroj pracujúci v pulznom režime bez možnosti použitia jednomódového optického vlákna. Svetelný zdroj bude pre svoje malé konštrukčné rozmery usadený na hlavnú rám konštrukcie. Na obrázku 3.3 si znázorníme schému optického systému.



Obr. 3.3: Schéma koncepčného návrhu pre letecké účely, kde SL je systém LiDARu, SO je sprievodná optika, SR je systém RaDARu, RJ je radiacia jednotka, SZ je svetelný zdroj, SJ je skenovacia jednotka, OE je optika emitora, OD + OIK optika slúžiaca ako optika detektora a zároveň optika infračervenej kamery, DDLZ je dichroický delič laserového zväzku, Dt je detektor, IrK je infračervená kamera, SfR je sfázovaný RaDAR a SkO je skenovaný objekt.

3. KONCEPČNÉ NÁVRHY

Takto navrhnutý optický systém v princípe funguje rovnako ako koncepčný návrh pre pozemné účely s rozdielom, že bude zložený z dielov s prihliadnutím na ich konštrukčné rozmery a nízku cenu.

4. Požiadavky na optický systém

V tejto kapitole sa budeme zaoberať výberom vhodných parametrov svetelného zdroja s ohľadom na dosiahnutie maximálnej miery priepustnosti svetelného žiarenia atmosférou, na dosiahnutie najlepšieho pomeru vyžiareného a detegovaného výkonu. Výber vlnovej dĺžky je ovplyvnený mnohými faktormi, napríklad bezpečnostné normy, prestup žiarenie atmosférou, účinnosť senzorov, funkcionálna a komerčná dostupnosť komponent. Ďalej sa budeme v kapitole venovať stanoveniu veľkosti plochy apertúry navrhovanej optiky, tak aby sme našli rovnováhu z hľadiska náročnosti konštrukcie, cenovej dostupnosti a účinnosti detekcie.

4.1. Kritéria pre voľbu spektrálneho rozsahu svetelného zdroja

4.1.1. V závislosti na bezpečnosti

Bezpečnosť pri používaní laserového zdroja je jedným z kľúčových faktorov pri stanovovaní vhodnej vlnovej dĺžky. Pri návrhu a kalkuláciách sa budeme riadiť podľa medzinárodných noriem pre bezpečnosť laserových systémov IEC 60825-1. Nebezpečenstvo spojené s používaním laserových systémov je rozdelené do 4 kategórií: riziko poškodenia pokožky a očí, elektrické riziko, chemické riziko a vedľajšie riziká. Laserové žiarenie vo vlnových dĺžkach používaných v komerčných systémoch LiDAR spôsobuje z hľadiska zdravotných rizík hlavne poškodenie očí, budeme sa preto venovať v tejto práci výlučne bezpečnosti očí.[30, 31]

Mechanizmy poškodenia očí

Oko vystavené laserovému žiareniu môže byť poškodené v dôsledku niekoľkých mechanizmov, ktoré spôsobujú poškodenie biologických tkanív oka v závislosti na vlnovej dĺžke a dobe expozície. Svetlo o rôznej vlnovej dĺžke preniká do rôznej hĺbky oka, a tým vplývajú odlišne na jednotlivé štruktúry oka. Najviac môže poškodiť oko žiarenie s vlnovou dĺžkou od 400 nm do 1400 nm, ktoré štruktúrou oka prechádzajú bez výrazných strát na výkone a zároveň sa môžu zaostriť na sietnicu oka. Schopnosť oka zaostrovať obraz na sietnicu spôsobuje, že pri vystavení oka rovnobežným laserovým lúčom, oko laserové lúče zaostruje na veľmi malú plochu sietnice. Obraz vytvorený laserovým žiarením na sietnici môže mať v priemere od 10 μm do 20 μm . Takáto koncentrácia intenzity žiarenia na malú plochu môže spôsobiť až 200-tisíc násobné zvýšenie intenzity žiarenia oproti nezaostrenému žiareniu. To vedie k termálnemu poškodeniu sietnice. Pri expozícií kratšej ako 1 μs , môže dôjsť k poškodeniu tkaniva aj mimo zasiahnutej časti. Fotochemické poškodenie oka spôsobuje žiarenie s vlnovou dĺžkou ultrafialového spektra od 315 nm do 400 nm a viditeľného spektra od 400 nm do 780 nm. Poškodenie sa prejavuje najmä na rohovke, šošovke a sietnici oka, kedy tkanivá reagujú podobne ako pri neprimeranom opaľovaní sa na Slnku. Poškodenie má tiež názov fotokeratitída. Fotochemické poškodenie môže spôsobovať napr. šedý zákal alebo starnutie oka. Ďalším menej významným mechanizmom poškodenia oka je termálne poškodenie rohovky, kedy je na nevratné poškodenie rohovky potrebné vystaviť oko veľmi silnému žiareniu s vlnovými dĺžkami od 1,4 μm do 1 mm. V tabuľke 4.1 je zhrnutý vplyv žiarenia s rôznymi vlnovými dĺžkami na oko.[32]

Vlnové spektrum žiarenia	Poškodenie
Ultrafialové (180 nm do 315 nm)	Fotokeratitída
Ultrafialové (315 nm do 400 nm)	Šedý zákal
Viditeľné (400 nm do 780 nm)	Fotochemické a termálne poškodenie sietnice
Infračervené (780 nm do 1400 nm)	Šedý zákal a popáleniny sietnice
Infračervené (1,4 μm do 3,0 μm)	Uveitis*, šedý zákal, popáleniny rohovky
Infračervené (3,0 μm do 1 mm)	Popáleniny rohovky
* Uveitída je forma zápalu oka. Ovpľyňuje strednú vrstvu tkaniva v stene oka	

Tabuľka 4.1: Mechanizmy poškodenia očí svetelným žiarením. Prebraté z: [32]

Zranenia spôsobené vystavením očí laserovému žiareniu sú veľmi nebezpečné, musíme si však objasniť pri akom výkone laseru k nim dochádza.

Maximálna prípustná expozícia (Maximum permissible exposure, MPE)

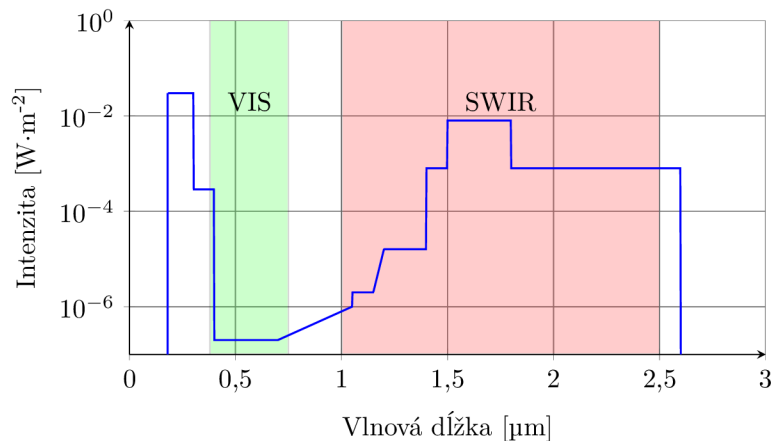
K pochopeniu závislosti výkonu laseru, vlnovej dĺžky, doby trvania expozície a zraneniami spojenými s očami slúži MPE. MPE predstavujú maximálnu úroveň žiarenia, ktorému môžu byť oko alebo koža vystavená bez následného okamžitého poranenia alebo poranenia po dlhšom čase. MPE súvisí s vlnovou dĺžkou žiarenia, trvaním pulzu alebo expozičným časom, rizikovým tkanivom. Pre viditeľné a blízke infračervené žiarenie v rozsahu 400 nm až 1,4 μm súvisí MPE s veľkosťou obrazu na sietnici. Pre rôzne typy laserov sú krivky MPE rozdielne. Rozdelenie laserov podľa normy IEC 60825-1 je nasledovné: [32, 33]

- **Trieda 1** Lasery, ktoré sú bezpečné za primerane predvídateľných podmienok prevádzky, vrátane používania optických nástrojov na priame sledovanie charakteru lúča (intrabeam viewing).
- **Trieda 1M** Lasery emitujúce v rozsahu vlnových dĺžok od 302,5 nm do 4 μm , ktoré sú bezpečné za primerane predvídateľných prevádzkových podmienok, ale pre používateľa môže byť nebezpečné pokiaľ je použitá dodatočná optika.
- **Trieda 2** Lasery, ktoré vyžarujú viditeľné žiarenie v rozsahu vlnových dĺžok od 400 nm do 700 nm, kde ochranu očí bežne poskytujú averzné reakcie vrátane žmurkajúceho reflexu. Od tejto reakcie sa dá očakávať, že poskytne primeranú ochranu za primerane predvídateľných prevádzkových podmienok vrátane použitia optických nástrojov na priame sledovanie charakteru lúča (intrabeam viewing).
- **Trieda 2M** Lasery, ktoré vyžarujú viditeľné žiarenie v rozsahu vlnových dĺžok od 400 nm do 700 nm, kde ochranu očí bežne poskytujú averzné reakcie vrátane žmurkajúceho reflexu. Zobrazenie výstupu laseru však môže byť nebezpečné, ak používateľ v používa optický nástroj na priame sledovanie charakteru lúča (intrabeam viewing).
- **Trieda 3R** Lasery, ktoré vyžarujú v rozsahu vlnových dĺžok od 302,5 nm do 1 mm, kde priame sledovanie lúča je potenciálne nebezpečné, ale zároveň je menej nebezpečné ako v prípade laserov triedy 3B a pre používateľa platí menej výrobných požiadaviek a kontrolných opatrení ako pre triedu 3B. Prístupný emisný limit je v rámci päťnásobku AEL (accessible emission limit) triedy 2 o vlnovej dĺžke v rozsahu od 400 nm do 700 nm a do päťnásobku AEL (accessible emission limit) triedy 1 pre ostatné vlnové dĺžky.
- **Trieda 3B** Lasery, ktoré sú bežne nebezpečné, keď dochádza k priamej expozícii oka lúčom (t.j. v rámci nominálnej rizikovej vzdialenosti pre oči (NOHD)). Sledovanie difúzneho rozptylu lúča na povrchu je normálne bezpečné.

4.1. KRITÉRIA PRE VOLBU SPEKTRÁLNEHO ROZSAHU SVETELNÉHO ZDROJA

- **Trieda 4** Lasery, ktorého sledovanie difúzneho rozptylu lúča na povrchu je nebezpečné. Môžu spôsobiť poranenie pokožky a môže tiež predstavovať nebezpečenstvo požiaru. Ich použitie vyžaduje extrémnu opatrnosť.

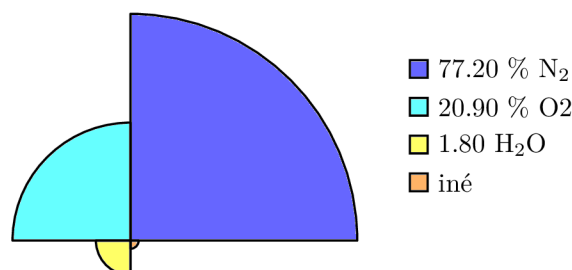
Podľa klasifikácie môžu systémy LiDAR používať lasery triedy 1 a 1M, lebo počas činnosti systému môže dochádzať ku priamej expozícii ľudí alebo zvierat v skenovanom perimetri. Na obrázku 4.1 je znázornená krivka MPE pre triedy laseru 1 a 1M za predpokladu šírky pulzu 18 μ s, čo je maximálna dĺžka pulzu bežných systémov LiDAR pri relatívne vysokej obnovovacej frekvencii.[30]



Obr. 4.1: Maximálna prípustná expozícia pre lasery triedy 1 a 1M s trvaním expozície 18 μ s. Prevzaté z [32].

4.1.2. Vplyv atmosféry na prestup žiarenia

Ďalším dôležitým aspektom pri stanovovaní spektrálneho rozsahu svetelného zdroja je vplyv atmosféry na prestup žiarenia. Atmosféra obsahuje plyny ako dusík, kyslík, oxid uhličitý, vodnú paru a mnoho ďalších komponent, ktoré môžu svetelné žiarenie absorbovať, odrážať alebo rozptylovať. Absorbancia a rozptyl žiarenia na molekulách látok obsiahnutých v atmosfére sú závislé na vlnovej dĺžke svetelného žiarenia. Okrem vlnovej dĺžky, majú vplyv na prestup žiarenia atmosférou aj mnohé ďalšie premenné ako teplota, nadmorská výška, vlhkosť, barometrický tlak a turbulencia atmosféry. Pri stanovení spektrálneho rozsahu svetelného zdroja budeme vychádzať z modelu atmosféry definovaného tlakom jednej atmosféry, teplotou 296K (22°C), relatívnou vlhkosťou 10 % a koncentraciou jednotlivých zložiek obsiahnutých v atmosfére, obrázok 4.2, podľa U.S. modelu pre leto v miernom podnebnom pásme.[4, 34]



Obr. 4.2: Podiel látok obsiahnutých v atmosfére v nadmorskej výške tesne nad povrchom zeme, pre leto v miernom podnebnom pásme podľa USA modelu. Podiel iných komponent zastúpených v atmosfére: 77,206 % N₂ , 20,9 % O₂ , 1,860 % H₂O , 0,033 % CO₂ , 0,000170 % CH₄ , 0,000032 % N₂O , 0,000015 % CO , 0,000003 % O₃. Prevzaté z [34] a upravené.

Absorbancia žiarenia atmosférou

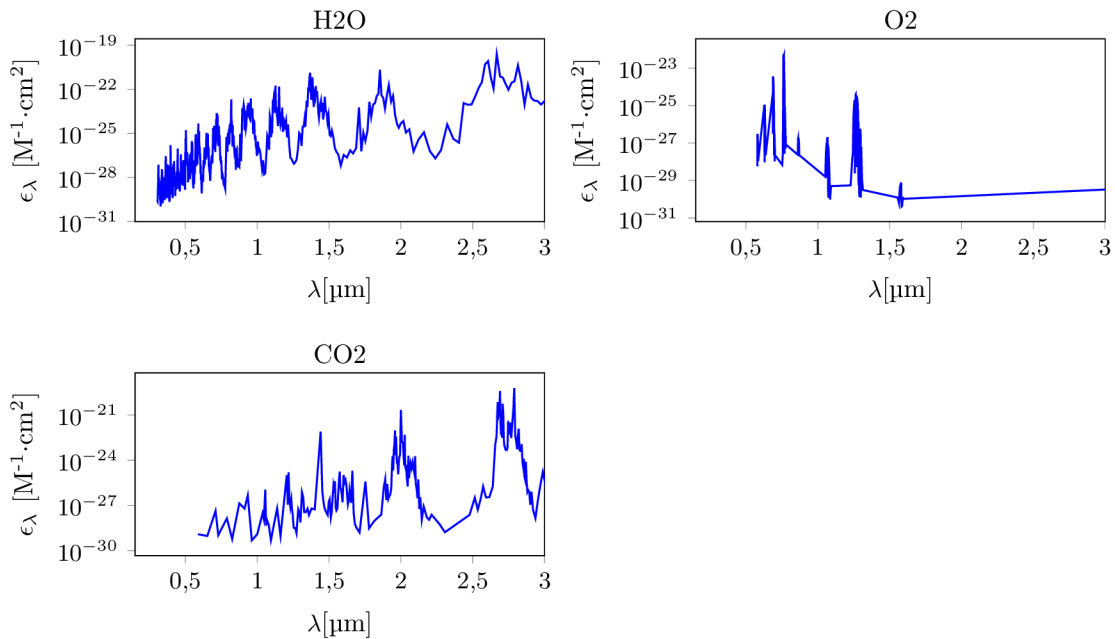
Na rozdiel od atmosférického rozptylu, absorbancia svetla atmosférou je veľmi citlivá na rozdielne vlnové dĺžky. Množstvo žiarenia, ktoré je atmosférou absorbované môže byť popísané Lambertov-Beerovým zákonom, ktorý je matematickým vyjadrením závislosti absorbancie svetelného žiarenia v prostredí, ktorým toto žiarenie prechádza. Zákon je definovaný vo vzťahu 4.1

$$A = \epsilon_{\lambda} l c_A \quad (4.1)$$

kde, A je absorbancia, ϵ_{λ} je absorpčný koeficient, l je optická dráha žiarenia a c_A je koncentrácia látkového množstva absorbujúcej zložky. Absorbancia je definovaná ako prirodzený logaritmus pomeru výkonu žiarenia pred a po prechode absorpčným prostredím. Hodnota absorbancie nadobúda hodnotu od 0 do nekonečna a preto nie je natoľko intuitívna. Z tohto dôvodu budeme pomer výkonu žiarenia pred I_0 a po I prechode absorpčným prostredím popisovať priepustnosťou, ktorá nadobúda hodnotu od 0 do 1 a vyjadruje efektívnosť akou žiarenie prešľuje absorpčným prostredím, je vyjadrená vzťahom 4.2.

$$T = \frac{I}{I_0} = 10^{-\epsilon_{\lambda} l c_A} \quad (4.2)$$

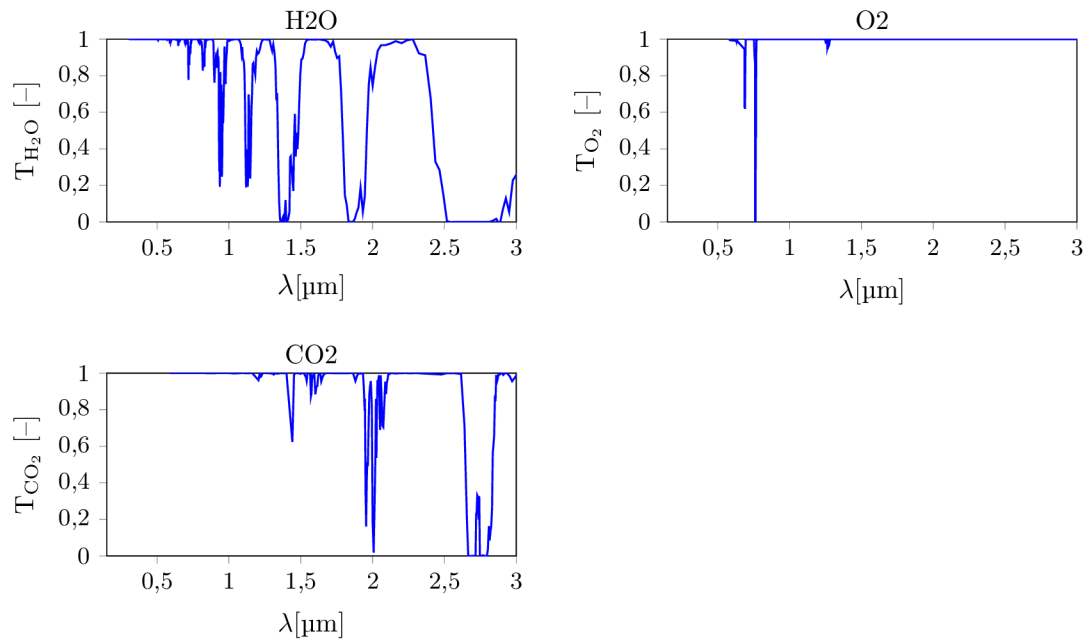
Absorpčný koeficient ϵ_{λ} je definovaný pre jednotlivé vlnové dĺžky, ktorého hodnoty sme prebrali z databázy HITRAN (High Resolution Transmission). Je to databáza spektroskopických parametrov rôznych atómov a molekúl používaných na simuláciu a analýzu prenosu a emisie svetla v plynnom prostredí. Absorpčné koeficienty troch komponent najviac ovplyvňujúcich priepustnosť sú znázornené na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Absorbčné koeficienty ϵ_{λ} pre jednotlivé zložky obsiahnuté v atmosfére. Prevzaté z [36] a upravené.

Zostavíme grafy priepustnosti pre optickú dráhu $l = 10$ km, obrázok 4.4. Pre jednoduchšie čítanie grafu na spektrum aplikujeme Savitzky–Golayov filter.[38]

4.1. KRITÉRIA PRE VOLBU SPEKTRÁLNEHO ROZSAHU SVETELNÉHO ZDROJA



Obr. 4.4: Priepustnosť pre jednotlivé zložky obsiahnuté v atmosfére na vzdialenosť 10 km. Prevzaté z [36] a upravené.

Na zostavenie jedného zjednoteného grafu celkovej priepustnosti T_z prvkov obsiahnutých v atmosfére je potrebné všetky hodnoty priepustnosti podieľajúcich sa prvkov vynásobiť podľa vzťahu 4.3.

$$T_z = T_{\text{H}_2\text{O}} T_{\text{O}_2} T_{\text{CO}_2} \quad (4.3)$$

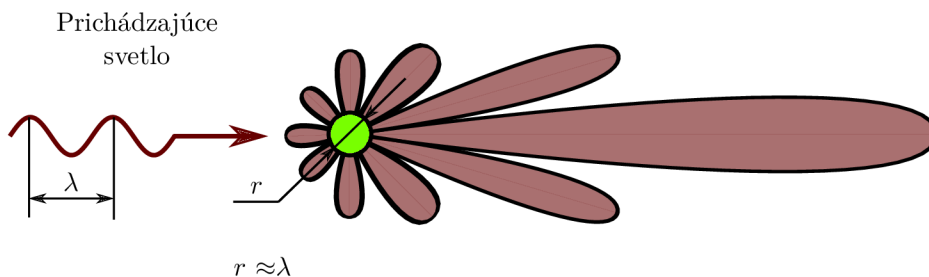
Výsledkom je zjednotený graf priepustnosti T_z , ktorý opisuje pomer optického výkonu po a pred prestupom žiarenia atmosférou s dráhou $l = 10$ km.

Rozptyl žiarenia atmosférou

Ďalším významným faktorom ovplyvňujúci svetelný signál je rozptyl, ktorý sa dá rozdeliť na dva typy podľa veľkosti častice, na ktorej sa žiarenie rozptyľuje.

Mieho rozptyl

Mieho rozptyl nastáva, keď rozptylové častice majú podobnú veľkosť ako vlnová dĺžka žiarenia. Pri interakcii žiarenia s takouto časticou dochádza k rozptylu spôsobeného variáciami fázy, ktorý má za následok geometriu rozptylu s dominantným rozptylom v smere šírenia svetelného žiarenia a je znázornený na obrázku 4.5.



Obr. 4.5: Geometria Mieho rozptylu po interakcii svetla s časticou. Prevzaté z [75] a upravené.

Na rozdiel od Rayleighovho rozptylu, intenzita rozptylu až tak nezávisí od vlnovej dĺžky žiarenia. Dôkazom toho je napríklad biele sfarbenie mlieka, kde dochádza k Mieho rozptylu na kvapôčkach tuku vo vode alebo biele sfarbenie oblakov, kde dochádza k Mieho rozptylu na drobných kvapôčkach vody. Ďalšími príkladmi Mieho rozptylu môže byť hmla, prach v ovzduší a iné. Keďže sa jedná o zložitú problematiku nebudeme sa ňou v tejto práci zaoberať, resp. nebudeme posudzovať navrhovaný systém z hľadiska funkčnosti v takýchto extrémnych podmienkach.[39]

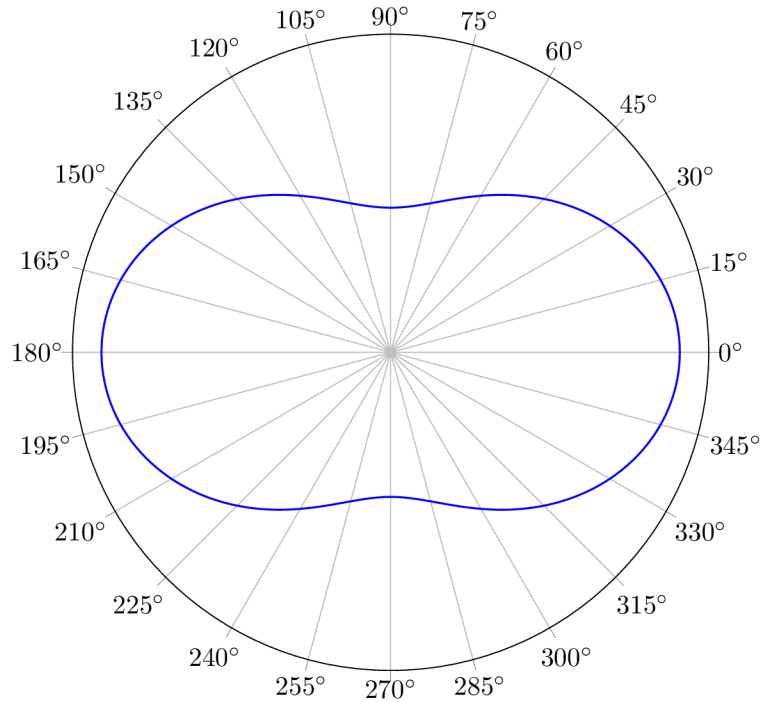
Rayleigho rozptyl

Rayleighov rozptyl, je elastický rozptyl žiarenia na časticách, ktoré sú omnoho menšie ako vlnová dĺžka svetelného žiarenia t.j. častice s polomerom < 10 nm. Elastický rozptyl znamená, že vlnová dĺžka rozptýleného svetla a vnútorná energia rozptylových častíc sa nemení. Intenzita rozptylu sa mení s prevrátenou štvrtou mocninou vlnovej dĺžky žiarenia. Vyplyva to zo základných vlastností dipólového žiarenia. Intenzita rozptylu je úmerná $1 + \cos(\theta)^2$, kde θ je uhol rozptylu. To znamená, že rozptyl dopredu a dozadu je silnejší ako rozptyl do priečných smerov. Indukované dipóly oscilujú v smeroch kolmých na smer šírenia dopadajúceho svetelného žiarenia a nemôžu vyžarovať v smere oscilácie. Fotóny s väčšou pravdepodobnosťou prejdú priamo cez časticu alebo sa odrazia späť ako by malo dôjsť k odkloneniu fotónu o 90° . Geometria je znázornená na obrázku 4.6 a rozloženie intenzity rozptýleného svetla a je definovaná vo vzťahu 4.4.[39]

$$S = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{2} \frac{\rho}{N} \frac{1}{\lambda^4} (1 + \cos^2 \theta) \quad (4.4)$$

kde, n je index lomu vzduchu, ρ je pomer hustoty vzduchu v závislosti na nadmorskej výške (v n.v. 1 m je $\rho = 1$ a exponenciálne stúpa s n.v. h), $N = 2,504.1025 \text{ m}^{-3}$ je hustota počtu častíc vzduchu v štandardnom US modeli atmosféry a hovorí o počte molekúl na jeden meter kubický, λ je vlnová dĺžka prichádzajúceho žiarenia a θ je uhol rozptylu. Rayleigho rozptylová rovnica hovorí, že určité smery rozptyľujú viac svetla ako iné a množstvo rozptýleného svetla závisí od vlnovej dĺžky prichádzajúceho žiarenia. Polárny diagram 4.6 zobrazuje geometrické rozloženie S v nadmorskej výške 0 m.

4.1. KRITÉRIA PRE VOLBU SPEKTRÁLNEHO ROZSAHU SVETELNÉHO ZDROJA



Obr. 4.6: Geometria Rayleighovho rozptylu po interakciách svetla s časticou.

Rayleighova rozptylová rovnica udáva, koľko svetla je rozptýleného v určitom smere. Nehovorí však, koľko energie je celkovo rozptýlenej. Aby sme to mohli vyjadriť, musíme vziať do úvahy rozptyl energie vo všetkých smeroch, vzťah 4.5. [43]

$$\beta = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} S \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (4.5)$$

kde ϕ je uhol okolo optickej osi. Výsledkom integrácie je tzv. Rayleighov koeficient $\beta(\lambda, h)$, ktorý hovorí aká časť energie sa stratí rozptylom po interakciách prichádzajúceho žiarenia s jednou časticou. Pre výšku $h = 0$ m nadobúda vzťah 4.5 tvar 4.6.

$$\beta = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3} \frac{1}{N} \frac{1}{\lambda^4} \quad (4.6)$$

Intenzity I_0, I_1 žiarenia pred a po interakciách s časticou, vyjadríme vo vzťahu 4.7.

$$I_1 = I_0 - I_0\beta = I_0(1 - \beta) \quad (4.7)$$

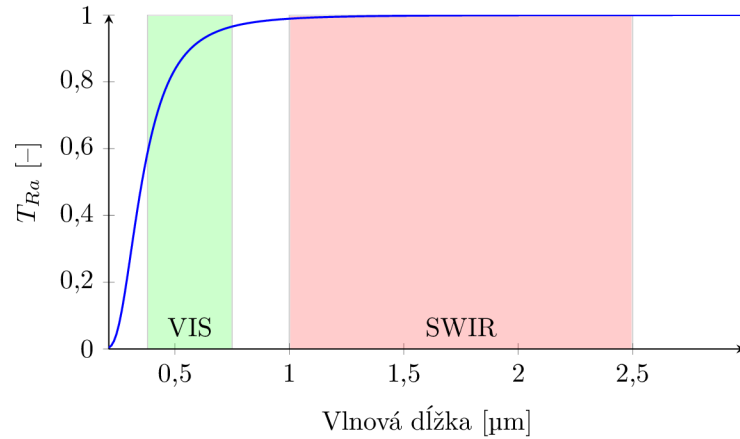
K vyjadreniu intenzity I žiarenia po prestupe rozptylovým prostredím optickej dráhy l slúži vzťah 4.8.

$$I = I_0 e^{-\beta l} \quad (4.8)$$

Priepustnosť žiarenia po optickej dráhe $l = 10$ km, vyjadríme vo vzťahu 4.9.

$$T_{Ra} = \frac{I}{I_0} = \exp(-\beta l) = \exp\left(-\frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3} \frac{1}{N} \frac{1}{\lambda^4} l\right) \quad (4.9)$$

Priepustnosť žiarenia v závislosti na Rayleighov rozptyle je znázornená na obrázku 4.7.



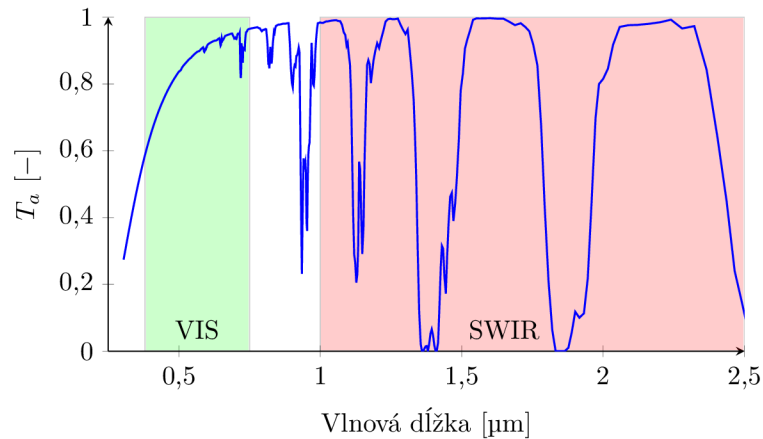
Obr. 4.7: Priepustnosť svetelného žiarenia spôsobená Rayleighho rozptylom na vzdialenosť $l = 10$ km v závislosti na vlnovej dĺžke. Prevzaté z [36] a upravené.

Výsledná priepustnosť žiarenia atmosférou

K vytvoreniu grafu výslednej priepustnosti pre bežný US model atmosféry, zjednotíme všetky vplyvy do jednej výslednej priepustnosti T_a podľa vzťahu 4.10.

$$T_a = T_z T_{Ra} \quad (4.10)$$

Výsledná priepustnosť atmosféry je znázornená na obrázku 4.8.



Obr. 4.8: Výsledná priepustnosť T_a svetelného žiarenia na vzdialenosť $l = 10$ km v závislosti na vlnovej dĺžke. Prevzaté z [36] a upravené.

4.1.3. Vlnová dĺžka svetelného zdroja

V časti 4.1.1 a 4.1.2 sme sa venovali bezpečnosti a povahe prestupu svetelného žiarenia atmosférou pri výbere vhodnej vlnovej dĺžky svetla pre svetelný zdroj systému LiDAR. Po preskúmaní všetkých aspektov sme vybrali vlnovú dĺžku $\lambda_{SZ} = 1550$ nm z dôvodu vysokej atmosférickej priepustnosti $T_a = 98$ % a možnosti bezpečného použitia vysokej maximálne prípustnej intenzity žiarenia $I_{max} = 570$ W.m⁻². Zároveň sú svetelné zdroje o vlnovej dĺžke 1550 nm komerčne rozšírené a bežne využívané systémami LiDAR.

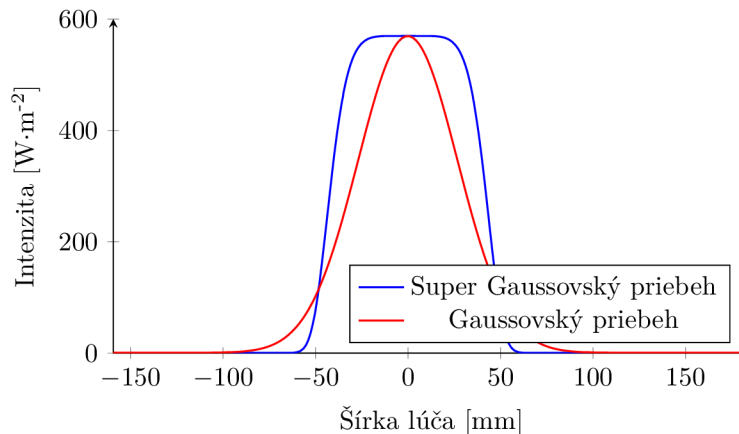
4.2. Účinnosť optického systému

4.2.1. Rovnica výkonu optického systému

Výpočet účinnosti optického systému stanovíme ako pomer výkonu emitovaného signálu svetelným zdrojom a výkonu dopadajúceho signálu na vstupnú apertúru optiky detektora. Výpočet spočíva v určení poklesu intenzity v závislosti na charakteristikách prostredia, ktorým sa signál šíri, ďalej na geometrii rozptylu svetla na skenovanom objekte a geometrii šírenia svetelného signálu v priestore. Tento výpočet je možné interpretovať ako pomer počtu vyžiarených fotónov a počet fotónov navrátených na vstupnú apertúru optiky detektora v určitom časovom období.

Parametre svetelného lúča

Na výpočet počtu fotónov navrátených na vstupnú apertúru optiky detektora musíme poznať charakter emitovaného signálu. Bežne sa v systémoch LiDAR využíva žiarenie s Gaussovským alebo super Gaussovským priebehom intenzity. V časti 4.1.3 sme určili vlnovú dĺžku $\lambda_{SZ} = 1550$ nm a intenzitu svetelného lúča $I_{SZ} = 570 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ svetelného zdroja navrhovaného systému LiDAR. Údaj o intenzite sa vzťahuje na 1 m^2 , ale návrh bude disponovať výstupnou apertúrou s kruhovým profilom o priemere $D_{OE} \approx 100$ mm s Gaussovským alebo super Gaussovským priebehom intenzity svetelného žiarenia, obrázok 4.9.



Obr. 4.9: Priebeh intenzity žiarenia na výstupnej apertúre optiky emitora s Gaussovským alebo super Gaussovským priebehom. Prevzaté z [12] a upravené.

Veľkosť výstupnej apertúry sme určili, tak aby sme maximalizovali výkon laseru, čo má viesť k vyššej presnosti fungovania navrhovaného optického systému. Zároveň veľkosť výstupnej apertúry ovplyvňuje difrakčný limit svetelného lúča a tým ovplyvňuje jeho rozbiehavosť a veľkosť minimálnej fokusovanej stopy.

Výkon laserov

Intenzita svetelného lúča po okrajoch postupne klesá v závislosti na tvare profilu. Pokles intenzít žiarenia v radiálnom smere na výstupnej apertúre optiky emitora je pre Gaussovský profil vyjadrený vo vzťahu 4.11 a pre super Gaussovský profil vo vzťahu 4.12.

$$I_G = I_{max} \exp \left[-2 \left(\frac{2r}{D_{OE}} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

$$I_{sG} = I_{max} \exp \left[-2 \left(\frac{2r}{D_{OE}} \right)^{10} \right] \quad (4.12)$$

kde r je polomer od optickej osi. Výsledný výstupný výkon svetelného zdroja je pre Gaussovský, super Gaussovský priebeh intenzity vyjadrený vo vzťahu 4.13 a 4.14. Prevzaté z [40] a upravené.

$$P_G = \int_0^{I_{max}} \pi \left(\frac{D_{OE}}{2} \sqrt{-\frac{\ln \left[\frac{I_G}{I_{max}} \right]}{2}} \right)^2 dI_G \quad (4.13)$$

$$P_{sG} = \int_0^{I_{max}} \pi \left(\frac{D_{OE}}{2} \sqrt{-\frac{\ln \left[\frac{I_{sG}}{I_{max}} \right]}{2}} \right)^2 dI_{sG} \quad (4.14)$$

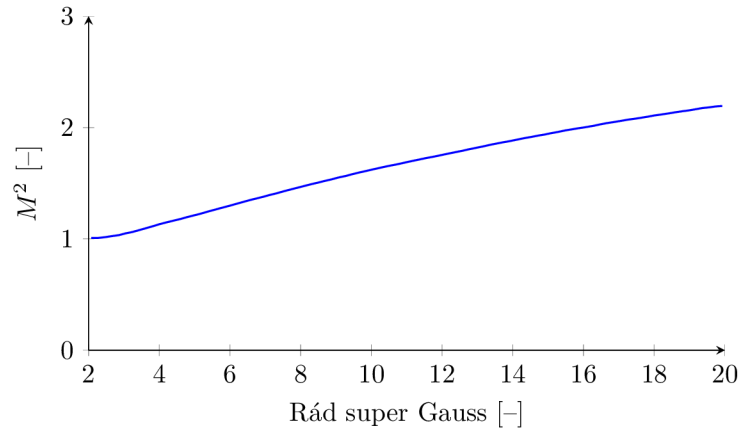
Po integrácii pre Gaussovský priebeh stanovíme výkon lasera $P_G \approx 4$ W a pre super Gaussovský priebeh intenzity výkon lasera $P_{sG} \approx 4,5$ W.

Svetelná stopa

Druhým dôležitým parametrom svetelného lúča je akú veľkosť stopy sme schopný optikou emitora dosiahnuť v skenovanej rovine. Veľkosť výstupnej apertúry priamo ovplyvňuje veľkosť stopy. K výpočtu polomeru minimálnej fokusovanej stopy r_{st} slúži vzťah 4.15.[41]

$$2r_{st} = \frac{4M^2 \lambda_{SZ} l_{max}}{\pi D_{OE}} \quad (4.15)$$

kde $\lambda_{SZ} = 1550$ nm je vlnová dĺžka použitého svetla, $l_{max} = 10$ km je maximálna vzdialenosť skenovanej roviny, D_{OE} je priemer výstupnej apertúry optiky emitora a M^2 je konštanta popisujúca kvalitu svetelného lúča a vyjadruje odchýlku priebehu intenzity svetelného lúča od ideálneho priebehu intenzity Gaussovského lúča, obrázok 4.10.[?monografie25?]



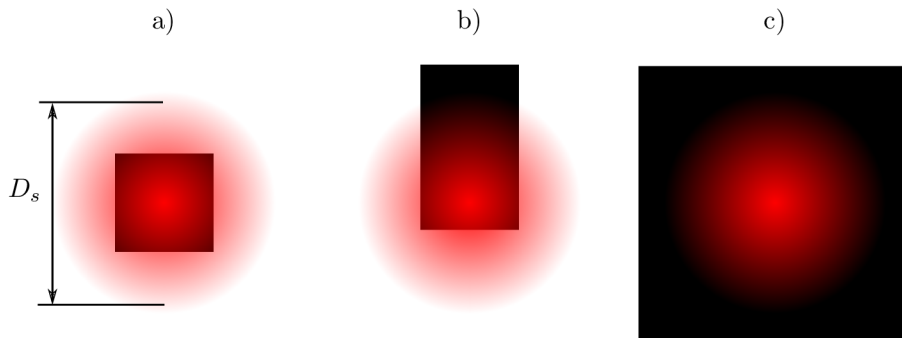
Obr. 4.10: Závislosť koeficientu M^2 na ráde super Gaussovského lúča. Prevzaté z [12] a upravené.

Pre ideálny Gaussovský lúč nadobúda hodnotu $M^2 = 1$ a pre super Gaussovský lúč (10. rád) $M^2 = 1,6$. Zo vzťahu 4.15 dostaneme hodnotu maximálneho priemeru stopy $D_G \approx 197$ mm pre Gaussovský lúč a $D_{sG} \approx 316$ mm pre super Gaussovský lúč. Táto hodnota nám určuje minimálny dosiahnuteľný priemer svetelnej stopy, pre naše účely budeme umelo tento spot zväčšovať defokusovaním optiky emitora, aby sme dosiahli stopu o priemere $D_s = 500$ mm.

4.2. ÚČINNOSŤ OPTICKÉHO SYSTÉMU

Cross section

Pri kontakte svetelného žiarenia s objektom v rovine skenovania dochádza k spätnému odrazu svetla na objekte, ktoré sa následne optický systém snaží zachytiť na vstupnú apertúru optiky detektora. Ako sme si vyššie uviedli vo vzdialenosti $l_{max} = 10$ km bude stopa svetelného lúča dosahovať priemer $D_s = 500$ mm. Táto stopa môže objekt osvietiť troma rôznymi spôsobmi. Prvým spôsobom je, keď priemet plochy skenovaného objektu do roviny skenu je menší ako svetelná stopa a objekt je úplne obklopený svetelnou stopou. Druhým spôsobom je, ak objekt je len z časti osvietený svetelnou stopou a zároveň len časť svetelnej stopy osvetľuje objekt. A pri treťom spôsobe je objekt omnoho väčší ako svetelná stopa a celá stopa osvetľuje len časť objektu, obrázok 4.11.[4]



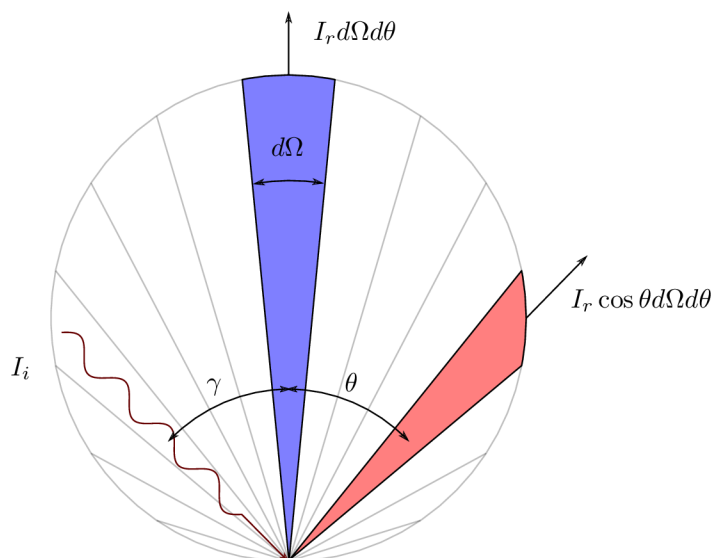
Obr. 4.11: Spôsoby osvetlenia skenovaného objektu. Prevzaté a upravené z: [4]

Lambertovský žiarič

Pri kontakte svetelnej stopy s objektom dochádza k rôznym druhom rozloženia rozptýleného svetla. Kvôli zjednodušeniu sa pri systémoch LiDAR predpokladá, že rozptyl je Lambertovského charakteru. Za predpokladu, že rozptylový objekt je plochý nepriehľadný plošný prvok odrážajúci svetlo do 2π steradiánov, je vyžarovanie svetla rozptýleného smerom k pozorovateľovi nezávislé od smeru pozorovania. Na druhej strane, sa ale intenzita rozptýleného žiarenia I_r riadi Lambertovým kosínusovým zákonom, ktorý hovorí, že intenzita žiarenia je úmerná kosínusu uhla θ medzi smerom pozorovania a normálou povrchu, vzťah 4.16.[3, 44]

$$I_r = I_i \cos(\theta) \quad (4.16)$$

kde I_i je intenzita dopadajúceho žiarenia Pri Lambertovskom rozptyle nezáleží na uhle γ , pod ktorým dopadá svetelný lúč na povrch. Zákon je tiež známy ako kosínusový emisný zákon alebo Lambertov emisný zákon, obrázok 4.12.



Obr. 4.12: Lambertov emisný zákon. Prevzaté z [76] a upravené.

Geometrický koeficient

V tejto časti si určíme koeficient pravdepodobnosti návratu vyžiareného fotónu svetelným zdrojom na vstupnú apertúru optiky detektora z geometrického hľadiska. Vo výpočte budeme na stanovenie koeficientu G uvažovať dokonalé šírenie svetelného žiarenia (vyžiarený výkon sa premietne bez strát do svetelnej stopy) od svetelného zdroja ku skenovanému objektu. Objekt sa následne chová ako Lambertovský žiarič, ktorý je rovinný a zároveň väčší ako samotná svetelná stopa t.j. 3. spôsob osvetlenia, obrázok 4.11. Takýto model bude zodpovedať ideálnym podmienkam, ktoré sa naskytnú len málokedy v reálnom svete, ale zato nám predstaví najvyššiu možnú mieru účinnosti navrhovaného systému. Následne sa výkon premietnutý do svetelnej stopy vyžiari do okolia, pričom sa bude riadiť Lambertovým kosínusovým zákonom. Keďže vzájomná poloha výstupnej a vstupnej apertúry optiky emitora a detektora je omnoho menšia ako poloha skenovaného objektu, budeme kosínus uhla θ považovať za rovný 1. Tým pádom bude návrat rozptýleného svetla na skenovanom objekte závislí len na priestorovom uhle Ω , ktorý definujeme vo vzťahu 4.17

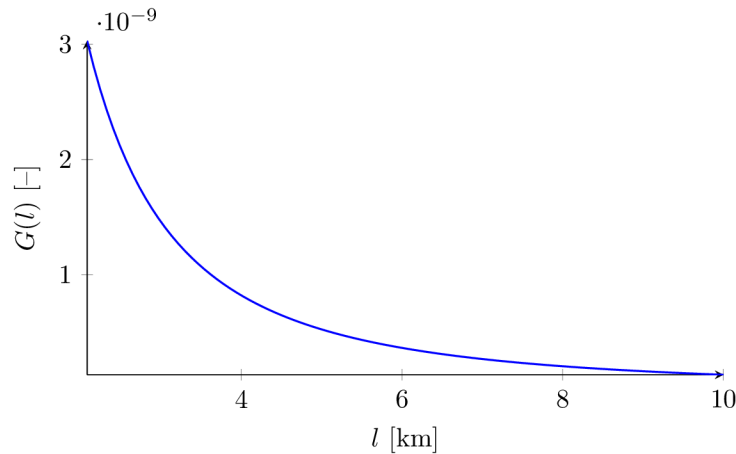
$$\Omega = \pi \sin(\theta) \left(\frac{D_{OE}}{2l} \right)^2 \quad (4.17)$$

kde l je vzdialenosť tejto apertúry od skenovaného objektu. Musíme si ešte uvedomiť, že osvetlený objekt rozptyľuje celé žiarenie rovnomerne do 2π steradiánov, čo odpovedá hemisfére. Geometrický koeficient G ako funkcia vzdialenosti l nadobúda tvar vyjadrený vo vzťahu 4.18.

$$G(l) = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{\pi \sin(\theta) \left(\frac{D_{OE}}{2l} \right)^2}{2\pi} \quad (4.18)$$

Hodnoty geometrického koeficientu G zo vzťahu 4.18 vo vzdialenosti l od 2 km do 10 km sú znázornené v grafe 4.13.

4.2. ÚČINNOSŤ OPTICKÉHO SYSTÉMU

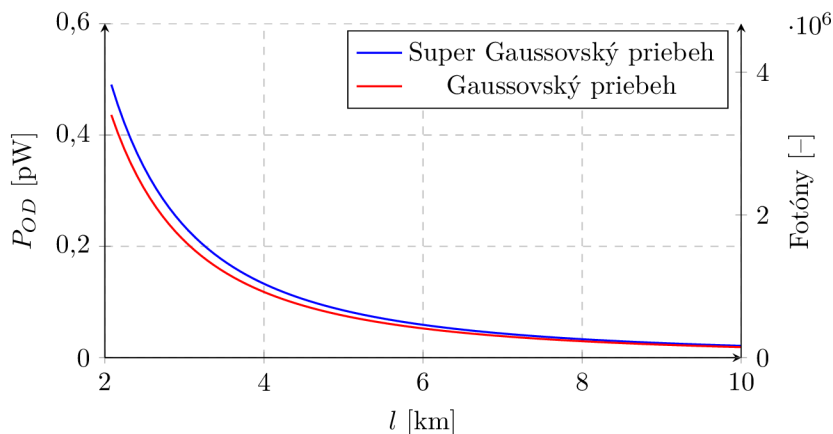


Obr. 4.13: Hodnota geometrického koeficientu v závislosti na vzdialenosti skenovaného objektu od svetelného zdroja.

Výkon svetelného žiarenia dopadajúci na vstupnú apertúru optiky detektora P_{OD} stanovíme vo vzťahu 4.19.

$$P_{OD}(l) = P_G(2T_a G) \quad (4.19)$$

kde P_G je výkon vyžiarený svetelným zdrojom s Gaussovským priebehom intenzity poprípade super Gaussovským priebehom intenzity, $2T_a$ je dvojnásobok koeficientu priepustnosti žiarenia prostredím (2-krát lebo svetlo sa šíri od svetelného zdroja ku skenovanému objektu a následne späť ku optike detektora) a G je geometrický koeficient vyjadrujúci pravdepodobnosť návratu vyžiareného fotónu. Výsledný výkon navráteného signálu jedného pulzu s trvaním 18 μ s je znázornený na grafe 4.14.

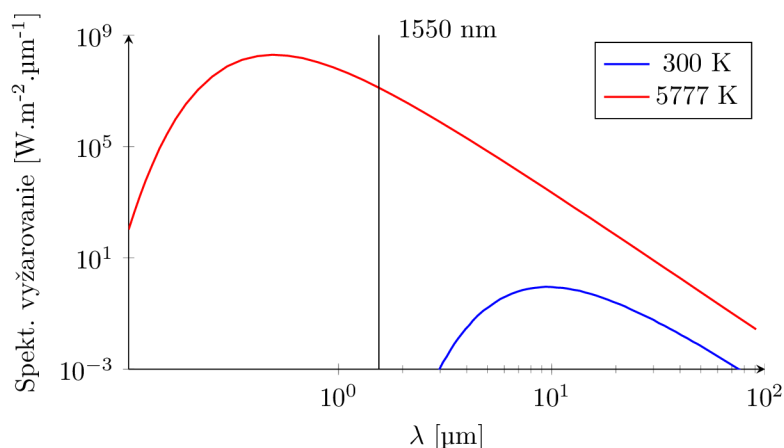


Obr. 4.14: Výkon Gaussovského a super Gaussovského svetelného lúča dopadajúceho na vstupnú apertúru optiky detektora v závislosti na vzdialenosti skenovaného objektu od svetelného zdroja.

4.2.2. Šum spôsobený pozadím

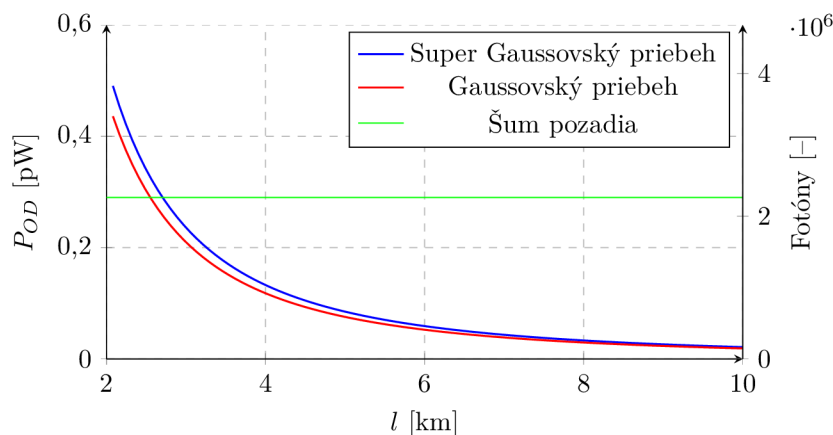
Jedným zo zásadných obmedzení maximálnej vzdialenosti skenovania je šum pozadia, ktorý je závislý na čase merania, jeho lokalite a atmosferických podmienkach. Šum pozadia je ako signál samotného LiDARu s tým rozdielom, že tento signál je nežiadany. Keďže bude rovnako ako signál LiDARu detektorom zosilnený, bude šum skreslovať výsledky merania, poprípade ich môže úplne zakryť. Najčastejším zdrojom šumu pozadia je Slnko, ktorého spektrálne vyžarovanie sa dá popísať ako vyžarovanie čierneho telesa o teplote 5777 K, kedy sa dopadajúce žiarenie zo

Slnka na povrch skenovaného objektu rozptyľuje do okolia obdobne ako u signálu LiDARu. Druhým zdrojom šumu pozadia je vyžarovanie samotného prostredia, ktoré sa chová ako čierne teleso o teplote približne 300 K, obrázok 4.15.



Obr. 4.15: Vyžarovanie čierneho telesa o teplote 5777 K a 300 K. Prebraté z [77] a upravené.

Z grafu 4.15 môžeme usúdiť, že skenovanie LiDARu počas noci, kedy nie je prítomné priame žiarenie zo Slnka, prebieha takmer bez prítomnosti šumu pozadia a skenovanie môže dosahovať maximálnej skenovacej vzdialenosti. Cez deň musíme rátať s prítomnosťou silného šumu pozadia. Cez slnečný deň objekt ožiarený Slnkom o ploche 1 m² rozptyľuje približne $1,3 \times 10^9$ fotónov za 1 ns do uhlu 2π steradiánov, pričom sa rozptyľ riadi Lambertovým kosínusovým pravidlom. Za predpokladu, že zorné pole optiky detektora dosahuje veľkosti $0,1718^\circ$ (veľkosť uhla, pod ktorým skenovacia jednotka premieta skenovaciu vzorku do roviny skenu) dosahuje šum pozadia konštantnú hodnotu ≈ 2300000 fotónov v intervale 18 μ s (doba jedného svetelného pulzu LiDARu), nezávisle na vzdialenosti skenovanej roviny, obrázok 4.16. Musíme si uvedomiť, že tento šum je spôsobený práve vlnovou dĺžkou 1550 nm, aby sme minimalizovali šum iných vlnových dĺžok, musíme ho blokovať spektrálnymi filtermi. Zároveň sa vplyv šumu pozadia redukuje pokročilými metódami spracovania signálu.[4, 45]



Obr. 4.16: Výkon Gaussovského a super Gaussovského svetelného lúča dopadajúceho na vstupnú apertúru optiky detektora v závislosti na vzdialenosti skenovaného objektu od svetelného zdroja v porovnaní so šumom pozadia.

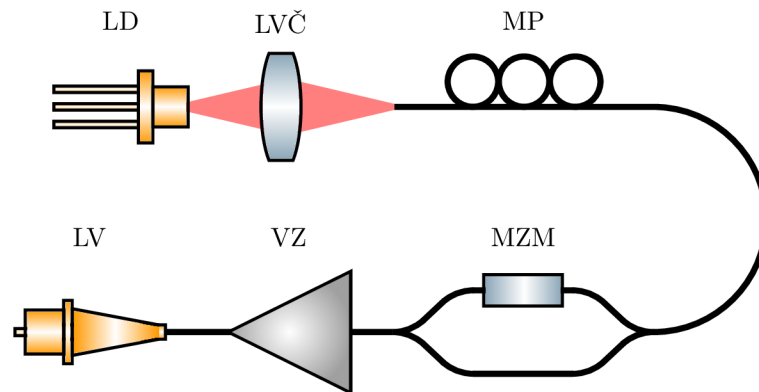
5. Zostavenie funkčných častí

V kapitole 3 sme si uviedli, že jednotlivé funkčné časti optického systému budú pozostávať z kombinácie nakupovaných a navrhovaných komponentov. V tejto časti si predstavíme návrhy jednotlivých funkčných častí. Taktiež sme si uviedli, že optický systém sa skladá zo štyroch funkčných častí: systém LiDARu, systém RaDARu, sprievodná optika a riadiaca jednotka. Prvou funkčnou časťou je systém LiDARu, ktorý pozostáva z piatich na sebe závislých funkčných uzlov: svetelný zdroj, skenovacia jednotka, optika emitora, optika detektora a samotný detektor.

5.1. Systém pozemného LiDARu

Svetelný zdroj

Prvým funkčným uzlom, ktorý slúži ku generovaniu svetelného signálu je svetelný zdroj, znázornený na obrázku 5.1. V časti 2.4 sme sa venovali možnostiam realizácie návrhu svetelných zdrojov a modulácie signálu. Vyššie sme si uviedli, že u návrhu pre pozemné účely nie je kladený dôraz na konštrukčné rozmery a preto môžeme svetelný zdroj separovať z hlavného konštrukčného rámu optického systému, taktiež k dosiahnutiu čo najlepších výsledkov je svetelný zdroj navrhovaný na prácu v kontinuálnom režime, signál je modulovaný modulátorom signálu.



Obr. 5.1: Schéma zostavy svetelného zdroja návrhu pre pozemné účely, kde LD je laserová dióda, LVČ je laserový väzbový člen, MP je modulátor polarizácie, MZM je Mach-Zehnderov modulátor, VZ je vlákňový zosilovač a LV je laserový výstup.

Zostava svetelného zdroja začína laserovou diódou operujúcou v kontinuálnom režime s vlnovou dĺžkou 1550 nm o výkone 50 mW (17 dBm). Nízky výkon laserovej diódy je zvolený tak, aby signál diódy dosahoval čo najlepšej kvality a zároveň sa jednalo o diódu s jedným frekvenčným módom. Požiadavkám kladeným na laserovú diódu odpovedala dióda LPSC-1550-FC od firmy THORLABS.

Dióda je následne priamo vyvedená laserovým väzbovým členom do jednomódového optického vlákna, ktorým sa kontinuálny signál ďalej šíri ku modulátoru polarizácie, ktorý slúži k nastaveniu ľubovolnej polarizácie žiarenia. Takto nastavená polarizácia sa potom môže využívať pri pokročilých metódach modulácie a spracovávaní signálu. Pre účeli nastavovania polarizácie sme do návrhu začlenili modulátor polarizácie MPC320 od firmy THORLABS, ktorý funguje na princípe mechanického napätia vyvolaného v optickom vlákne navinuté na bubon. Vyvolanie napätia vo vlákne spôsobí spomalenie jednej z dvoch na seba kolmých zložiek svetla a tak sme schopní meniť polarizáciu. K dosiahnutiu úplnej kontroly nad polarizáciou je potrebné dosiahnuť dva stupne voľnosti pri nastavovaní, preto sú optické polarizátory zostavené z minimálne dvoch bubnových segmentov.[47]

Ďalej pokračuje svetelný signál vláknom na Mach-Zehnderov modulátor signálu, ktorý funguje na princípe rozvetvenia optického vlákna na dve ramená, v jednom ramene je menená fáza svetelného signálu za pomoci elektro-optického fázového modulátora. Fázovo posunutý signál následne interferuje so signálom prechádzajúcim druhým ramenom modulátora. Vzájomnou interferenciou môžeme modulovať výstupnú amplitúdu signálu na výstupe z modulátora. Pre tieto účely sme vybrali Mach-Zehnderov modulátor LN86S-FC od firmy THORLABS, ktorý zároveň svojou zložitejšou konštrukciou umožňuje modulovanie nielen amplitúdu, ale aj fázy na výstupe z modulátora.[48]

Po prechode signálu modulátorom polarizácie a Mach-Zehnderovým modulátorom je signál plne modulovaný pre potreby modulácie signálu s vysokou kvalitou, ale stále nedosahujúcim potrebným výkonom 4,5 W (36,5 dBm) pre super Gaussovský a 4 W (36 dBm) pre Gaussovský priebeh intenzity žiarenia, preto je potrebné svetelný signál zosilniť optickým zosilovačom o minimálne 19 dBm až 19,5 dBm. Pre tieto účely sme zvolili Erbium dopovaný optický vláknový zosilovač od firmy AGILTRON s možnosťou zosilnenia kontinuálneho signálu až o 33 dBm.

Takto zostavený svetelný zdroj dosahuje na výstupe požadovaný výkon s vysokou kvalitou signálu. Zároveň nám zaručuje širokú škálu možností modulácie polarizácia, amplitúdy a fázy signálu. Následne je signál vedený optickým vláknom do systému LiDAR, kde je takto modulovaný signál vychyľovaný pomocou skenovacej jednotky do požadovaného smeru.

Skenovacia jednotka

V poradí druhou funkčnou časťou je skenovacia jednotka, ktorá sa konštrukčne spolu s optikou emitora nachádza na hlavnom konštrukčnom ráme. Pre naše účely sme zvolili použitie systému rýchlo polohovateľných zrkadiel GVS102 od firmy THORLABS. Jedná sa o systém dvoch na seba kolmých zrkadiel so pozlátenou vrstvou. Systém zaručuje spolu s optikou emitora uhlové rozlíšenie až 15 μ rad. Takéto rozlíšenie je však po prechode optikou emitora ešte zmenšené v závislosti na ohniskovej vzdialenosti optiky. Zároveň systém rýchlo polohovateľných zrkadiel umožňuje kontrolu nad tvarom skenovacej vzorky a jej rýchlosťou.

Optika emitora a detektora

Ďalšou funkčnou časťou systému LiDAR je optika emitora a detektora. Ich úlohou je distribuovať svetelný signál do skenovanej roviny a následne tento signál zachytiť a sústrediť na detektor. V návrhu pre pozemné účely nie je návrh limitovaný konštrukčnými rozmermi a preto sú jednotlivé optiky navrhované oddelene.

Detektor

Poslednou funkčnou časťou systému LiDAR je samotný detektor, ktorý ma za úlohu premeniť detegovaný svetelný signál na elektrický signál, ktorý je následne spracovaný riadiacou jednotkou. Pre tieto účely sme zvolili detektor s vysokorýchlostnou InGaAS lavínovou fotodiodou APD310 od firmy THORLABS, ktorá svojimi parametrami spĺňa požiadavky kladené na detektor.

5.1.1. Sprievodná optika

Druhú funkčnou časťou navrhovaného optického systému je sprievodná optika, ktorá slúži k zjednodušeniu práce operátora optického systému, kedy môže skenovaný periméter sledovať infračervenou kamerou a vytvoriť si tak lepšiu predstavu o skenovanej scéne. Skladá sa z dvoch funkčných uzlov, ktorými sú objektív infračervenej kamery a samotná infračervená kamera.

5.2. SYSTÉM LETECKÉHO LIDARU

Objektív infračervenej kamery

Sprostredkováva obraz infračervenej kamere operujúcej v stredných vlnových dĺžkach MWIR infračerveného spektra (3 μm až 5 μm).

Infračervená kamera

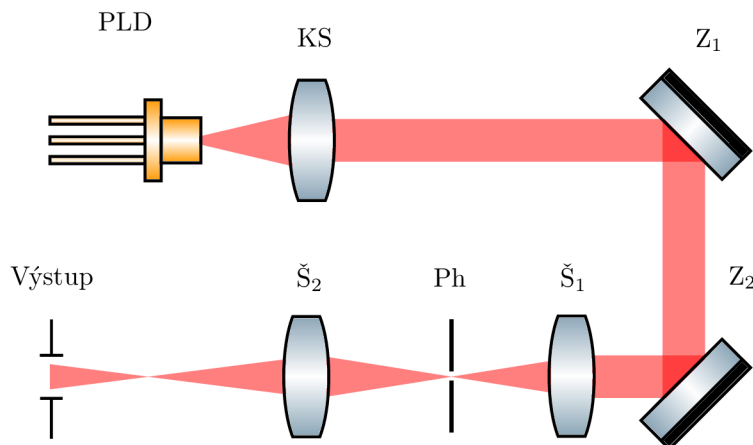
Ako infračervenú kameru sme zvolili kamerový modul bez optiky XCO 640 Series od firmy Xenics, ktorý je schopný vysoko rýchlostného záznamu (až 100 FPS) so senzorom o veľkosti 10,24 x 7,68 mm s rozlíšením 640 x 512 pixelov. Pre tento senzor budeme optimalizovať objektív infračervenej kamery.

Poslednými dvoma funkčnými časťami je riadiaca jednotka a systém RaDARu, o ktorých, ako sme si uviedli vyššie, nebudeme sa v tejto práci zaoberať.

5.2. Systém leteckého LiDARu

Svetelný zdroj

Ako u návrhu pre pozemné účely, je svetelný zdroj prvou funkčnou časťou systému LiDAR. Vyššie sme uviedli, že návrh je vedený k menším konštrukčným rozmerom a nižšej cene. Z týchto dôvodov nebude návrh disponovať možnosťou pokročilej modulácie signálu, na miesto ktorej bude návrh pracovať s pulzným signálom generovaným pulznou laserovou diódou. Schému svetelného zdroja si znázorníme na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Schéma zostavy svetelného zdroja návrhu pre letecké účely, kde PLD je pulzná laserová dióda, KS je korekčný systém, Š₁ a Š₂ sú prvá a druhá šošovka, Z₁ a Z₂ sú prvé a druhé zrkadielko a Ph je priestorový filter (pinhole).

Návrh svetelného zdroja začneme výberom vhodnej laserovej diódy. Pre účely pulzného režimu sme zvolili pulznú laserovú diódu ML1456 od firmy MODULIGHT, ktorá dosahuje vysokého výkonu až 4,5 W v pulznom režime. Na výstupe diódy sa nachádza 1. skupina šošoviek, ktorá sa skladá z dvojice válcových šošoviek LJ1874L2-A a LJ1638L1-A od firmy THORLABS, ktoré slúžia ku korekcii eliptického charakteru laserového zväzku na výstupe laserovej diódy. Je dôležité si uvedomiť, že laserová dióda nevyžaruje signál s dokonalým kruhovým tvarom s Gaussovským priebehom intenzity. Zároveň slúžia ku kolimácii svetelného zväzku do nekonečna. Rovnobežný svetelný zväzok je následne 1. a 2. zrkadielkom presne polohovaný do potrebnej polohy. Jedná sa o zrkadielka uložené v trojbodovom kinetickom uložení umožňujúce presné polohovanie v dvoch na seba kolmých smeroch. Takto presne polohovaný svetelný lúč je následovne kolimovaný 2. asférickou šošovkou AL1225-C od firmy THORLABS na stred otvoru priestorového filteru (pinhole) P25HK od firmy THORLABS s priemerom otvoru 25 μm , ktorý slúži k orezaniu a blokovaníu

šumu a taktiež čiastočne rekonštruuje Gaussovský priebeh intenzity do úrovne kedy je takto ošetrený svetelný signál vhodný na použitie v navrhovanom optickom systéme.[49] Ošetrený signál ďalej pokračuje na 3.šošovku 354171-C od firmy THORLABS, ktorá má za úlohu kolimovať rovnobežný zväzok na zväzok s rozbiehavosťou $\Theta \approx 10^\circ$ na skenovaciu jednotku a optiku emitora, ktoré sú rovnaké ako u návrhu pre pozemné účely.

5.2.1. Ostatné funkčné časti

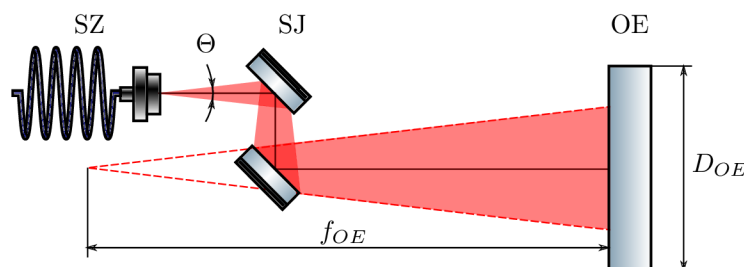
Vyžiarený signál sa následne po interakcií so skenovaným objektom vracia naspäť k systému LiDAR, kde je signál optikou detektora sústredený na detektor, s tým rozdielom, že u návrhu pre letecké účely slúži optika detektora taktiež ako optika IR kamery, tak ako sme si už vyššie uviedli. Tak isto ako u návrhu pre pozemné účely, sme si zvolili detektor APD310 od firmy THORLABS. Ďalej sme si zvolili IR kameru kamerový modul bez optiky FX640I od firmy InfiRay, ktorý je schopný vysoko rýchlostného záznamu (až 100 FPS) s rozlíšením 640 x 512 pixelov. Ako u návrhu pre pozemné účely, tak aj v návrhu pre letecké účely sa poslednými dvoma funkčnými časťami, ktorými sú riadiaca jednotka a systém RaDARu, nebudeme v tejto práci zaoberať.

6. Návrh optického systému

6.1. Návrh optiky emitora

6.1.1. Optické požiadavky

Optika emitora je dôležitým funkčným uzlom celého navrhovaného systému. Jeho úlohou je kolimovať signál, ktorý je vyžiarený svetelným zdrojom a odklonený skenovacou jednotkou, do priestoru skenovanej roviny. Priemer výstupnej apertúry optiky emitora $D_{OM} = 100$ mm a rozbiehavosť laserového zväzku na výstupe zo svetelného zdroja $\Theta \approx 10^\circ$ (rozbiehavosť Gaussovského zväzku na výstupe z jednomódového optického vlákna) sú vstupnými požiadavkami na navrhovanú optiku. Na obrázku 6.1 je znázornená geometria šírenia svetelného signálu od svetelného zdroja po optiku emitora.[50]



Obr. 6.1: Geometriu šírenia svetelného signálu od svetelného zdroja po optiku emitora, kde SZ je svetelný zdroj, SJ je skenovacia jednotka a OE je optika emitora.

Z obrázku 6.1 vyplýva, že navrhovaná optika emitora bude, pri rozbiehavosti svetelného zväzku $\Theta \approx 10^\circ$ a priemerom výstupnej apertúry $D_{OE} = 100$ mm, mať ohniskovú vzdialenosť danú vzťahom $f_{OE} = \frac{D_{OE}}{2} \tan \frac{\Theta}{2} \approx 571,5$ mm, v návrhu budeme počítať s ohniskovou vzdialenosťou $f_{OE} = 600$ mm. Keďže sa jedná o systém, ktorý ma za úlohu premietiť optický signál do skenovanej roviny, v čo najlepšej kvalite, musí optika do prenosu signálu vnášať čo najmenej optických väd. Optické vady by totiž mohli spôsobovať deformáciu výslednej premietanej stopy alebo deformáciu celej skenovanej vzorky, a tak by mohli spôsobovať skreslenie výsledkov meraní systému LiDAR. Z dôvodu strát výkonu svetelného signálu na optických elementoch a zároveň minimalizáciu optických väd bude optika emitora navrhnutá, čo možno z najmenšieho počtu optických elementov. Nižšie si uvedieme tri rôzne návrhy pozostávajúce z jednošoškovkovej optiky, teleskopu mimoosového a Cassegrainovho typu. Všetky optické návrhy budeme navrhovať vo softvéri ZEMAX, Optics studio.

6.1.2. Spôsob definície optických rozhraní

Svetelný zdroj

Prvý návrh optiky emitora bude tvorený jednošoškovkovým riešením s ohniskovou vzdialenosťou $f_{OE} = 600$ mm a priemerom $D_{OE} > 100$ mm. Návrh začneme definovaním vstupných parametrov apertúry podľa tabuľky 6.1.

Typ apertúry	Object Cone Angle
Hodnota apertúry	5° (polovica Θ)
Apodizácia apertúry	Gaussovský priebeh
Hodnota apodizácie/ M^2	1,00

Tabuľka 6.1: Vstupné parametre apertúry

Ďalej nastavíme hodnotu 0° použitého pola a použitej vlnovej dĺžky 1550 nm.

Skenovacia jednotka

Optický návrh pokračuje zostavením skenovacej jednotky. Aby sme vytvorili skenovacie zrkadlo, budeme musieť previesť povrch č. 2 tak, aby odrážal prichádzajúci svetelný signál pod 90° náklonom vzhľadom k povrchu č. 1. Otočenie o 90° prevedieme pomocou funkcie pridať naklonené zrkadlo (Add Fold Mirror) na paneli Lens Data Editor, vyberieme povrch č. 2 a zvolíme si typ naklonenia okolo osi X o -90° . Rovnakú operáciu opakujeme pre povrch č. 2, len s tým rozdielom, že náklon prevedieme o 90° okolo osi Y, tabuľka 6.2. Takto vytvorené dve zrkadlá nám poslúžia ako náhrada za model dvojosového skeneru GV102 od firmy THORLABS.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]
0	obj. rovina	nekonečno	10,00	
1	prerušenie s.s.		0,00	
2	zrkadlo	nekonečno	0,00	3,39
3	prerušenie s.s.		-15,00	
4	prerušenie s.s.		0,00	
5	zrkadlo	nekonečno	0,00	5,56
6	prerušenie s.s.		200,00	
7	obr. rovina	nekonečno		

Tabuľka 6.2: Zostavenie Lens Data Editor pre skenovaciu jednotku, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.

Môžeme si všimnúť, že OpticStudio pridalo štyri nové plochy prerušenia súradnicového systému (coordinate break) obklopujúce povrchy č. 2 a č. 5 skenovacích zrkadiel, obrázok 6.2. Prerušenia súradníc neohýba lúče a nijako ich neovplyvňujú, len definujú nový súradnicový systém v zmysle posunu a naklonenia vzhľadom na predchádzajúci povrch. To je veľmi užitočné, pretože nám to umožňuje oddeliť geometriu súradníc od optických vlastností povrchov. V tejto súvislosti OpticStudio u niektorých povrchov zadefinovalo zápornú hodnotu osovej hrúbky povrchu, ktorá je spôsobená šírením svetla v opačnom smere. Aby sme so zrkadiel spravili skenovaciu jednotku musíme jednotlivé zrkadlá nakloniť okolo ich nominálnej polohy. V tomto prípade budeme zrkadlá nakláňať o $\pm 1^\circ$, ktoré odpovedajú spolu s optikou emitora vyoseniu svetelného lúču v skenovacej rovine o 15 m. Náklony jednotlivých zrkadiel musíme kompenzovať pomocou nástroja náklon a posun elementu (Tilt/Decenter Elements), ktorý nájdeme na paneli nástrojov Lens Data Editor. Tieto kompenzácie zabránia nakláňaniu optických elementov voči počiatkovej súradnicovej sústave. Aplikujeme náklon $\pm 1^\circ$ okolo osí X a Y podľa potreby, tabuľka 6.3.

Náklon a posun elementu			
Prvý povrch:	povrch č. 3	Posledný povrch:	povrch č. 3
δx:	0	φx:	-1
δy:	0	φy:	0
Poradie:	posun potom náklon	φz:	0

Tabuľka 6.3: Nastavenie náklonu a posunu elementu skenovacej jednotky.

V tomto štádiu môžeme jednoduchým zadaním údajov do parametra náklon okolo X ľubovoľne nakláňať obe skenovacie zrkadlá. Z dôvodu neskoršej optimalizácie je však potrebné definovať rôzne náklony skenovacích zrkadiel zostavením viacerých konfigurácií. Zostavíme si preto deväť konfigurácií, ktoré zostavíme v editore konfigurácií (Multi-Configuration Editor). Následne definujeme pre každú konfiguráciu operand PRAM pre povrchy č. 3 a č. 8. Operand PRAM je definovaný pre jeden parameter , v našom prípade parameter náklonu buď okolo osi X alebo Y. Hodnoty konfigurácií si uvedieme v tabuľke 6.4.

6.1. NÁVRH OPTIKY EMITORA

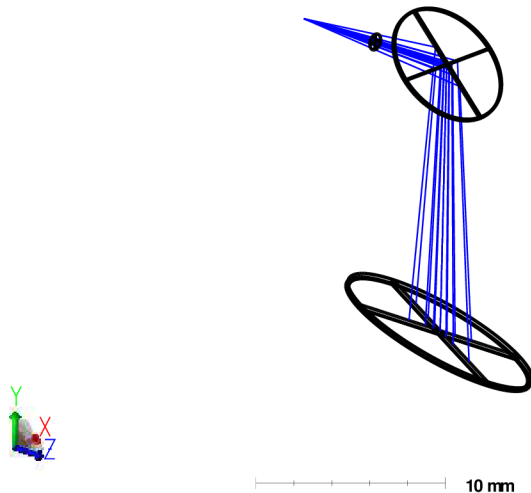
Konfigurácia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PRAM 3/4	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
PRAM 8/4	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1

Tabuľka 6.4: Editor konfigurácií pre skenovaciu jednotku.

Lens data Editor pre konfiguráciu 5 (nominálna konfigurácia) nadobúda tvaru, tabuľka 6.5.

	Typ povrchu	δx [mm]	δy [mm]	φx [°]	φy [°]	φz [°]
0	obj. rovina					
1	clona					
2	prerušenie s.s.	0,00	0,00	-45,00	0,00	0,00
3	prerušenie s.s.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	zrkadlo					
5	prerušenie s.s.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	prerušenie s.s.	0,00	0,00	-45,00	0,00	0,00
7	prerušenie s.s.	0,00	0,00	0,00	45,00	0,00
8	prerušenie s.s.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	zrkadlo					
10	prerušenie s.s.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	prerušenie s.s.	0,00	0,00	0,00	45,00	0,00

Tabuľka 6.5: Zostavenie Lens Data Editor konfigurácie 5 pre skenovaciu jednotku.



Obr. 6.2: 3D pohľad na zostavu skenovacej jednotky.

Po zostavení skenovacej jednotky, znázornenej na obrázku 6.2, môžeme začať so samotnými optickými návrhmi optík emitora.

6.1.3. Jednošošovkové riešenie

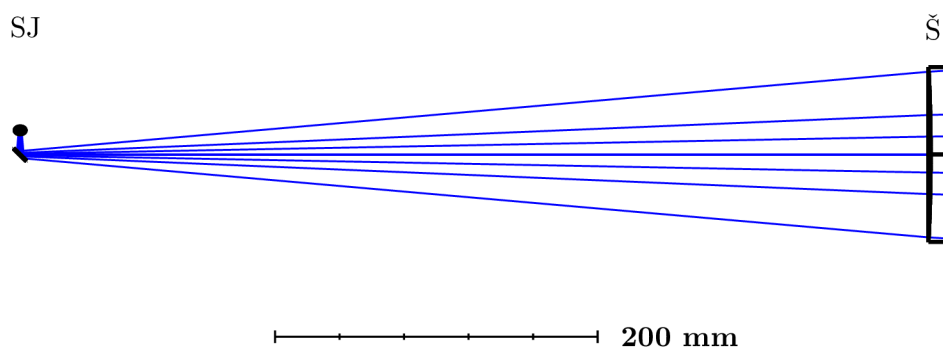
Prvý návrh optiky emitora jednošošovkovým riešením bude pozostávať pre jednoduchosť len z jednej šošovky s ohniskovou vzdialenosťou $f_{OE} = 600$ mm a s priemerom $D_{OE} > 100$ mm. Návrh šošovky bude nadstavbou navrhnutej skenovacej jednotky a bude jej pokračovaním. Ďalej nastavíme hodnoty použitých polí a vlnových dĺžok. Keďže hodnoty použitých polí a vlnových dĺžok sme definovali už pri predošlom návrhu skenovacej jednotky, bude ďalším krokom v návrhu

zostavenie základného modelu šošovky, ktorú budeme optimalizovať. Návrh skenovacej jednotky preto doplníme v Lens Data Editor o jednu šošovku, tabuľka 6.6.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]	Materiál
0	obj. rovina	nekonečno	5,00	0,88	
1	clona	nekonečno	5,00		
2	prerušenie s.s.		0,00		
3	prerušenie s.s.		0,00		
4	zrkadlo	nekonečno	0,00	6,78	
5	prerušenie s.s.		0,00		
6	prerušenie s.s.		-15,00		
7	prerušenie s.s.		0,00		
8	prerušenie s.s.		0,00		
9	zrkadlo	nekonečno	0,00	11,12	
10	prerušenie s.s.		0,00		
11	prerušenie s.s.		600,00		
12	1. rozhr. šoš.	-1000,00	15,00	126,43	IRG23
13	2. rozhr. šoš.	-500,00	10 ⁶	128,62	
14	obr. rovina				

Tabuľka 6.6: Zostavenie Lens Data Editor pre jednošošovkové riešenie, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.

Z modelu je zjavná vzdialenosť 600 mm od zdroja žiarenia po začiatok šošovky, obrázok 6.3, ktorá odpovedá ohniskovej vzdialenosti navrhovanej šošovky. Túto vzdialenosť nebudeme zmenšovať prípadnou afokálnou optikou, aby sme zbytočne nevnašali optické vady do systému. Osovú hrúbku šošovky sme určili na 15 mm bez možnosti optimalizácie z dôvodu jednoduchšej vyrobiteľnosti a zároveň, že samotná optimalizácia sa snaží túto osovú hrúbku šošovky zväčšovať do rozmerov kedy je optika zbytočne široká bez významnejšieho vplyvu na kvalitu zobrazovania.



Obr. 6.3: Model zostavy optiky emitora tvoreného jednošošovkovým riešením, kde SJ je skenovacia jednotka a Š je šošovka.

Obrazovú rovinu sme zvolili vo vzdialenosti 10 km, ktorá zodpovedá hornej hraničnej hodnote, v ktorej musí byť optický systém schopný plne fungovať. Materiál šošovky sme zvolili IRG23 z katalógu SCHOTT IR materiálov. Katalóg je určený pre návrhy v krátkych, stredných a dlhých vlnových dĺžkach infračerveného spektra.

6.1.4. Optimalizácia

Meritná funkcia

V tabuľka 6.7 je zoznam operandov, ktoré budeme používať pri zostavovaní a optimalizovaní meritnej funkcie a konfigurácií.

6.1. NÁVRH OPTIKY EMITORA

APER	(Aperture) Veľkosť apertúry.
CONF	(Configuration) Umožňuje od seba rozlišovať jednotlivé konfigurácie v jednom parametri.
CTGT, CTLT, CTVA	(Center thickness greater than, Center thickness less than, Center thickness value) Nastavenie osovej hrúbky povrchu.
CVGT, CVLT, CVVA	(Curvature greater than, Curvature less than, Curvature value) Nastavenie polomeru zakrivenia povrchu.
DMGT, DMLT, DMVA	(Diameter greater than, Diameter less than, Diameter value) Nastavenie radiálneho priemeru povrchu.
MXET, MNET, ETVA	(Maximum edge thickness, Minimum edge thickness, Edge thickness value) Nastavenie okrajovej hrúbky povrchu.
EFFL	(Effective focal length) Ohnisková vzdialenosť optického systému.
EFLX	(Effective focal length in x plane) Ohnisková vzdialenosť medzi dvomi povrchmi.
EFNO	(Effective F/#) Nastavenie clonového čísla pre konkrétny povrch.
GMTS, GMTT, GMTA	(Geometric MTF sagital, Geometric MTF tangencial, Geometric MTF average) Nastavenie hodnoty MTF.
MECA	(Moore-Elliot Contrast) Metóda Moore-Elliottovho kontrastu, slúži k optimalizácii MTF.
PRAM	(Parameter value) Nastavenie ľubovoľného parametra ako variabilný pre rôzne konfigurácie.
THIC	(Thickness) Nastavenie osovej hrúbky povrchu v editore konfigurácií.
TTGT, TTLT, TTVA	(Total thickness greater than, Total thickness less than, Total thickness value) Nastavenie úplnej hrúbky povrchu.
TTHI	(Sum of thickness) Nastavenie súčtu osových šírok povrchov v rozsahu dvoch povrchov.

Tabuľka 6.7: Zoznam použitých operandov pri optimalizácii meritnej funkcie.

Optimalizáciu začneme vygenerovaním základnej meritnej funkcie kladením dôrazu na dosiahnutie najmenšieho výsledného spotu v obrazovej rovine a minimalizovanie optických vád zobrazovania. V časti 4.2 sme si určili najmenší dosiahnuteľný spot v závislosti na difrakčnom limite výstupnej apertúry skenovacej optiky, ktorý je za daných podmienok veľký $D_G = 197$ mm pre Gaussovský a $D_{sG} = 316$ mm pre super Gaussovský lúč. Meritnú funkciu doplníme o operand $EFFL = 600$ mm pre každú konfiguráciu. Ďalej nastavíme polomery povrchov č. 12 a č. 13 a osovú hrúbku povrchu č. 11 ako variabilné hodnoty, pre ktoré bude meritná funkcia riešiť optimalizáciu. Taktiež nastavíme materiál povrchu č. 12 ako substitučný. Prevedieme Hammerovu optimalizáciu. Po ukončení optimalizácie nadobúda optický systém parametre zhrnuté v tabuľke 6.8.

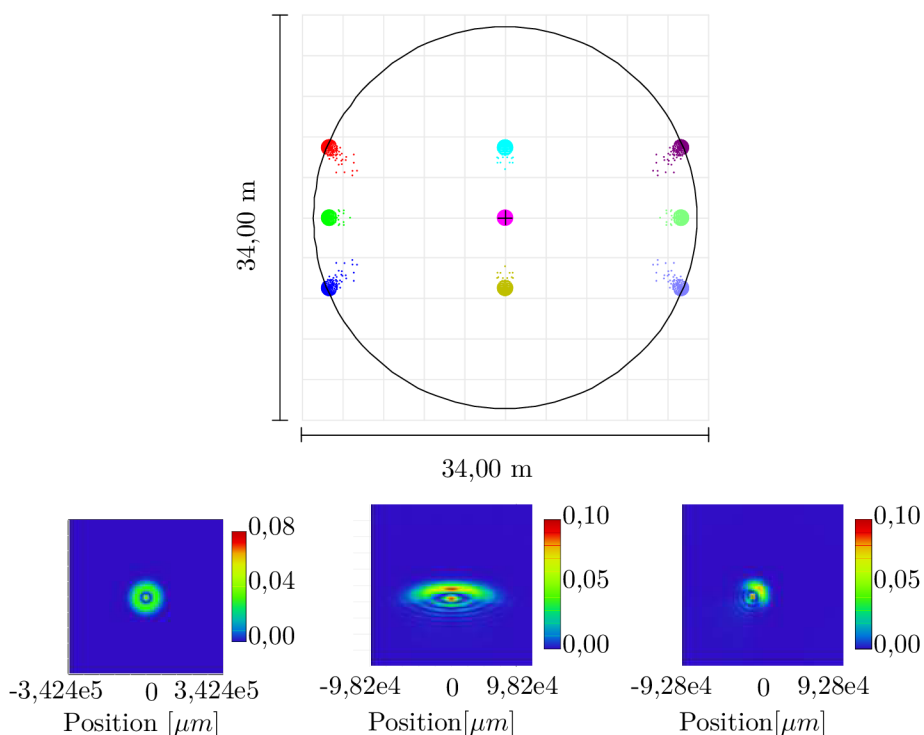
	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]	Materiál
0	obj. rovina	nekonečno	5,00		
1	clona	nekonečno	5,00	0,88	
2	prerušenie s.s.		0,00		
3	prerušenie s.s.		0,00		
4	zrkadlo	nekonečno	0,00	6,78	
5	prerušenie s.s.		0,00		
6	prerušenie s.s.		-15,00		
7	prerušenie s.s.		0,00		
8	prerušenie s.s.		0,00		
9	zrkadlo	nekonečno	0,00	11,12	
10	prerušenie s.s.		0,00		
11	prerušenie s.s.		564,55		
12	1. rozhr. šoš.	-1078,77	15,00	124,24	IRG23
13	2. rozhr. šoš.	-556,05	10 ⁶	126,40	
14	obr. rovina				

Tabuľka 6.8: Zostavenie Lens Data Editor pre optimalizované jednošoškové riešenie, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.

6.1.5. Analýza

Keďže sa jedná o osvetľovaciu jednotku najdôležitejším ukazovateľom kvality je tvar a priebeh intenzity svetelnej stopy v skenovanej rovine. K tomu nám poslúži rozptylová funkcia (point spread function, PSF). Rozptylová funkcia popisuje tvar stopy, do ktorej sa v obrazovej rovine vykreslí bodový zdroj (v našom prípade výstup zo svetelného zdroja) svetla po prechode optickým systémom. Na obrázku 6.4 si znázorníme jednotlivé PSF pre rôzne konfigurácie.

6.1. NÁVRH OPTIKY EMITORA

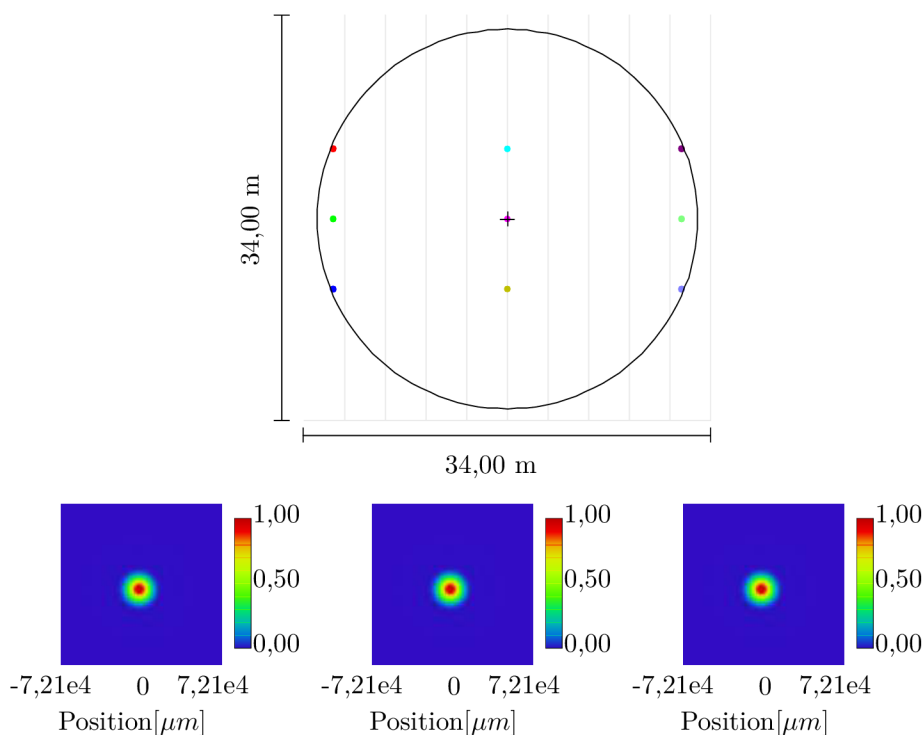


Obr. 6.4: PSF optimalizovaného jednošoškového riešenia pre polia nachádzajúce sa v strede, v strede hore a vpravo hore.

Z jednotlivých krajných stôp vyplýva, že takto jednoduchá optika nebude spĺňať požiadavky pre navrhovaný systém, preto pridáme asférický povrch 6. rádu na prednú stranu šošovky, na povrch č. 12. Konečná optimalizovaná optika emitora jednošoškového riešenia nadobúda hodnoty v tabuľke 6.9 s PSF znázornenou na obrázku 6.5

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d_e [mm]	Materiál	k	A_4	A_6
0	obj. rovina	nekonečno	5,00					
1	clona	nekonečno	5,00	0,88				
2-11	skn. jed.		564,55					
12	1. rozhr. šoš.	-1093,77	15,00	124,24	IRG23	$-1,77 \cdot 10^{-6}$	$-1,50 \cdot 10^{-10}$	$2,67 \cdot 10^{-17}$
13	2. rozhr. šoš.	-556,05	10^6	126,40				
14	obr. rovina							

Tabuľka 6.9: Zostavenie Lens Data Editor pre optimalizované jednošoškovkové riešenie s asférickou šošovkou, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.



Obr. 6.5: PSF optimalizovaného jednošoškovkového riešenia s asférickou šošovkou pre polia nachádzajúce sa v strede, v strede hore a vpravo hore.

Nnavrhnutú optiku môžeme pri konečnej montáži umelo defokusovať vzájomnou polohou svetelného zdroja optiky emitora podľa potreby, aby sme dosahovali svetelnej stopy o polomere $D_s \approx 500$ mm.

6.1.6. Riešenie mimoosovým ďalekohľadom

Mimoosové parabolické zrkadlo je dôležitou súčasťou v optickom priemysle. Parabolické mimoosové ďalekohľady majú výhodu v tom, že netienia vstupný lúč sekundárnym zrkadlom, a tak nedochádza k stratám na relatívnej svetelnosti ďalekohľadu. K zostaveniu mimoosového ďalekohľadu si musíme najprv objasniť mieru vyosenia primárneho zrkadla voči súradnicovému systému. Návrh začneme definovaním vstupných parametrov apertúry, tabuľka 6.10. Ďalej zostavíme mimoosové parabolické zrkadlo s ohniskovou vzdialenosťou ďalekohľadu $f_{OE} = 600$ mm a so vstupnou apertúrou $D_{EO} > 100$ mm, obdobne ako je tomu u jednošoškovkového riešenia. Na rozdiel od jednošoškovkového riešenia, nebude návrhu predchádzať skenovacia jednotka a postupnosť optických povrchov pôjde od výstupnej apertúry ku svetelnému zdroju. V tabuľke 6.11 a na obrázku 6.7 je znázornený počítačový návrh Lens Data Editor pre riešenie mimoosovým ďalekohľadom.

Typ apertúry	Priemer vstupnej pupily
Hodnota apertúry	120 mm
Apodizácia apertúry	Gaussovský priebeh
Hodnota apodizácie/ M^2	1,00

Tabuľka 6.10: Vstupné parametre apertúry pre riešenie mimoosovým ďalekohľadom.

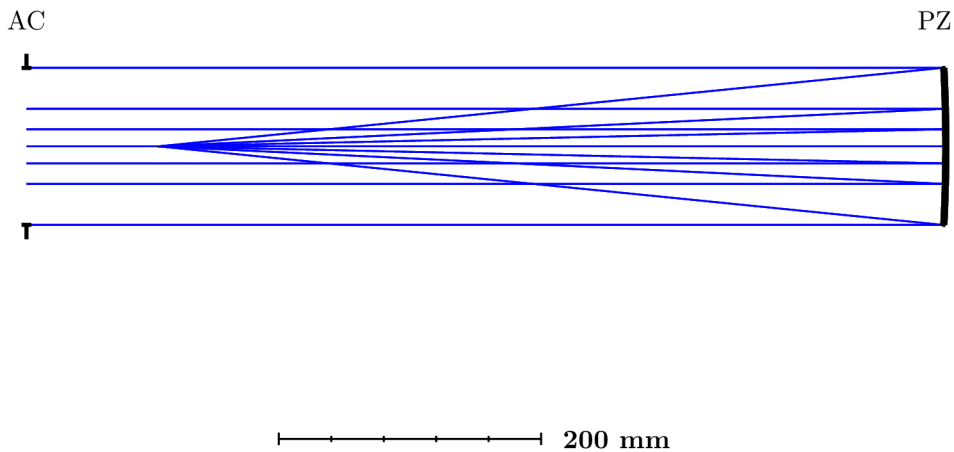
Nastavíme hodnotu používanej vlnovej dĺžky $\lambda = 1550$ nm. Ďalej môžeme začať definovať geometriu samotného systému. Pre lepšie vizualizáciu si vložíme povrch č. 1, ktorý má nahrá-

6.1. NÁVRH OPTIKY EMITORA

dzať vstupnú apertúru optického systému a nastavíme tento povrch ako clonu. Následne vložíme zrkadlo na povrch č. 3. Pretože ohnisková vzdialenosť zrkadla je polovica polomeru zakrivenia, zadáme mu polomer $r = 1200$ mm. Hodnoty ostatných optických povrchou sú definované v tabuľke 6.11.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d ^e [mm]
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno	
1	clona	nekonečno	700,00	120,00
2	zrkadlo	-1200,00	-600,00	120,00
3	obr. rovina	nekonečno		

Tabuľka 6.11: Zostavenie Lens Data Editor pre riešenie mimoosovým ďalekohľadom, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.



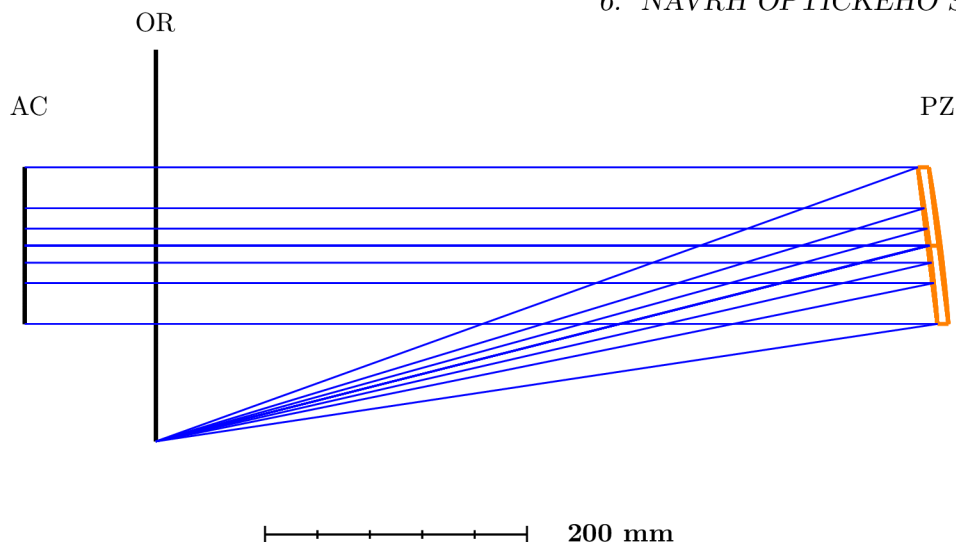
Obr. 6.6: Model zostavy optiky emitora tvoreného mimoosovým riešením, kde AC je apertúrna clona a PZ je primárne zrkadlo.

Navrhnuté zrkadlo je sférického charakteru, preto nezobrazuje dokonalo svetelné lúče do jedného bodu. Aby sme tak učinili musíme sférické zrkadlo zmeniť na parabolické. K tomu nám poslúži rovnica súradnice Z štandardného optického povrchu, ktorá priradzuje súradnicu Z každého bodu v rovine optického elementu a je daná vzťahom 6.1.

$$Z(r) = \frac{c_k r_k^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c_k^2 r_k^2}} + A_4 r^4 + A_6 r^6 + \dots \quad (6.1)$$

kde c_k je polomer zakrivenia (prevrátená hodnota polomeru), r_k je radiálna súradnica voči polohe optickej osi, stredy optického elementu, k je koeficient paraboly a A_4, A_6, \dots sú 4., 6., ... rád asférického povrchu. Koeficientmi k a $A_{2,4,6,\dots}$ môžeme popísať zakrivenie ľubovoľného asférického povrchu. Hodnota koeficientu paraboly k zodpovedá v intervale $(-\infty; -1)$ hyperbole, rovná -1 parabole, v intervale $(-1; 0)$ elipse, rovná 0 sfére a v intervale $(0; \infty)$ sploštenej elipsoide. Ak chceme, aby zrkadlový povrch bol parabolický, zadáme hodnotu koeficientu k : -1 .

Vyosenie zrkadla prevedieme pomocou funkcie posun, kedy optickú os zrkadla povrchu č. 2 posunieme o 150 mm v smere zápornom osi Y a zvolíme možnosť prevrátenia tohoto povrchu (Reverse This Surface), to spôsobí, že nasledujúci optický povrch bude mať prevrátený súradnicový systém. Ďalej nastavíme vlastnosti apertúry povrchu č. 2. Apertúre zvolíme kruhový tvar a posunieme ju o 150 mm v smere osi Y. Taktiež apertúre nastavíme maximálny polomer 60 mm.

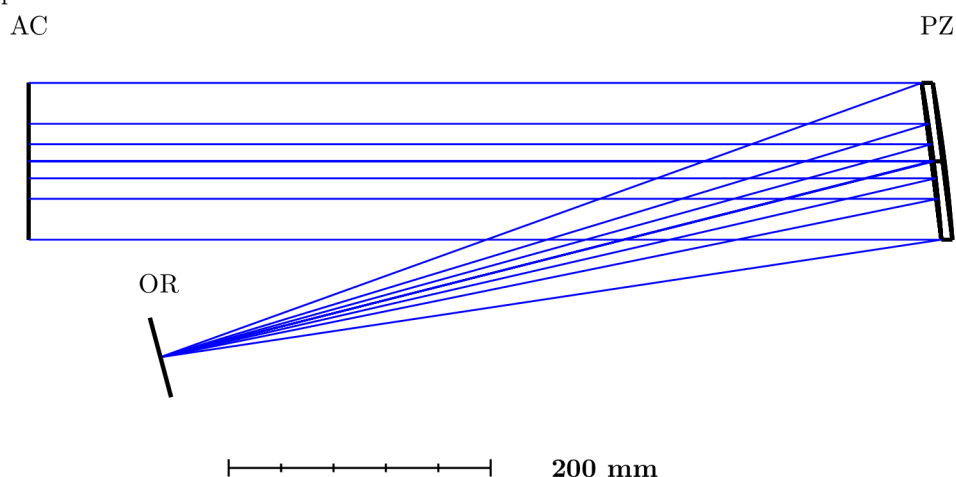


Obr. 6.7: Model zostavy optiky emitora tvoreného mimoosovým riešením s vyosením hlavného zrkadla, kde AC je apertúrna clona, OR je obrazová rovina a PZ je primárne zrkadlo.

Na obrázku 6.7 je optická os za povrchom č. 2 vyosená na rozdiel od obrazovej roviny (čierna zvislá čiara). Aby sme obrazovú rovinu presunuli a pootočili do správnej polohy, vložíme nový povrch prerušenie s.s. medzi povrch zrkadla a obrazovú rovinu a zvolíme riešenie hlavným lúčom (Chief Ray) u parametrov posun δy a náklon φ_x , tabuľka 6.12. OpticStudio automaticky vypočíta hodnotu posunu a náklonu potrebného na to, aby hlavný lúč zasiahol stred novo definovanej obrazovej roviny. Ďalekohľad nadobúda podobu znázornenú na obrázku 6.8.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d_e [mm]	k	δy [mm]	φ_x [°]
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno				
1	clona	nekonečno	700,00	200			
2	zrkadlo	-1200,00	-600,00	200	-1		
3	prerušenie s.s.		0,00			-150,00	-14,25
4	obr. rovina	nekonečno					

Tabuľka 6.12: Parametre vyosenia pre riešenie mimoosovým ďalekohľadom v Lens Data Editor, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.



Obr. 6.8: Model zostavy optiky emitora tvoreného mimoosovým riešením s vyosením hlavného zrkadla a obrazovej roviny, kde AC je apertúrna clona, OR je obrazová rovina a PZ je primárne zrkadlo.

Takto navrhnutú optiku emitora môžeme považovať za hotovú a pripravenú na použitie so ske-novacou jednotkou a následnou optimalizáciou. Pre tieto účely optiku emitora otočíme pomocou

6.1. NÁVRH OPTIKY EMITORA

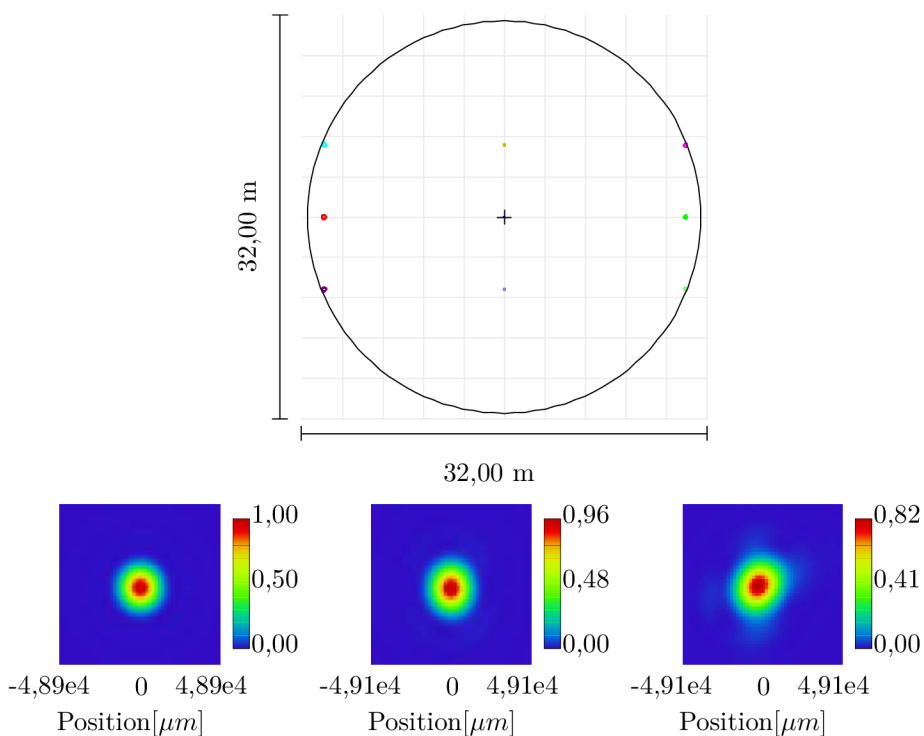
funkcie otočenie elementov (Reverse Elements). Následne pred ňu importujeme model skenovacej jednotky, zvolíme variabilnú hodnotu osovej hrúbky povrchu č. 11 a optimalizujeme. V tabuľke 6.13 si znázorníme hodnoty Lens Data Editor.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]	δy [mm]	φ _x [°]	φ _y [°]
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno				
1	clona	nekonečno	700,00	0,88			
2-11	sken. jed.		556,57				
12	prerušenie s.s.		0,00				45,00
13	zrkadlo	-1200,00	-600,00	200			
14	prerušenie s.s.		0,00		-150,00	-14,25	
15	obr.rovina	nekonečno					

Tabuľka 6.13: Lens Data Editor pre mimoosový ďalekohľad so skenovacou jednotkou, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.

6.1.7. Analýza

Ako sme si už uviedli u analýzy jednošošovkového riešenia, najdôležitejším hodnotiacim faktorom je tvar a priebeh intenzity premietanej stopy v skenovanej rovine, k tomu nám opäť poslúži rozptylová funkcia znázornená na obrázku 6.9.

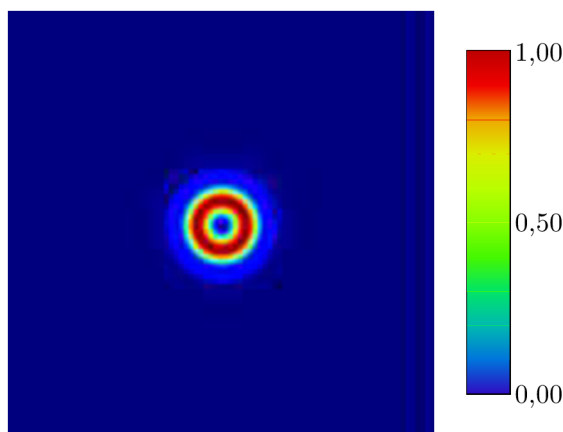


Obr. 6.9: PSF optimalizovaného riešenia s mimoosovým ďalekohľadom s asférickou šošovkou pre polia nachádzajúce sa v strede, v strede hore a vpravo hore

Z obrázku 6.9 vyplýva, že dosiahnutá kvalita prenosu svetelného signálu riešená mimoosovým ďalekohľadom spĺňa požiadavky na optiku emitora.

6.1.8. Riešenie Cassegrainovým typom ďalekohľadu

Riešenie Cassegrainovým typom ďalekohľadu nie je pri predošlej voľbe svetelného zdroja vhodným riešením. Je to spôsobené tienením svetelného signálu sekundárnym zrkadlom. Takéto tienenie je pri použití svetelného signálu s Gaussovským priebehom intenzity veľmi stratové, keďže pozícia sekundárneho zrkadla sa prekrýva s maximom Gaussovského lúča pri priamom osvetľovaní. V bežnej praxi sa takýto problém rieši použitím lúča v tvare donutu (doughnut-shape vortex beam), obrázok 6.10, ktorý sa modeluje implementovaním špirálovej fázovej doštičky. Návrh riešenia Cassegrainovým typom ďalekohľadu nebude realizovaný.



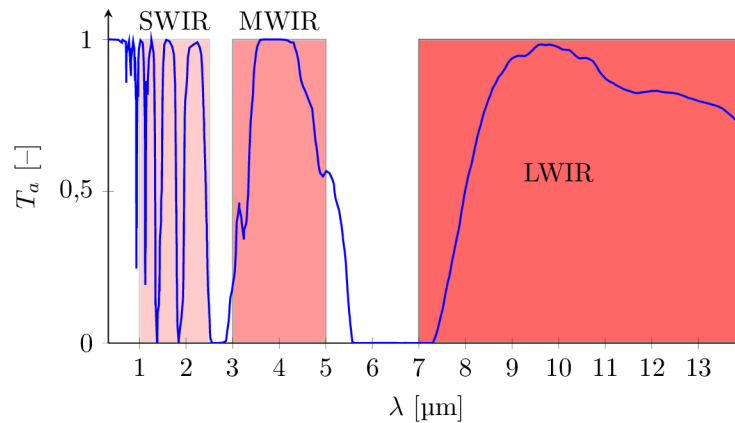
Obr. 6.10: PSF Doughnut-shape vortex beam, vytvorený po prechode laserového zväzku špirálovou fázovou doštičkou. Prevzaté z [78] a upravené.

6.2. Návrh optiky infračervenej kamery

6.2.1. Optické požiadavky

Súčasťou optických návrhov je aj objektív pre infračervenú kameru, ktorá má charakter sprievodnej optiky a na funkčnosti systému LiDAR sa nepodiela. Slúži k účelom zobrazovania v infračervenom spektre vlnových dĺžok, tak aby sa dal zobrazovací systém používať cez deň, ale aj v noci. Úlohou sprievodnej optiky je umožniť operátorovi optického systému pozorovať skenovaný periméter práve cez infračervenú kameru. O prepojení kamerového systému a systému LiDAR a o ich vzájomnej komunikácii sa nebudeme v tejto práci venovať. Zameriame sa hlavne na optický návrh objektívu sprievodnej optiky. Ideálnym systémom pre diaľkové pozorovanie cez deň a zároveň v noci, ktoré má možnosť sledovania za každého počasia je optický systém zobrazovania v infračervenom spektre žiarenia. Infračervené spektrum je však široké a skladá sa z 3 pásiem, ktoré sú pomerne málo absorbované zemskou atmosférou. Sú to pásma krátkych (SWIR) od 1 μm do 2,5 μm , stredných (MWIR) od 3 μm do 5 μm a dlhých (LWIR) od 7 μm do 14 μm infračervených vlnových dĺžok, obrázok 6.11.

6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY



Obr. 6.11: Delenie infračerveného spektra žiarenia.

Keďže navrhovaný systém LiDAR pracuje s vlnovou dĺžkou 1,55 μm , ktorá sa nachádza v pásme SWIR je toto pásmo nevhodné pri návrhu infračervenej kamery, lebo by mohlo dochádzať k nežiadúcim výkyvom jasu obrazu počas skenovania, v dôsledku typicky malého dynamického rozsahu infračervených kamier. Zároveň pásma MWIR a LWIR sa považujú za pásma termálneho zobrazovania, čo znamená, že umožňujú pozorovať a rozlišovať od seba objekty len na základe rozdielov ich povrchových teplôt, zobrazujú obraz vo forme teplotného gradientu.[51]

Pri výbere vhodného rozsahu vlnových dĺžok infračervenej kamery si medzi MWIR a LWIR musíme objasniť výhody a nevýhody používania jednotlivých rozsahov.

Prvým faktorom je teplota podnebného pásma akému je systém vystavený. Všeobecne je známe, že zobrazovacie systémy MWIR nachádzajú svoje uplatnenie najmä v teplejších podnebných pásmach, kde majú možnosť zobrazovať väčšie kontrasty pri vyšších teplotách. Na druhej strane zobrazovacie systémy LWIR lepšie pracujú v chladnejších podnebných pásmach.

Druhým faktorom je atmosférická priepustnosť. Systémy MWIR sú menej náchylné na atmosférickú vlhkosť ako systémy LWIR, preto sú vhodnejšie na diaľkové pozorovanie presahujúce 10 km. Na druhej strane sú systémy LWIR menej náchylné na aerosóly a dym.

Tretím faktorom je termálny kontrast. Pre väčšinu situácií sledovania objektu (osoba, naštartované vozidlo), dochádza k väčšiemu toku tepelnej energie emitovanej objektom v pásme LWIR. Naopak tepelný kontrast (rozdiel tepelného toku pozorovaného objektu a pozadia), ktorý vytvára tepelný obraz, je väčší v pásme MWIR, preto sú systémy MWIR často preferovanou voľbou zobrazovacích systémov. Okrem toho je použitie pásma MWIR tiež lepšou voľbou, pri detekcii lietadiel alebo rakiet, kedy horúci oblaky splodín za takýmto objektom vytvára u zobrazovacích systémov pracujúcich v pásme MWIR oveľa lepší kontrast.

Štvrtým faktorom je citlivosť systému na Slnko. Systémy LWIR sú zanedbateľne ovplyvnené slnečným žiarením, a tak nevznikajú pri zobrazovaní nežiadúce efekty ako napríklad strata kontrastu pri odlesku Slnka na vodnej hladine, zatiaľ čo u systémov MWIR k takýmto efektom dochádza. Systémy LWIR preto poskytujú konzistentnejšie zobrazovanie medzi denným a nočným režimom. Avšak to neznamená, že senzory systémov MWIR alebo LWIR vystavené priamemu slnečnému žiareniu nemôžu byť poškodené. Posledným faktorom je cena. Ako je tomu u väčšine optických systémov, výkon technológie je úmerný cene systému. Opakom nie sú ani termálne zobrazovacie systémy. Nechladené LWIR kamery sú v dnešnej dobe cenovo dostupné a výkonnostne sú dobre využiteľné pre väčšinu aplikácií krátko a stredného dosahu. Chladené MWIR kamery sú drahšie, ale zato poskytujú dobré zobrazovacie vlastnosti pri sledovaní objektu na veľkú vzdialenosť. Chladené LWIR kamery sú zvyčajne najdrahšie, ale poskytujú dobré zobrazovacie vlastnosti aj na veľké vzdialenosti a sú používané na špecifické určenie v armádnom priemysle.[52, 53, 54]

Vzhľadom na vyššie uvedené rozdiely medzi systémami MWIR a LWIR, sme sa rozhodli navrhovať objektív infračervenej kamery pracujúci v spektrálnom pásme MWIR. Ďalšou výhodou používania kratších vlnových dĺžok je, že pri použití rovnakých apertúr a ohniskových vzdialeností, bez ohľadu na optické vady, ponúka pásmo MWIR (kratšie vlnové dĺžky) lepšiu modulačnú prenosovú funkciu (Modulation Transfer Function, MTF), čo má za následok väčší kontrast a rozlíšenie obrazu.

Po vhodnom výbere vlnového spektra žiarenia si predstavme ďalšie vlastnosti navrhovaného objektívu. Jedná sa o parfokálny objektív s možnosťou kontinuálnej zmeny ohniskovej vzdialenosti v rozsahu $f_{IK} = 100 - 500$ mm. Takýto objektív bude vhodný na zoomovanie bez potreby dodatočného preostrovania, čo by mohlo viesť k strate sledovaného rýchlo sa pohybujúceho objektu. Veľkosť senzora, pre ktorý je objektív vhodný použiť, je veľkosť APS-C 23,6 x 15,6 mm s crop faktorom 1,52. Objektív má taktiež premenlivé clonové číslo F/0,83 až F/4,2, z čoho vyplýva priemer vstupnej apertúry $D_{IK} = 120$ mm. Takto zvolený priemer vstupnej apertúry má zaistiť dostatočnú svetelnosť objektívu najmä na sledovanie objektov vo veľkých vzdialenostiach, až do 10 km. Optická sústava musí byť navrhnutá, čo možno z najmenšieho počtu optických elementov s prijateľnou hrúbkou, tak aby optický systém dosahoval najvyššej možnej priepustnosti, ktorá je pri objektívoch infračervených kamier kľúčová.

Návrh

Návrh začneme správne definovanými parametrami apertúry, kde typ apertúry nastavíme ako float by spot size. Ďalej v nastavení polí si zvolíme možnosť definovať polia reálnou výškou obrazu v obrazovej rovine. Toto nastavenie nám umožní si pevne definovať veľkosť plochy obrazovej roviny, ktorá pri návrhu nahrádza reálnu veľkosť senzora. Zvolíme si polia s výškou 0; 5; 10 a 12 mm. Takto zvolené polia pokrývajú celý povrch senzora a samotná optimalizácia sa bude snažiť zlepšovať optické vlastnosti zobrazovania najmä na tejto ploche. Ďalším krokom je nastavenie používaných vlnových dĺžok, ku ktorému môžeme pristupovať dvomi spôsobmi. Prvým postupom je si zdefinovať z počiatku len jednu hlavnú vlnovú dĺžku, pre ktorú budeme zostavovať optický systém a následne doplníme sekundárne vlnové dĺžky pred finálnou optimalizáciou. Takéto riešenie má za úlohu zjednodušiť počiatočné kroky zostavovania optického systému, ale môže viesť vo finálnej optimalizácii k tomu, že riešenie bude konvergovať k nie najoptimálnejšiemu riešeniu. Druhým postupom je si už od začiatku zdefinovať hlavnú a sekundárne použité vlnové dĺžky a ich váhu pri optimalizácii. Takéto riešenie je z hľadiska času optimalizácie zdĺhavejšie, ale vyvarujeme sa neoptimálnym riešeniam.

My budeme pri návrhu postupovať podľa druhého postupu a určíme si hneď od začiatku všetky použité vlnové dĺžky a ich váhy pri optimalizácii, tabuľka 6.14.

	Vl. dĺžka (μm)	Váha
1	4,00	1,00
2	3,00	0,750
3	5,00	0,750

Tabuľka 6.14: Nastavenie vlnových dĺžok a ich váhy pri optimalizácii.

Aby sme s takto zadanými vstupnými parametrami mohli začať navrhovať optický model, musíme si určiť typ optického zoomu, ktorý budeme navrhovať.

Optický zoom

Základnou vlastnosťou optického zoomu je možnosť zmeny počiatočnej ohniskovej vzdialenosti na novú ohniskovú vzdialenosť cez zväčšenie. Schopnosť objektívu meniť ohniskovú vzdialenosť

6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY

zaručuje množstvo šošovkových skupín s pevnou ohniskovou vzdialenosťou zmenou ich vzájomnej polohy. Existujú dva typy optických zoomov. Prvým je opticky kompenzovaný zoom a druhým je mechanicky kompenzovaný zoom. Systémy s opticky kompenzovaným zoomom majú jednu lineárne pohybujúcu časť, ktorú využíva premysleného umiestnenia šošoviek.[55]

Systém mechanickej kompenzácie zoomu má minimálne dve pohyblivé časti, zvyčajne variátorovú a kompenzačnú sústavu šošoviek. V súčasnosti majú všetky optické systémy zoomu veľmi zložité vzájomné sa pohybujúce sústavy šošoviek a je pomerne zložité určiť na prvý pohľad, ktorá časť objektívu má akú funkciu.[55]

Systémy zoomovacích objektívov musia spĺňať tri podmienky. Prvou podmienkou je, že musia byť schopné zväčšenia, mať variabilnú ohniskovú vzdialenosť. Druhou podmienkou je, že nemenia pozíciu obrazovej roviny t.j. má pevnú polohu ohniskovej roviny. Tretou podmienkou je zaručená kvalita zobrazovania po celom rozsahu zoomovania. Ak nie je dodržaná druhá podmienka jedná sa o varifokálny objektív. Takéto objektívy sa musia dodatočne doostrovať, čo spôsobuje vyššiu mieru voľnosti, čo môžu viesť k väčším rozsahom ohniskových vzdialeností. Ak nie je dodržaná tretia podmienka môže sa jednáť napr. o bifokálny alebo trifokálny objektív, ktorý má pri kontinuálnej zmene ohniskovej vzdialenosti len dve alebo tri ohniskové vzdialenosti, počas ktorých je objektív zaostrený na obrazovú rovinu.[55]

Pre naše účely sú objektívy, ktoré nespĺňajú 2. alebo 3. podmienku nevyhovujúce, pretože v procese zmeny ohniskovej vzdialenosti by mohla nastať strata sledovaného rýchlo sa pohybujúceho objektu.

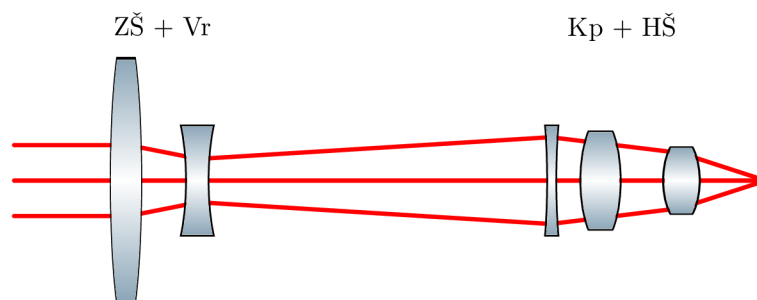
Medzi základné funkčné optické časti systému zoom patria:[55]

- Zaostrovacia šošovka - používa sa na zaostrenie od nekonečna po zaostrenie na konečnú vzdialenosť
- Variátor - šošovka, ktorá sa pohybuje v najväčšom rozsahu a mení zväčšenie
- Kompenzátor - kompenzuje vyostrenie ohniska celého systému počas zväčšenia vyvolaného variátorom.
- Hlavná šošovka - hlavná zobrazovacia šošovka systému a je zodpovedná za clonové číslo a zadnú ohniskovú vzdialenosť objektívu. Zároveň je to optická časť, ktorá disponuje vyšším rádom optických aberácií, tak aby kompenzovala optické vady predošlých sústav šošoviek, a tak zodpovedá za elimináciu optických väd celého systému. Táto časť zvykne byť najzložitejšia a tvorená najväčším počtom optických elementov.

V reálnych prevedeniach optických zoomov sa väčšina optických zoomovacích sústav delia do 4 základných prevedení použitia optických funkčných sústav šošoviek.

2-skupinový systém zoomu

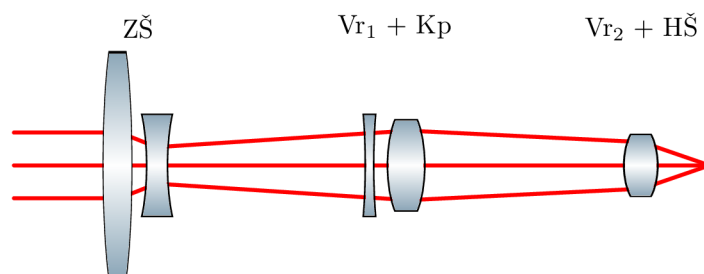
2-skupinový systém zoomu delíme do dvoch hlavných optických foriem, negatívne-pozitívna a pozitívno-negatívna forma. Na obrázku 6.12 je negatívno-pozitívnu optickú formu 2-skupinového systému zoom, keďže prvá skupina má charakter rozptylky a druhá skupina má charakter spojky. Princíp fungovania je podobný retro fokálnemu objektívu so spätným zaostrovaním. Tento systém zoomu sa využíva najmä na menší rozsah zoomovania u objektívov s krátkymi ohniskovými vzdialenosťami, takže sa jedná zväčša o kompaktné širokouhlé objektívy so zoomom. Pre naše účely návrhu sú takéto objektívy nevhodné, keďže od optiky požadujeme veľký rozsah zoomovania pomerne dlhých ohniskových vzdialeností.



Obr. 6.12: Schéma funkčných optických častí 2-skupinového systému zoom, kde ZŠ je zaoštvacia šošovka, Vr je variátor, Kp je kompenzátor a HŠ je hlavná šošovka. Prevzaté z [55] a upravené.

3-skupinový systém zoomu

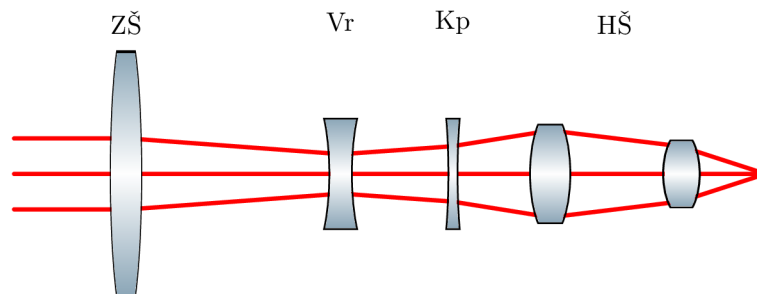
3-skupinový systém zoomu, obrázok 6.13, je obdobou 2-skupinového systému, s tým rozdielom že prvá funkčná optická časť je rozdelená na dve časti (zaoštvacia šošovka a variátor) a tak systém nadobúda viac stupňov voľnosti. Pomocou 3 funkčných optických skupín, je možné v kompaktnej podobe objektívu dosiahnuť väčší rozsah ohniskových vzdialenosti.



Obr. 6.13: Schéma funkčných optických častí 3-skupinového systému zoom, kde ZŠ je zaoštvacia šošovka, Vr₁ a Vr₂ sú variátory, Kp je kompenzátor a HŠ je hlavná šošovka. Prevzaté z [55] a upravené.

4-skupinový systém zoomu

4-skupinový systém zoomu, obrázok 6.14, je najzákladnejší typ systému zoom. Skladá sa zo 4 optických funkčných sústav šošoviek: zaoštvacej šošovky, variátora, kompenzátor a hlavnej šošovky. Vysoký počet stupňov voľnosti umožňuje optickému systému dosahovať veľký rozsah ohniskových vzdialenosti, a tak zväčšiť aj rozsah zorného poľa od 70° do 80° až po dlhé ohniskové vzdialenosti s rozsahom zorného poľa od 25° do 30°. V takýchto systémoch variátor nadobúda najväčší rozsah pohybu. Hlavná skupina šošoviek má zvyčajne afokálny charakter.



Obr. 6.14: Schéma funkčných optických častí 4-skupinového systému zoom, kde ZŠ je zaoštvacia šošovka, Vr je variátor, Kp je kompenzátor a HŠ je hlavná šošovka. Prevzaté z [55] a upravené.

6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY

Multi-skupinový systém zoomu

Multi-skupinový zoom je najzložitejší systém, ktorý obsahuje veľký počet optických funkčných sústav šošoviek na dosiahnutie veľkého rozsahu ohniskových vzdialeností od jednotiek až po tisícky milimetrov (napr. Canon UJ111x8.3B dosahuje rozsahu ohniskových vzdialeností od 8,3 mm do 925 mm). Typickými vlastnosťami takýchto objektívov je aj veľká konštrukčná dĺžka dosahujúca dĺžku niekedy až 0,5 m. Takéto objektívy sa používajú najmä v televíznom priemysle ako napríklad objektív kamery natáčajúca futbalový zápas alebo televíznu show, obrázok 6.15. Pre naše účely je takýto objektív príliš zložitý a zároveň nerealizovateľný, keďže optimalizácia takých veľkých optických sústav je výpočetne extrémne náročná a v bežnej praxi sa vykonáva dlhé hodiny na výkonných serverovniach.



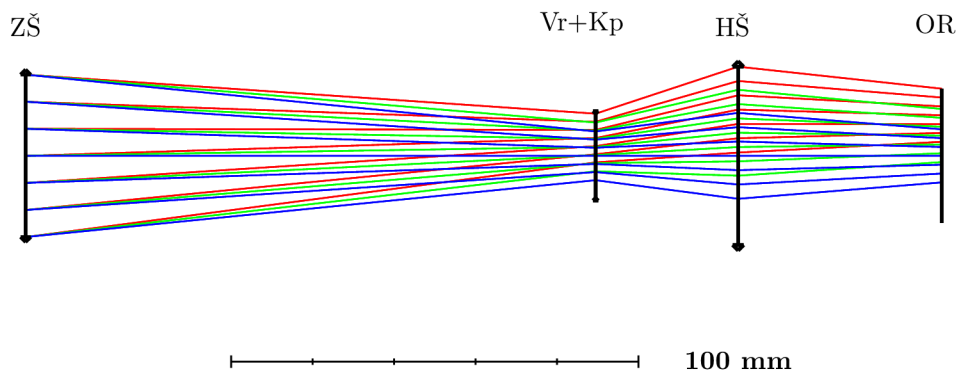
Obr. 6.15: Příklad multi-skupinového systému zoomu. Prevzaté z [79].

6.2.2. Spôsob definície optických rozhraní

V našom návrhu sme sa rozhodli pre návrh 3-skupinového systému z dôvodu nízkeho počtu optických elementov, tak aby objektív dosahoval vysokej priepustnosti. Základný model optického systému sme zostavili z troch paraxiálnych rovín, tabuľka 6.15, obrázok 6.16, ktoré budú neskôršie odpovedať zaostrovacej šošovke, variátora a spoločnej funkčnej skupine kompenzátora a hlavnej šošovky. Predstavu o rozložení optických funkčných sústav šošoviek v optickom systéme sme sa inšpirovali pri pozorovaní návrhov existujúcich objektívov.[56]

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]	f' [mm]
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno		
1	paraxiálny (clona)		140,00	40,12	200,00
2	paraxiálny		35,00	21,35	-26,00
3	paraxiálny		50,00	45,64	50,00
4	obr. rovina	nekonečno			

Tabuľka 6.15: Základná Lens Data Editor navrhovaného objektívu zoom, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.

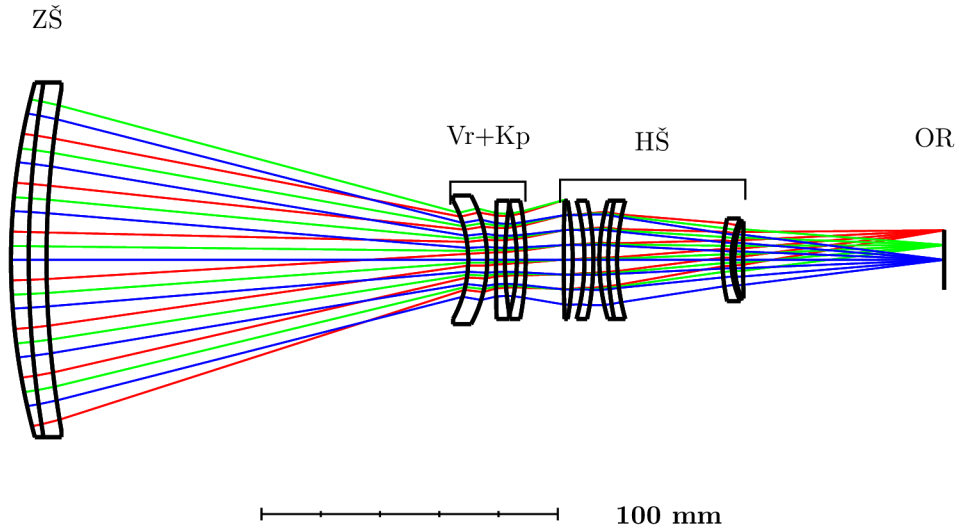


Obr. 6.16: Základný model tvorený paraxiálnymi povrchmi navrhovaného objektívu zoom, kde ZŠ je zaostracia šošovka, Vr + Kr je variátor + kompenzátor, HŠ je hlavná šošovka a OR je obrezová rovina.

Pozíciu clony sme zvolili s prihliadnutím na dosiahnutie optickej sústavy s primeranými šírkami šošoviek. Základnému modelu vygenerujeme počiatočnú meritnú funkciu a doplníme ju o operand EFFL, ktorému zadáme hodnotu ohniskovej vzdialenosti 250 mm, ktorá je približne v strede požadovaného rozsahu ohniskových vzdialeností f_{IK} . Taktiež za pomoci operandu TTHI zadefinujeme maximálnu konštrukčnú dĺžku celého optického systému $l_{IK} = 315$ mm, čo je vzdialenosť od prvého povrchu prvej šošovky až po obrazovú rovinu. Ďalej aby sme sa vyvarovali posunu jednotlivých optických povrchov do mínusových hodnôt a zabránili neskoršej kolízii optických elementov pri aproximácii paraxiálnych plôch reálnymi šošovkami, určíme minimálne hodnoty rozstupov jednotlivých optických plôch za pomoci operandu TTGT na hodnotu 20 mm až 120 mm podľa potreby optického povrchu. Nakoniec operandom TTLT zabránime optimalizácií hľadať nežiadúce riešenia tým, že zabránime príliš veľkému oddalovaniu jednotlivých optických funkčných sústav šošoviek, definovaním maximálneho rozstupu optických povrchov 150 mm až 300 mm podľa potreby optického povrchu. Ďalším krokom je vytvorenie konfigurácií pre rôzne dĺžky ohniskových vzdialeností. V Multi Configuration editore vytvoríme 11 konfigurácií pre 11 rôznych ohniskových vzdialeností. Takto vysoký počet konfigurácií sme zvolili tak, aby sme predišli pri neskoršej optimalizácii omylom, kedy miesto parfokálneho objektívu s kontinuálnym systémom zoomovania, optimalizácia vytvorí bifokálny alebo trifokálny objektív, ktorý by počas procesu zoomovania mal vo svojom rozsahu ohniskových vzdialeností miesta, pri ktorých by bol obraz premietaný na senzor kamery rozostrený. Jednotlivé konfigurácie budú obsahovať operand THIC a APER, pričom operandu APER zadáme hodnotu 20 mm a operand THIC určíme ako variabilný pre 1, 2 a 3 optický povrch. Operand THIC umožňuje optimalizácií nadobúdať rôzne osové hrúbky povrchov medzi funkčnými sústavami šošoviek v závislosti na konfigurácií. To znamená, že jednotlivé konfigurácie sa budú líšiť od seba navzájom len v týchto troch osových hrúbkach a v ohniskových vzdialenostiach, ktoré po obnove meritnej funkcie zvolíme rôzne pre každú konfiguráciu v rovnakých intervaloch v rozsahu f_{IK} od 100 mm do 500 mm pomocou operandu EFFL. Takto nadefinovaný základný model necháme optimalizovať pomocou Hammerovho cyklu dovtedy, kým optimalizácia nenájde ideálne riešenie, ktoré môžeme považovať za kostru základného modelu. V ďalších krokoch budeme postupne nahradzovať paraxiálne optické plochy reálnymi šošovkami. Vždy nahradzame len jednu paraxiálnu plochu šošovkami naraz. Počas optimalizácie sú jedinými variabilnými parametrami krivosti povrchov šošoviek a ich šírky. Pri nedostatočnom optickom výkone alebo nežiadúcim zakrivením optického povrchu, môžeme danej funkčnej sústave šošoviek pridať ďalšiu šošovku. Taktiež môžeme hranice jednotlivých parametrov definovať pomocou operandov EFLX alebo CVLT a CVGT. Operand EFLX použijeme na obmedzenie ohniskovej vzdialenosti zaostracej šošovky na hodnotu 200 mm, ktorá bráni optimalizácií presadzovať väčšie ohniskové vzdialenosti, ktoré spôsobujú pokles svetelnosti objektívu. Po nahradení všetkých paraxiálnych plôch reálnymi šošovkami, prevedieme finálnu opti-

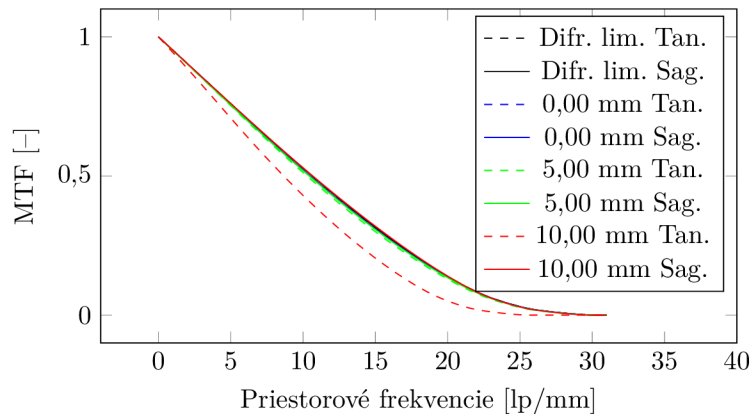
6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY

malizáciu. Zvolíme všetky krivosti optických povrchov ako variabilnú hodnotu, všetky optické materiály ako substitučné. Zadefinujeme požiadavky na svetelnosť objektívu pomocou operandov RELI alebo EFNO a požiadavky na zvýšenie kontrastu MTF operandmi GMTA a MECA. Po takto definovaných podmienkach prevedieme poslednú finálnu optimalizáciu pomocou Hammerovho cyklu. Po ukončení optimalizácie považujeme optický návrh objektívu za dokončený, obrázok 6.17.



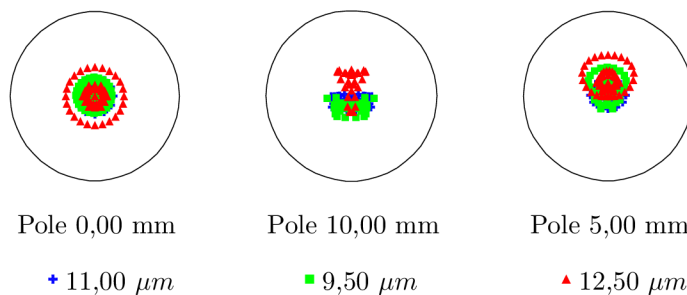
Obr. 6.17: Optimalizovaný model navrhovaného objektívu zoom, kde ZŠ je zaostracia šošovka, Vr + Kr je variátor + kompenzátor, HŠ je hlavná šošovka a OR je obrezová rovina.

Navrhnutý objektív sa vo všetkých konfiguráciách t.j. pri všetkých ohniskových vzdialenostiach, snaží dosahovať vysokých hodnôt MTF, približujúci sa difrakčnému limitu, obrázok 6.18.

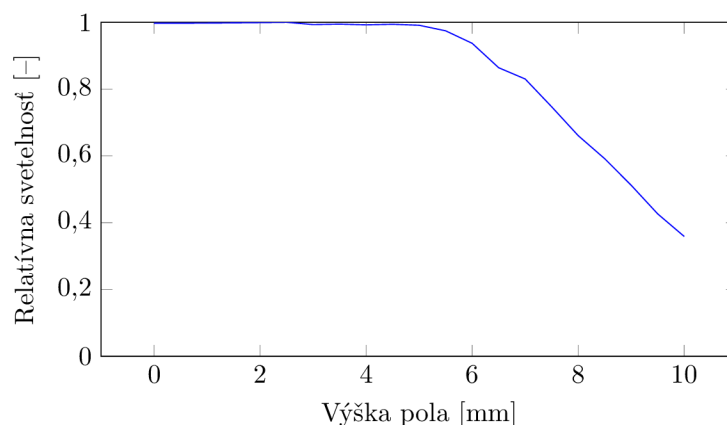


Obr. 6.18: MTF objektívu zoom.

Zároveň objektív dosahuje relatívne vysokej kvality optických spotov, obrázok 6.19. Kedy optické vady ovplyvňujúce kvalitu zobrazovania sú pod rozlišovacou schopnosťou optického systému a optické vady významnejšie neovplyvňujú kvalitu zobrazovania a pri vhodnom výbere infračerveného senzora kamery, bude objektív dosahovať relatívne vysokého rozlíšenia a kvalitného zobrazovania.

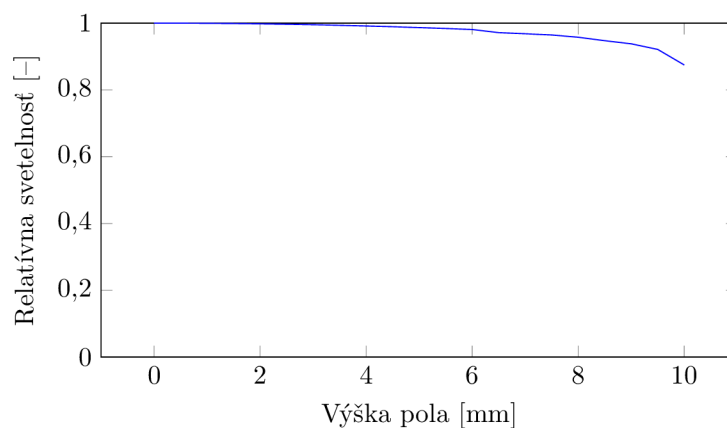
Obr. 6.19: Spot diagram objektívu zoom s priemerom 32,16 μm Airyho stopy.

Na druhej strane navrhnutý objektív trpí na prudký pokles relatívnej svetelnosti pri okrajoch senzora u konfigurácií s menšími ohniskovými vzdialenosťami $f_{IK} < 150$ mm, obrázok 6.20.



Obr. 6.20: Relatívna svetelnosť objektívu zoom.

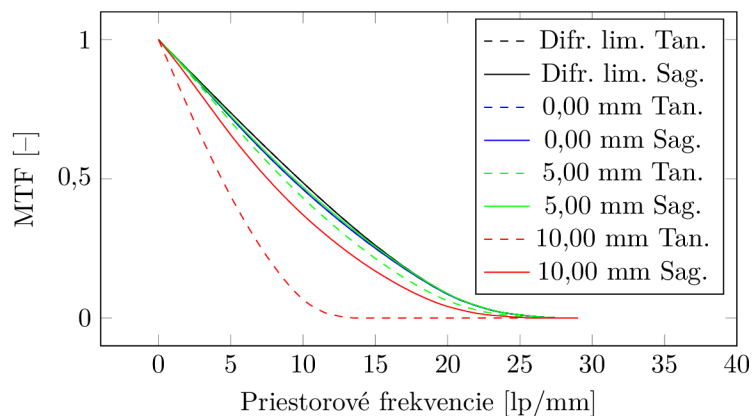
Prudký pokles relatívnej svetelnosti spôsobuje zhoršenie MTF a zároveň spôsobuje neželanú vinetáciu, ktorá by mohla spôsobovať v kombinácii s malým dynamickým rozsahom kamerového senzora prepálené zobrazovanie naprieč sensorom. Aby sme zabránili prudkému poklesu relatívnej svetelnosti, môžeme viesť optimalizáciu k zlepšeniu relatívnej svetelnosti, obrázok 6.21, na úkor kvality zobrazovania. Za pomoci operandov RELI a EFNO upravíme meritnú funkciu a optimalizujeme Hammerovým cyklusom. Optimalizovaný optický systém bude dosahovať vysokej relatívnej svetelnosti pozdĺž celého senzora.



Obr. 6.21: Relatívna svetelnosť objektívu zoom so smerovaním optimalizácie k dosiahnutiu vyššej relatívnej svetelnosti.

6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY

A ako sme si už vyššie povedali, zároveň však klesá kvalita zobrazovania a hodnota MTF, najmä po okrajoch senzora, obrázok 6.22.



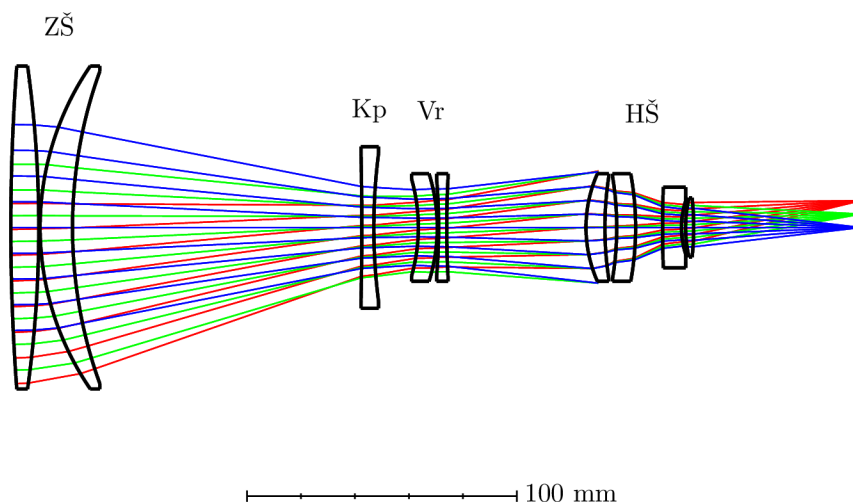
Obr. 6.22: MTF objektívu zoom so smerovaním optimalizácie k dosiahnutiu vyššej relatívnej svetelnosti.

Fakt, že optimalizácia balansuje medzi relatívnou svetelnosťou a kvalitou zobrazovania a nie je možné ju zjednotiť v jeden optický systém s obidvoma kvalitami, je spôsobený nízkym počtom stupňov voľnosti (objektív je tvorený len 3 funkčnými sústavami šošoviek), zároveň sú na základný návrh kladené prílišné požiadavky v zmysle veľkého rozsahu ohniskových vzdialeností alebo požiadavka parfokálneho charakteru navrhovaného objektívu. Ďalšou nevýhodou návrhu je, že obe smerovania optimalizácie vychádzajú z jedného pôvodného 3-skupinového optického návrhu tvoreného výlučne šošovkami so sférickými povrchmi, a tak musí dosahovať kvalitného zobrazovania použitím väčšieho množstva šošoviek. Väčšie množstvo šošoviek spôsobuje, najmä u optík pracujúcich v infračervenom spektre žiarenia, neprípustne nízku mieru priepustnosti $T_{IK} = 6\%$ bez použitia antireflexných vrstiev a $T_{IK} = 65\%$ s použitím antireflexných vrstiev. Je preto nesmierne dôležitý počet optických povrchov pri ďalšom návrhu znížiť.

Aby sme tieto problémy vyriešili musíme v návrhu previesť 4 zásadné zmeny.

- Prvou zmenou je zníženie počtu optických elementov, čiže zmenšenie počtu optických povrchov. Rozhodli sme sa odstrániť 3 šošovky. Dve zo skupiny hlavných šošoviek a jednu šošovku zo skupiny variátor + kompenzátor. Pri eliminácii šošovky sme postupovali tak, že sme danej šošovke v meritnej funkcii nastavili operandom EFLX postupne počas optimalizácií stále väčšiu ohniskovú vzdialenosť, až do štádia, kedy šošovka nadobudla takej veľkej ohniskovej vzdialenosti, že už naďalej nemala na optický systém väčší vplyv a túto šošovku sme mohli odstrániť.
- Druhou zmenou je nahradenie 3-skupinový systém zoomu za 4-skupinový systém pridaním variátorovej šošovky, ktorú sme vytvorili rozdelením predošlej skupiny variátor + kompenzátor. Takýto systém vnáša do výpočtu nový stupeň voľnosti. Túto zmenu z hľadiska väčších nárokov na výpočetný výkon do určitej miery kompenzuje zníženie počtu optických povrchov.
- Treťou zmenou je vytvorenie vzduchovej medzery medzi jednotlivými časťami dubletov. Takýto krok má zabrániť priveľkému spätnému odrazu svetelného žiarenia na rozmedzí medzi šošovkami dubletu, kde priepustnosť nemôžeme korigovať aplikáciou optických antireflexných vrstiev. Zároveň to vnáša do optimalizácie ďalšie stupne voľnosti, ktorými môžeme zlepšovať vlastnosti optického systému.
- Štvrtou zmenou je nahradenie 2 sférických povrchov asférickými povrchmi ako reakcia na zníženú kvalitu zobrazovania spôsobenú menším počtom šošoviek v optickom systéme.

Po zostavení návrhu, prevedieme finálnu optimalizáciu, obrázok 6.23.



Obr. 6.23: Optimalizovaný model navrhovaného objektívu zoom tvoreného 4 funkčnými sústavami šošoviek, kde ZŠ je zaostrivacia šošovka, Kp je kompenzátor, Vr je variátor a HŠ je hlavná šošovka.

Takto navrhnutý optický systém budeme považovať za dokončený a jeho lens data sú v tabuľke 6.16.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]	Materiál	k	A ₄	A ₆
0	obj. rovina	nekon.	nekon.	nekon.				
1	1. r.š.č. 1	833,21	9,86	116,00	CSBR			
2	2. r.š.č. 1	-430,50	0,50	116,00				
3	1. r.š.č. 2	106,00	11,93	116,00	CSBR			
4	2. r.š.č. 2	247,22	108,99	112,00		8,82·10 ⁻⁴	2,23·10 ⁻⁸	4,79·10 ⁻¹³
5	1. r.š.č. 3	-1291,03	5,83	52,00	TI_1173			
6	2. r.š.č. 3	219,53	42,56	52,00				
7	1. r.š.č. 4	-66,40	7,00	36,00	SAPPHIRE			
8	2. r.š.č. 4	-67,93	0,50	32,00				
9	1. r.š.č. 5	-221,82	3,00	32,00	TI_1173			
10	2. r.š.č. 5	338,52	5,00	36,00				
11	1. r.š.č. 6	49,34	7,00	36,00	GAAS			
12	2. r.š.č. 6	125,47	4,29	36,00				
13	1. r.š.č. 7	-109,25	7,00	36,00	ALN	5,21·10 ⁻⁴	-8,02·10 ⁻⁷	7,30·10 ⁻¹⁰
14	2. r.š.č. 7	-111,95	10,00	36,00				
15	1. r.š.č. 8	391,02	7,00	26,00	GERMAN.			
16	2. r.š.č. 8	32,11	1,51	26,00				
17	1. r.š.č. 9	47,48	3,00	22,00	IRG22			
18	2. r.š.č. 9	-105,77	80,00	22,00				
19	obr. rovina							

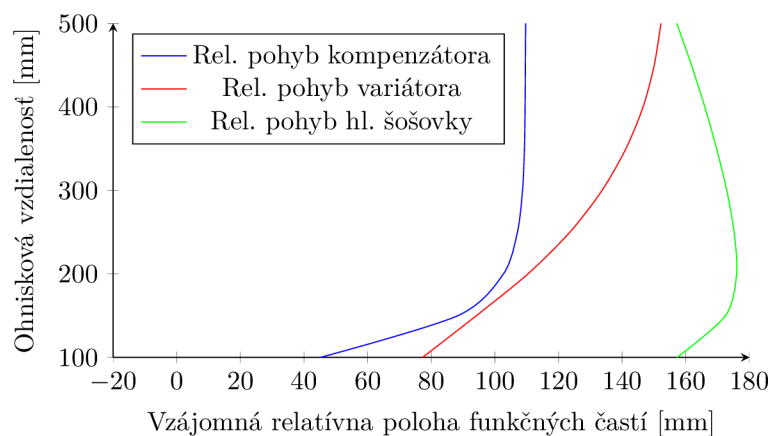
Tabuľka 6.16: Optimalizované lens data objektívu zoom tvoreného 4 funkčnými sústavami šošoviek, kde nekon. znamená nekonečno a r.š.č. znamená rozhranie šošovky číslo.

6.2.3. Analýza

V tejto časti si rozoberieme všetky aspekty kvality zobrazovania navrhnutého objektívu. Keďže sa jedná o objektív operujúci v MWIR infračervenom spektre žiarenia, hlavnými ukazovateľmi kvality zobrazovania je dosiahnutá hodnota MTF a relatívna svetelnosť objektívu resp. F/#.

6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY

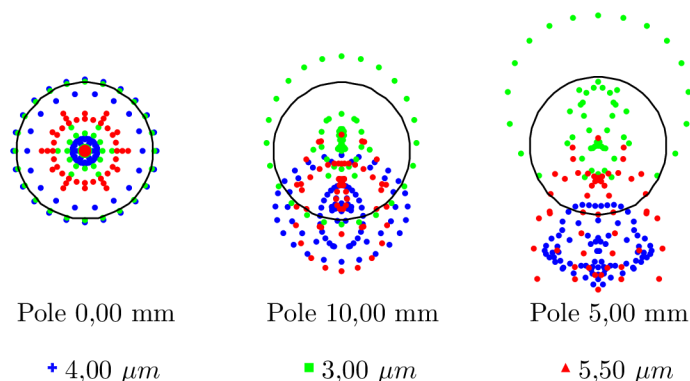
Analýzu však začneme ukázkou kinematiky jednotlivých funkčných sústav šošoviek, ktorá musí byť pre správne fungovanie zoomovania kontinuálna s malými rozdielmi medzi jednotlivými konfiguráciami, obrázok 6.24.



Obr. 6.24: Kinematika jednotlivých funkčných sústav šošoviek pri procese zoomovania.

Bodový diagram

Na obrázku 6.25 si znázorníme bodové diagramy pre tri rôzne polia.



Obr. 6.25: Bodový diagram optimalizovaného objektívu zoom tvoreného 4 funkčnými sústavami šošoviek.

Z jednotlivých bodových diagramov na obrázku 6.25 je zjavné že svetelné lúče sú premietané aj mimo Airiho stopu, ktorá vypovedá o difrakčnom limite navrhovaného objektívu. To znamená, že vplyv jednotlivých optických vád bude mať dopad na výsledné zobrazovanie a budú sa prejavovať ako mierne rozostrenie obrazu. Toto rozostrenie je však relatívne k veľkosti pixela. Je všeobecne známe, že infračervené kamery operujúce v strednom vlnovom spektre MWIR používajú senzory s väčším rozstupom pixelov.

Modulačná prenosová funkcia

Modulačná prenosová funkcia (Modulation Transfer Function, MTF) je schopnosť optického systému rozlíšiť detaily objektu. Často sa vyjadruje ako počet párov čiar na milimeter, kde jeden pár čiar odpovedá sekvenciou jednej čiernej a jednej bielej čiary. Táto miera počtu párov čiar na milimeter lp/mm je tiež známa ako frekvencia. Inverzná hodnota frekvencie udáva vzdialenosť medzi dvoma rozlíšiteľnými čiarami v milimetroch. Čím je kontrast medzi bielou a čiernou čiarou menší, tým pádom je schopný optický systém dosahovať vyššej frekvencie týchto párov čiar. V našom prípade budeme porovnávať výkon optického systému s komerčne dostupným objektívom s kontinuálnym zoomom s rozsahom ohniskových vzdialeností od 20 mm do 275 mm a s clonovým

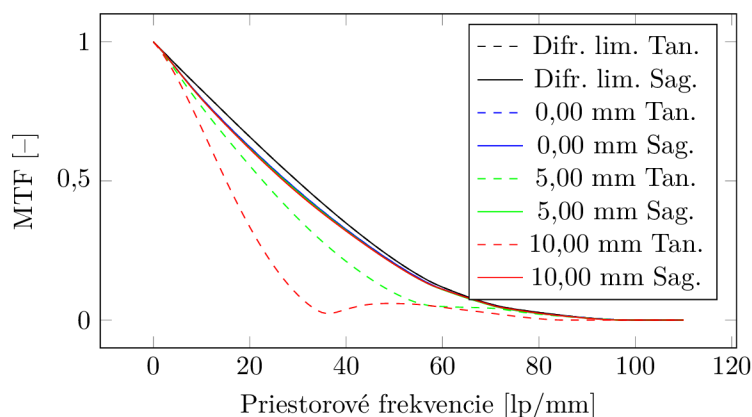
číslo $f/5,5$. Je potrebné si ešte uvedomiť, že náš senzor disponuje značne väčším rozsahom ohniskových vzdialeností f_{IK} od 100 mm do 500 mm a je všeobecne známe, že ak máme dve totožné optické systémy a jeden z nich má značne väčšiu ohniskovú vzdialenosť, bude difrakčný limit tohoto optického systému nižší, keďže MTF ako funkcia priestorového rozlíšenia ξ sa riadi vzťahom 6.2.

$$MTF(\xi) = \frac{2}{\pi}(\varphi - \cos \varphi \cdot \sin \varphi) \quad (6.2)$$

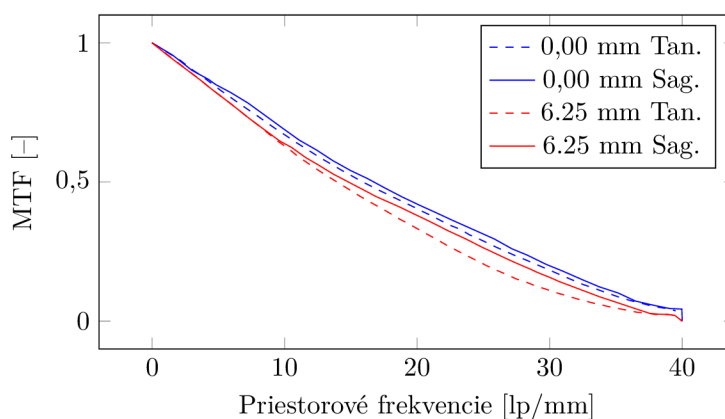
$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{\xi}{\xi_c} \right) \quad (6.3)$$

$$\xi_c = \frac{1}{\lambda \cdot f / \#} = \frac{D}{\lambda \cdot f} \quad (6.4)$$

kde ξ_c je medzná priestorové rozlíšenie, $f/\#$ je clonové číslo, D je priemer vstupnej apertúry, λ je vlnová dĺžka a f je ohnisková vzdialenosť. Tento fakt súvisí so zmenou nastavenia objektívu z nízkeho clonového čísla na vyššie. Nízke clonové čísla majú za následok väčšie uhly, pod ktorými lúče dopadajú na senzor, a tým pádom nižšie clonové čísla dosahujú prirodzene vyššiu mieru MTF.[57]



Obr. 6.26: MTF objektívu zoom tvorený 4 funkčnými sústavami šošoviek.



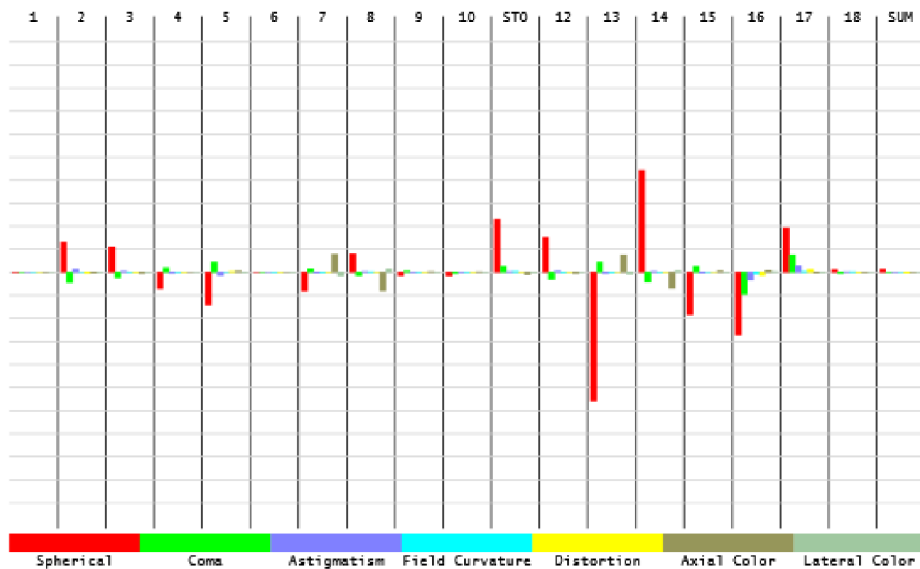
Obr. 6.27: MTF komerčne vyrábaného objektívu zoom. Prevzaté z [58].

Z porovnania MTF na obrázkoch 6.26 a 6.27 vyplýva, že nami navrhnutý optický objektív je v rámci používania rovnako veľkých senzorov nie len konkurencie schopný s komerčne vyvíjanými optickými systémami zoom operujúcimi v infračervenom spektre MWIR, ale taktiež dosahuje lepšie výsledky MTF. Porovnávaný objektív Lightweight 20-275mm $f/5.5$ zoom lens.[58]

6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY

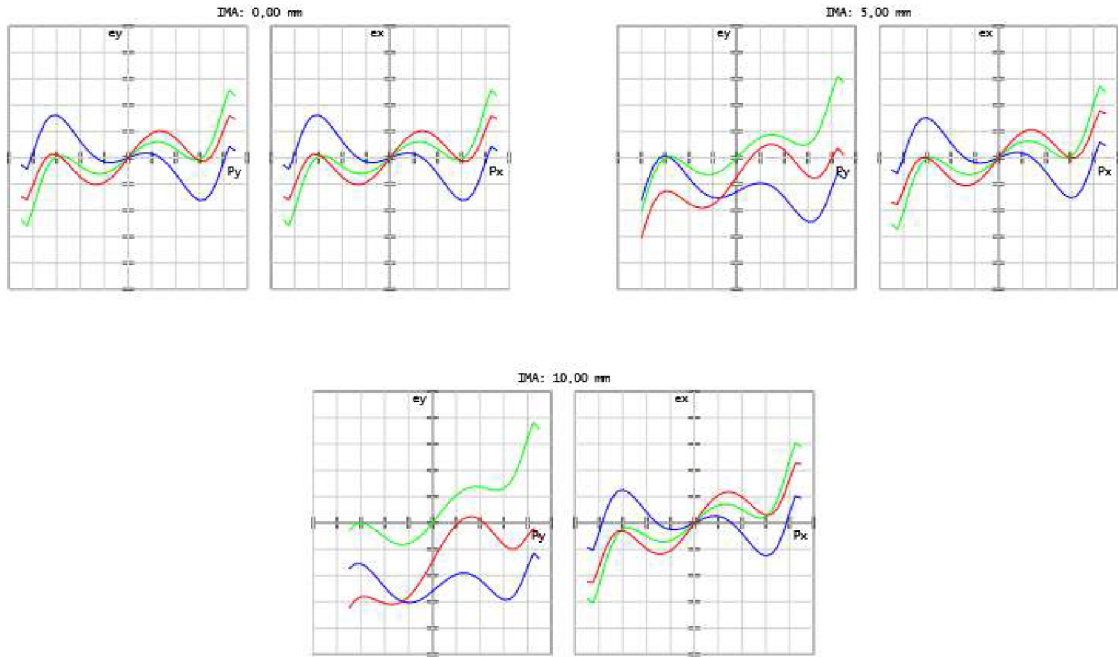
Aberácie

V tejto časti sa budeme zaoberať optickými aberáciami, ktoré ovplyvňujú u jednofarebných senzorov (bez použitia napr. Bayerovej masky) najmä kvalitu MTF, ktorými sú sférická vada, kóma, astigmatizmus, axiálny a laterálny posun farieb, ale aj na vady, ktoré ovplyvňujú celkový vzhľad celého obrazu ako klenutie a distorzia poľa. Predtým si však ukážme ako sa optimalizácia snažila tieto vady korigovať a do akej miery bola optimalizácia úspešná. K tomu nám bude slúžiť Seidelov diagram, obrázok 6.28, vyjadrujúci mieru aberácií jednotlivých optických elementov.



Obr. 6.28: Seidelov diagram objektívu zoom tvorený 4 funkčnými sústavami šošoviek.

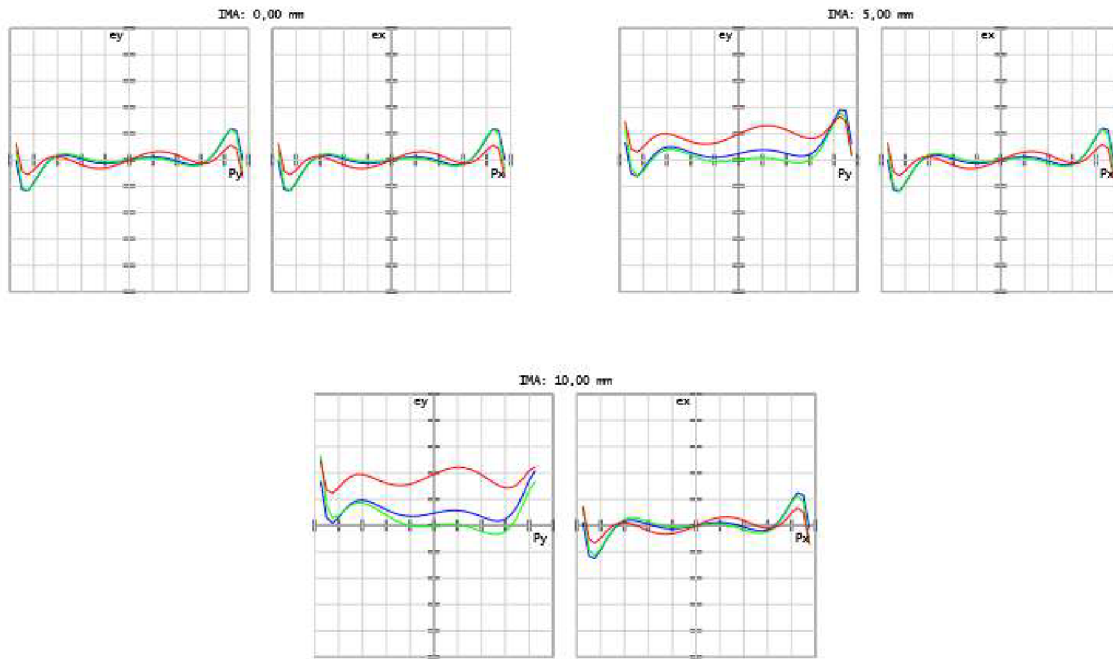
Z diagramu 6.28 je zjavné, že väčšina optických aberácií sa snažila optimalizácia riešiť poslednou funkčnou časťou optického zoomu, ktorou je skupina hlavných šošoviek. V časti 6.2.1 sme si povedali, že práve táto funkčná skupina obsahuje najväčší podiel optických aberácií, ktoré slúžia na potlačenie optických väd predošlých funkčných sústav šošoviek. Z diagramu taktiež vyplýva, že výsledný obraz trpí najmä sférickou vadou, ktorá je v najväčšej miere zodpovedná za pokles MTF po okrajoch senzora. Na pochopenie miery vplyvu jednotlivých väd na kvalitu zobrazovania a MTFe prevedieme tzv. Ray Fan analýzu, najprv pre konfiguráciu č. 1, obrázok 6.29, odpovedajúcu za ohniskovú vzdialenosť objektívu $f_{IK} = 500$ mm a následne za konfiguráciu č. 11, obrázok 6.30, odpovedajúcu za $f_{IK} = 100$ mm.



Obr. 6.29: Ray Fan diagram pre konfiguráciu č. 1 objektívu zoom tvorený 4 funkčnými sústavami šošoviek. Ľavá strana odpovedá tangenciálnej rovine a pravá strana odpovedá sagitálnej rovine.

U konfigurácie č. 1 vlnovitý charakter čiar zodpovedá práve za prítomnosť sférickej vady. Fakt, že jednotlivé krivky odpovedajúce jednotlivým vlnovým dĺžkam sú vzájomne mierne natočené okolo stredu značí, že okrajové vlnové dĺžky sú v miernej defokusácii pred a za obrazovú rovinu, dochádza k miernemu axiálnemu posunu farieb okrajových vlnových dĺžok. Taktiež môžeme pozorovať v tangenciálnej rovine u polí 5 a 10 mm, že jednotlivé vlnové dĺžky sú vzájomne posunuté na osi e_y , čo odpovedá miernemu vzájomnému laterálnemu posunu farieb.

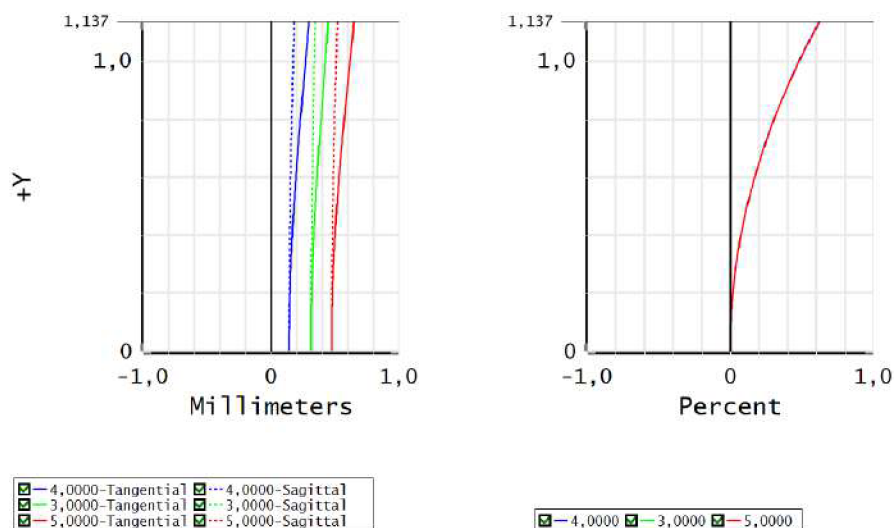
6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY



Obr. 6.30: Ray Fan diagram pre konfiguráciu č. 11 objektívu zoom tvorený 4 funkčnými sústavami šošoviek. Ľavá strana odpovedá tangenciálnej rovine a pravá strana odpovedá sagitálnej rovine.

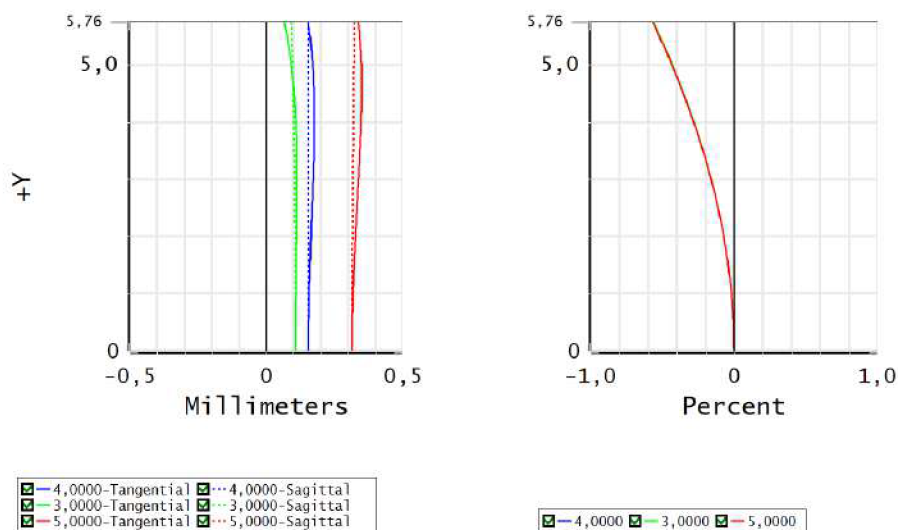
U konfigurácie č. 11 môžeme pozorovať významné zlepšenie axiálneho posunu farieb a sférickej vady. Na druhej strane, je stále prítomná sférická vada a laterálny posun farieb v závislosti na poliach. Ani jedna z konfigurácií netrpí na kómu, ktorá by svoju prítomnosť preukázala na Ray Fan diagrame konkávnym alebo konvexným charakterom jednotlivých kriviek.

Druhou analýzou bude vplyv klenutia a distorzie poľa na celkové zobrazenie. K tomuto účelu nám poslúži graf klenutia a distorzie poľa. Najprv budeme analyzovať konfiguráciu č. 1, obrázok 6.31, následne konfiguráciu č. 11, obrázok 6.32.



Obr. 6.31: Kľenutie a distorzia poľa pre konfiguráciu č. 1 objektívu zoom tvoreného 4 funkčnými sústavami šošoviek.

Na grafe kľenutia poľa môžeme pozorovať axiálny posun farieb, ktorý sme určili z Ray Fan diagramu. Vývoj tohto posuvu, zväčšovania defokusácie, je len veľmi malý ako pre sagitálnu, tak aj pre tangenciálnu rovinu. Na druhej strane môžeme pozorovať na grafe distorzie poľa, že pole dosahuje maximálnej hodnoty distorzie = 0,623 %. Z týchto záverov môžeme konštatovať, že kľenutie a distorzia poľa dosahujú malých hodnôt a preto nemajú významný vplyv na kvalitu celkového zobrazovania.



Obr. 6.32: Kľenutie a distorzia poľa pre konfiguráciu č. 11 objektívu zoom tvoreného 4 funkčnými sústavami šošoviek.

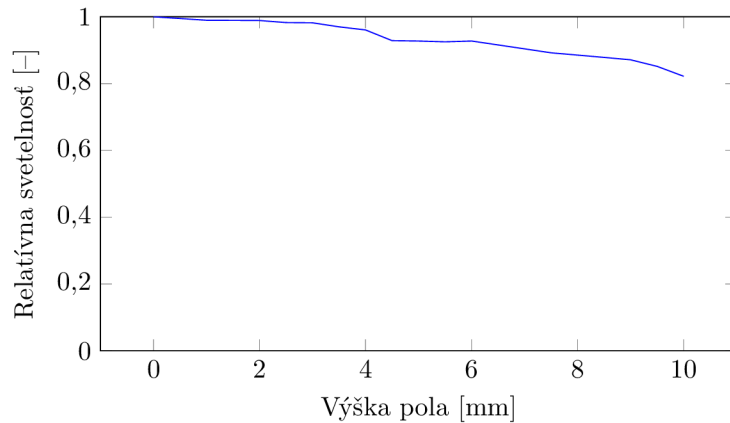
Výsledky grafu kľenutia a distorzie poľa 6.32 pre konfiguráciu č. 11 nenadobúdajú hodnôt kľenutia ani distorzie poľa, rovnako ako u konfigurácie č. 1, ktoré by významnejšie ovplyvňovali kvalitu celkového zobrazovania.

Relatívna svetelnosť

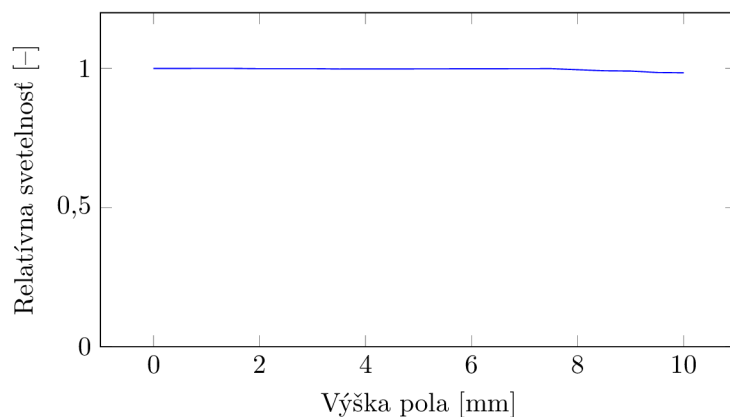
Posledným významným ukazovateľom kvality optického systému je zaručenie vysokej relatívnej

6.2. NÁVRH OPTIKY INFRAČERVENEJ KAMERY

svetelnosti pre celú plochu senzora. Nehomogénne rozloženie relatívnej svetelnosti optického systému by viedlo k vinetácií, ktorá u infračervených senzorov s malým dynamickým rozsahom by mohla viesť k prepálenému zobrazovaniu, a tak by priamo mohla ohroziť funkčnosť optického systému. Tento problém sa môže riešiť správne navrhnutou aktívnou tieniacou clonou, ktorá by vyrovnávala relatívnu svetelnosť po celom povrchu senzora, ale zároveň by spôsobovala pokles MTF.



Obr. 6.33: Relatívna svetelnosť konfigurácie č. 1 objektívu zoom tvoreného 4 funkčnými sústavami šošoviek.



Obr. 6.34: Relatívna svetelnosť konfigurácie č. 11 objektívu zoom tvoreného 4 funkčnými sústavami šošoviek.

Z grafov 6.33 a 6.34 relatívnej svetelnosti objektívu pre konfigurácie č. 1 a č. 11 vyplýva, že nami navrhnutý optický systém vykazuje vysokú a najmä stabilnú svetelnosť, bez použitia aktívnej tieniacej clony.

Priepustnosť

Vyššie sme si uviedli ako jeden z dôvodov prechodu z 3-skupinového na 4-skupinový optický zoom a zníženia počtu optických elementov nedostatočnú priepustnosť optického systému. Nový návrh je zložený z 9 optických elementov, obsahuje 18 optických povrchov a dosahuje priepustnosť $T_{IK} > 80\%$ s použitím antireflexných vrstiev, pre všetky polia a vlnové dĺžky.

6.3. Návrh optiky detektora

6.3.1. Optické požiadavky

Optika detektora slúži ako svetelný kolektor, ktorého podmienka správnej funkčnosti je zachytenie, čo najväčšieho podielu spätne odrazeného signálu zo skenovaného objektu. Navrhnutá optika taktiež musí zaručovať vysokú priepustnosť, aby nedochádzalo k zbytočnej strate signálu na optických elementoch a zároveň disponovať konštrukčne prípustnou, čo možno najväčšou vstupnou apertúrou. Pokiaľ sa bude jednať o návrh optiky slúžiacej výlučne na kolektivizáciu svetelného signálu, navrhnutá optika nemusí vykazovať vysokej kvality zobrazovania, keďže signál sa navrhnutou optikou sústredí na jedno pixelový detektor. Taktiež je dôležité si uvedomiť, že skenovaná vzorka v maximálnej vzdialenosti $l_{max} = 10$ km nadobúda priemer $D_{sv} \approx 32$ m. Tento fakt vedie k myšlienke, že pokiaľ chceme dosiahnuť nízkej detekcie šumu pozadia skenovanej roviny, musíme navrhovať optiku detektora, čo s najväčšou, konštrukčne prístupnou, ohniskovou vzdialenosťou, tak aby táto optika pri zobrazovaní obrazu na detektor dosahovala, čo najmenšieho zorného poľa.

6.3.2. Riešenie mimoosovým ďalekohľadom

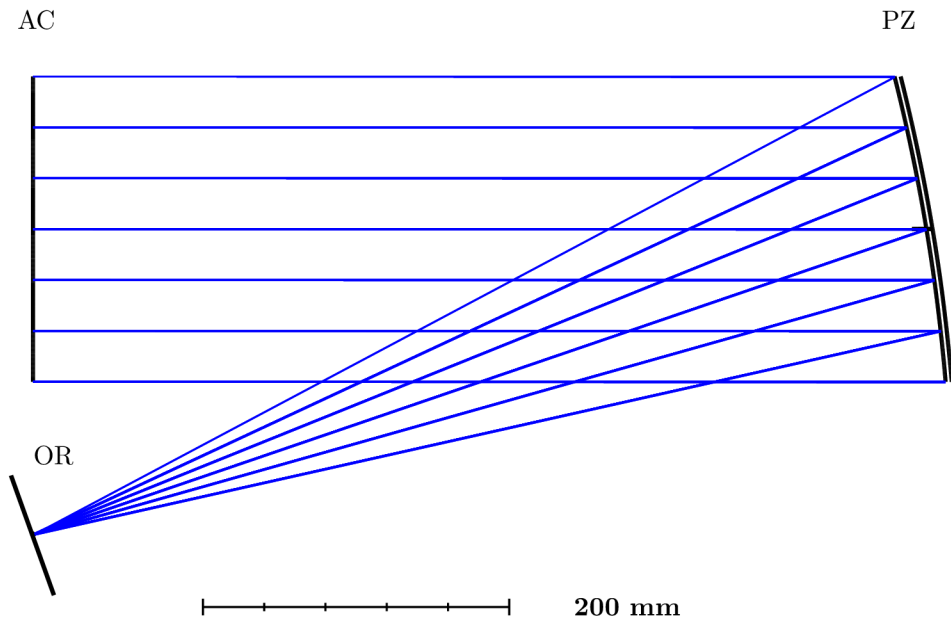
Z vyššie uvedených požiadaviek na návrh optiky detektora sme sa rozhodli pre použitie mimoosového ďalekohľadu. Hlavnou výhodou mimoosového ďalekohľadu je využívanie celej plochy vstupnej apertúry na zber svetelného signálu. Návrh začneme nastavením apertúry podľa parametrov v tabuľke 6.17.

Typ apertúry	Float by spot size
Hodnota apertúry	100 mm
Apodizácia apertúry	Rovinná

Tabuľka 6.17: Vstupné parametre apertúry optiky detektora tvoreného mimoosovým ďalekohľadom.

Ďalej určíme použité polia, ktoré definujeme podľa výšky/šírky objektu v objektovej rovine a nastavíme 3 polia s polomerami 0, 8 a 16 m. Nastavíme použitú vlnovú dĺžku na $\lambda_{SZ} = 1550$ nm, ktorá odpovedá použitej vlnovej dĺžky navrhovaného optického systému LiDAR. Postupy pri zostavovaní Lens data mimoosového ďalekohľadu budú rovnaké ako pri predošlom návrhu mimoosového ďalekohľadu v časti 6.1.6. Návrh obmeníme o niektoré parametre, tak aby sme dostali ďalekohľad s ohniskovou vzdialenosťou $f_{OD} = 600$ mm s vyosením $\delta = -200$ mm, obrázok 6.35.

6.3. NÁVRH OPTIKY DETEKTORA



Obr. 6.35: Pohľad z boku na zostavu optiky detektora tvoreného mimoosovým ďalekohľadom, kde AC je apertúrna clona, PZ je primárne zrkadlo a OR je obrazová rovina.

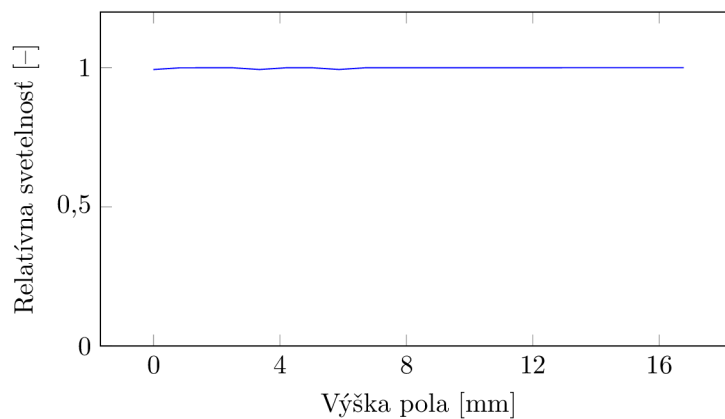
Lens data mimoosového ďalekohľadu optiky detektora sú v tabuľke 6.18.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d_e [mm]	k	δy [mm]	φ_x [°]
0	obj. rovina	nekonečno	$10 \cdot 10^7$	$32 \cdot 10^3$			
1	clona	nekonečno	600,00	200,00			
2	zrkadlo	-1200,00	600,00	200,00	-1		
3	prerušenie s.s.		0,00			-200,00	-18,93
4	obr. rovina	nekonečno					

Tabuľka 6.18: Lens Data Editor pre mimoosový ďalekohľad optiky detektora, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.

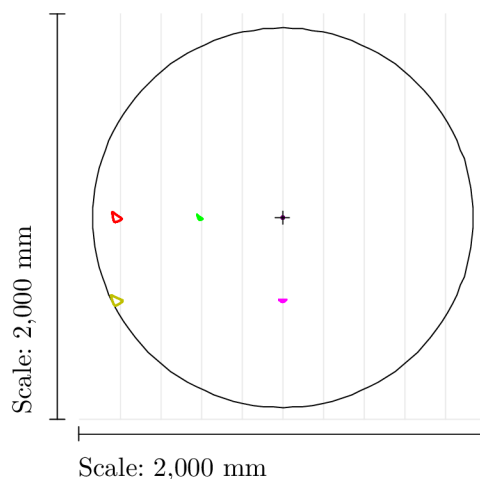
6.3.3. Analýza

Prvým ukazovateľom kvality u takto navrhnutého optického systému je relatívna svetelnosť optiky znázornená na obrázku 6.36.



Obr. 6.36: Relatívna svetelnosť optiky detektora tvoreného mimoosovým ďalekohľadom.

Z grafu je zjavné, že relatívna svetelnosť dosahuje vysokých hodnôt pozdĺž všetkých polí. Druhým ukazovateľom je rozloženie stôp jednotlivých polí v obrazovej rovine, ktoré je dôležité z hľadiska správneho nasmerovania svetelného signálu na detektor. Ak by rozloženie stôp bolo príliš veľké nemusel by signál dopadať na detektor. Takýto problém by sa mohol riešiť hemisférickou alebo hyper-hemisférickou šošovkou v tesnej blízkosti detektora, alebo miernou defokusáciou detektora. Najlepšie si môžeme rozloženie stôp v obrazovej rovine znázorniť na diagrame stôp, obrázok 6.37.



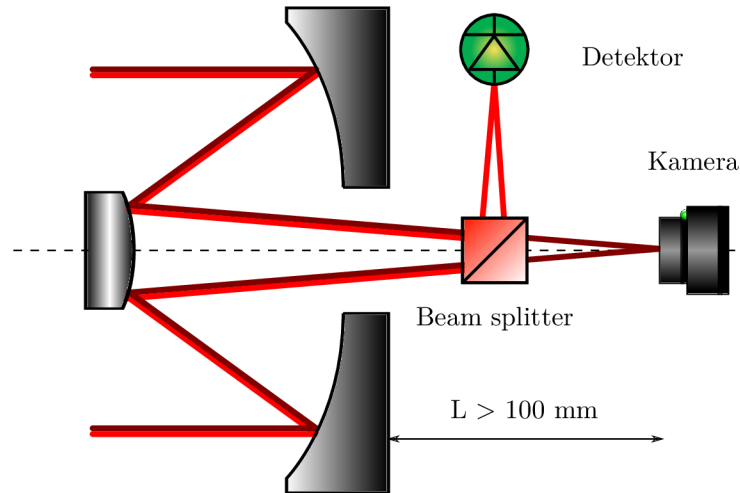
Obr. 6.37: Diagram stôp optiky detektora tvoreného mimoosovým ďalekohľadom.

Z obrázku 6.37 môžeme usúdiť, že celé zorné pole objektivej roviny bude mimoosovým ďalekohľadom premietnutá do stopy o priemere ≈ 2 mm. Z tohoto dôvodu budeme priemer stopy korigovať pri návrhu vyššie uvedenými riešeniami.

6.3.4. Riešenie ďalekohľadom Cassegrainovho typu

Na druhej strane sa môže jednať o návrh pre letecké účely, ktorého optika detektora bude slúžiť zároveň aj ako zobrazovacia optika pre sprievodnú optiku vo forme infračervenej kamery operujúcej v spektrálnom rozsahu MWIR. Takýto návrh môže slúžiť v optických systémoch, kde pre konštrukčné rozmery nie je možné paralelne používať optiku detektora a zároveň kamerový objektív sprievodnej optiky, obrázok 6.38. Z dôvodu dosiahnutia čo najmenších konštrukčných rozmerov bude optický systém navrhnutý ako ďalekohľad Cassegrainovho typu, ktorý je známi najmä svojimi malými konštrukčnými rozmermi. Medzi najdôležitejšie konštrukčné požiadavky na návrh patrí vedenie optického signálu do obrazovej roviny, ktorá sa musí nachádzať v minimálnej vzdialenosti $L > 100$ mm od primárneho zrkadla.

6.3. NÁVRH OPTIKY DETEKTORA



Obr. 6.38: Schema optiky detektora riešená ďalekohľadom Cassegrainovho typu.

Túto vzdialenosť sme určili na základe konštrukčného požiadavku, kedy musíme v priestore medzi primárnym zrkadlom a obrazovou rovinou vytvoriť dostatočný priestor na neskoršie uloženie dichroického deliča laserového lúču alebo vyklápacieho zrkadla, tak aby sme svetelný signál systému LiDAR mohli nasmerovať na detektor a zároveň sme mohli optiku používať ako objektív infračervenej kamery. Tým pádom budeme ďalekohľad optimalizovať najmä pre vlnové spektrum MWIR $\lambda_{IK} = 3000-5000$ nm, v ktorom operuje infračervená kamera, keďže požiadavky na kvalitu zobrazovania signálu LiDAR $\lambda_{SZ} = 1550$ nm nie sú vysoké, jedná sa o jedno pixelový detektor. Ďalším požiadavkom je dosiahnutie, čo možno najvyššej svetelnosti optiky. To znamená, že vstupná apertúra musí dosahovať plochy najmenej $S_{IK} > 28000$ mm², ktorú dosahuje vstupná apertúra s priemerom $D_{OD} > 200$ mm spolu so sekundárnym zrkadlom, ktorého priemer nepresahuje < 60 mm.

6.3.5. Spôsob definície optických rozhraní

Návrh začneme správne definovanou apertúrou, tabuľka 6.19. Návrh budeme považovať za 1. variantu ďalekohľadu.

Typ apertúry	Float by spot size
Hodnota apertúry	100 mm
Apodizácia apertúry	Rovinná

Tabuľka 6.19: Vstupné parametre apertúry optiky detektora tvoreného Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

Ďalej určíme použité polia vo field data, ktoré definujeme podľa výšky a šírky reálneho obrazu v obrazovej rovine, v našom prípade maximálna vzdialenosť senzora od stredu. Zvolíme si polia s výškou 0; 5; 10 a 12 mm, takto zvolené polia pokrývajú celý povrch senzora a optimalizácia sa bude snažiť zlepšovať optické vlastnosti zobrazovania najmä infračervenej kamery. Zvolené vlnové dĺžky si znázorníme v tabuľke 6.20.

	Vlnová dĺžka (μm)	Váha
1	4,00	1,00
2	3,00	0,75
3	5,00	0,75

Tabuľka 6.20: Nastavenie vlnových dĺžok a ich váhy pri optimalizácii optiky detektora tvoreného Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

Dá sa povedať že počiatkové parametre nastavenia optiky sú totožné s počiatkovými parametrami návrhu sprievodnej optiky objektívu so zoomom. Návrh bude pokračovať zostavením základného Lens data, tabuľka 6.21.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno	
1	clona	nekonečno	250,00	200,00
2	zrkadlo	-400,00	-150,00	204,62
3	zrkadlo	-140,00	300,00	60,00
4	obr. rovina	nekonečno		

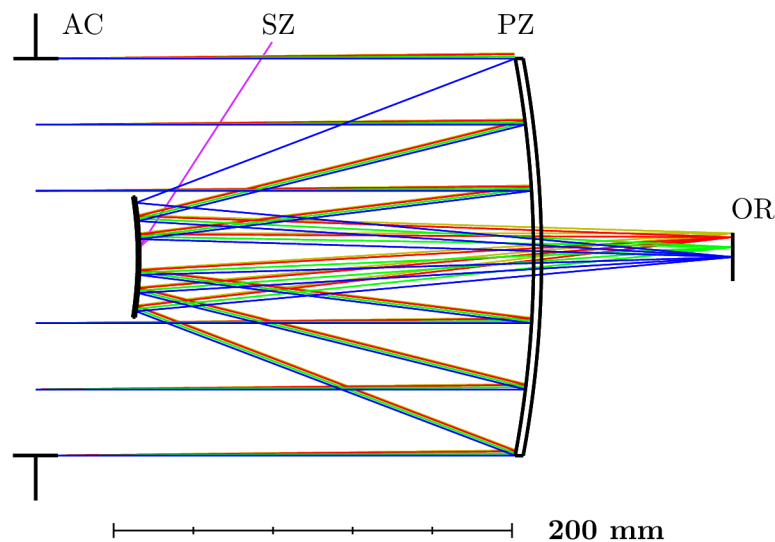
Tabuľka 6.21: Lens data optiky detektora tvoreného Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.

Aby sme vytvorili efekt tienenia svetelného signálu sekundárnym zrkadlom, nastavíme povrchu č. 1 apertúru typu: Circular obscuration s maximálnym polomerom 30 mm. Zostavíme meritnú funkciu so smerovaním optimalizácie k dosiahnutiu, čo najmenšieho spotu. Pomocou operandov TTGT, TTLT a TTHI definujeme vzájomnú polohu primárneho, sekundárneho zrkadla a obrazovej roviny, tak aby sme splnili stanovené konštrukčné požiadavky na optiku. Ďalej pomocou operandu DMLT obmedzíme maximálny priemer sekundárneho zrkadla na priemer stanovený požiadavkami na optiku < 60 mm. Ako variabilné hodnoty si zvolíme polomery krivosti, šírku povrchov a koeficient paraboly k povrchov č. 2 a č. 3. Takto zadaný základný návrh následne optimalizujeme Hammerovým cyklom. Optimalizovaný návrh považujeme za dokončený a nadobúda hodnôt parametrov obsiahnutých tabuľke 6.22 a podoby v obrázku 6.39.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e	k
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno		
1	clona	nekonečno	250,00	200,00	
2	zrkadlo	-542,05	-197,72	204,62	-1,03
3	zrkadlo	-194,45	297,72	60,00	-3,03
4	obr. rovina	nekonečno			

Tabuľka 6.22: Optimalizované lens data optiky detektora tvoreného variantov č. 1 Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu a d_e je efektívny priemer optického povrchu.

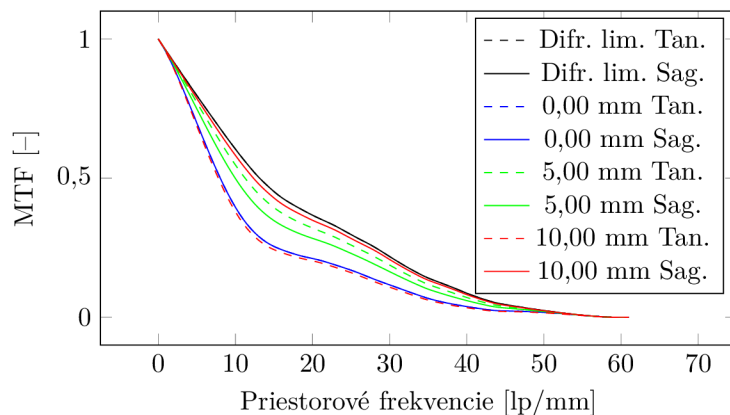
6.3. NÁVRH OPTIKY DETEKTORA



Obr. 6.39: Optimalizovaný model optiky detektora tvoreného variantov č. 1 Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde AC je apertúrna clona, PZ je primárne zrkadlo, SZ je sekundárne zrkadlo a OR je obrazová rovina.

Ďalekohľad dosahuje ohniskovej vzdialenosti $f_{OD} = 1100$ mm. Analyzovanými ukazovateľmi kvality u takéhoto ďalekohľadu sú rovnaké ako u sprievodnej optiky infračerveného objektívu so zoomom: Spot diagram, MTF diagram, Seidelové koeficienty, Ray Fan a diagram klenutia a distorzie poľa. Keďže budeme navrhovať viacero variantov Cassegrainovho ďalekohľadu, analyzovať každú jednu variantu by bolo nesmierne zdĺhavé. Z tohto dôvodu budeme zatiaľ považovať za najlepší ukazovateľ kvality MTF a variante ďalekohľadu s najlepšimi výsledkami prevedieme úplnú analýzu.

Varianta č. 1 Cassegrainovho ďalekohľadu nadobúda MTF pre jednotlivé polia znázornenú na obrázku 6.40.



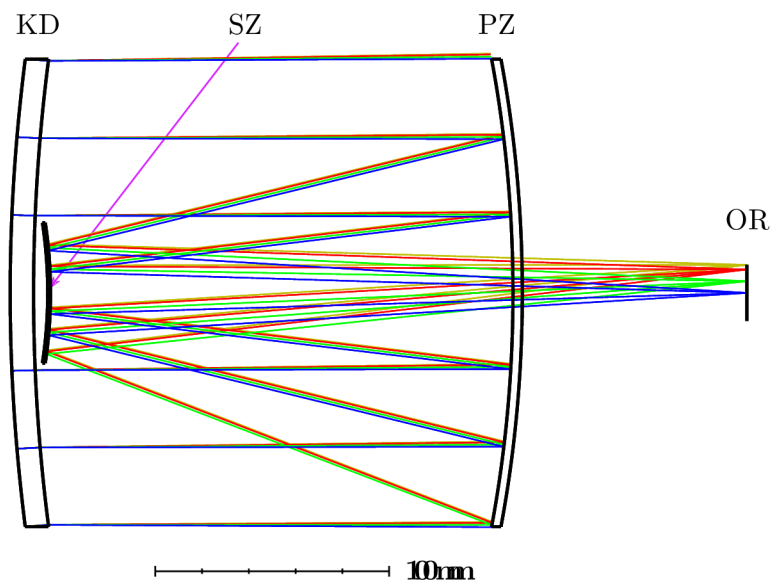
Obr. 6.40: MTF optiky detektora tvoreného variantou č. 1 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

Varianta č. 2

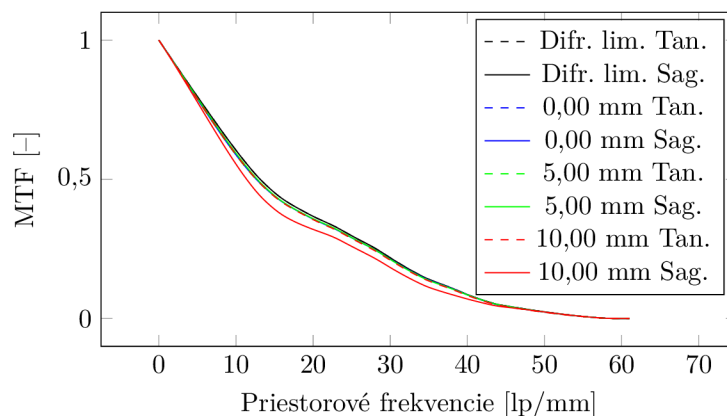
Variantov č. 2 je ďalekohľad Cassegrainovho typu s korekčnou doskou v rovine vstupnej apertúry. Optimalizovaný návrh nadobúda parametrov v tabuľke 6.23, podobu na obrázku 6.41 a MTF diagram na obrázku 6.42.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]	Materiál	k	A ₄	A ₆
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno					
1	1. r.š.č. (clona)	545,97	10,00	200,00	IRG24	-2,55.10 ⁻⁴	-2,26.10 ⁻⁹	8,65.10 ⁻¹⁴
2	2. r.š.č.	779,14	205,00	198,70				
3	zrkadlo	-559,66	-197,75	204,76		1,74		
4	zrkadlo	-203,23	297,75	60,00		2,09		
5	obr. rovina	nekonečno				0,00		

Tabuľka 6.23: Optimalizované lens data optiky detektora tvoreného variantov č. 2 Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu, d_e je efektívny priemer optického povrchu a r.š.č. znamená rozhranie šošovky číslo.



Obr. 6.41: Optimalizovaný model optiky detektora tvoreného variantov č. 2 Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde KD je korekčná doska, PZ je primárne zrkadlo, SZ je sekundárne zrkadlo a OR je obrazová rovina.



Obr. 6.42: MTF optiky detektora tvoreného variantou č. 2 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

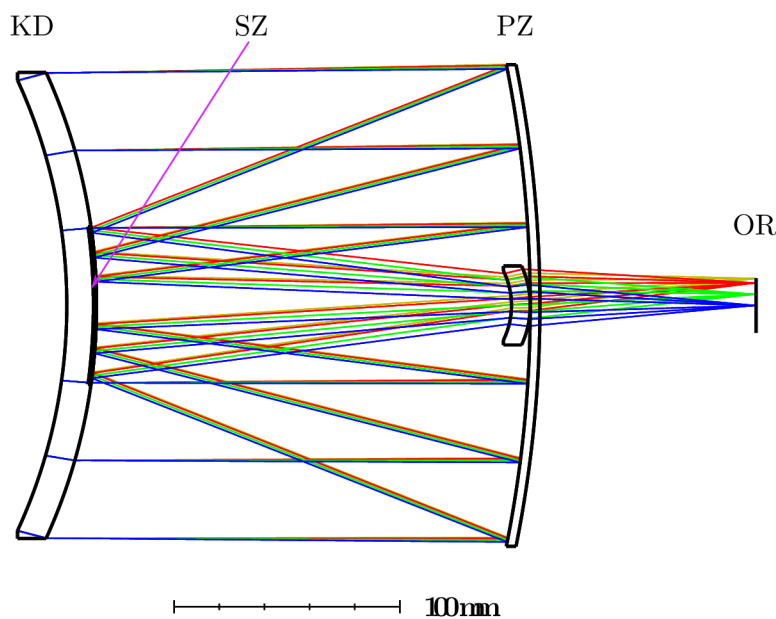
6.3. NÁVRH OPTIKY DETEKTORA

Varianta č. 3

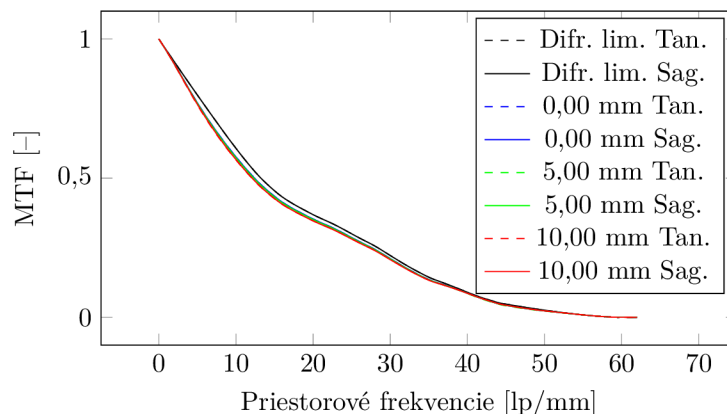
Tretou variantou je ďalekohľad Cassegrainovho typu s Maksutovou korekčnou doskou, sekundárnym zrkadlom tvoreným pozlátenou časťou zadnej strany korekčnej dosky (t.j. optický povrch č. 2), zároveň optika obsahuje asférickú šošovku, optický povrch č. 5 až č. 6, ktorá slúži k zvýšeniu kvality výsledného zobrazovania. Polohu asférickej šošovky sme volili pred rovinu primárneho zrkadla s prihliadnutím na fakt, že v priestore za primárnym zrkadlom sa nachádza dichroický delič laserového zrkadla alebo výklopné zrkadlo. Takéto ďalekohľady sú populárne najmä medzi amatérskymi astronómami. Optimalizovaný návrh nadobúda parametrov v tabuľke 6.24, podobu na obrázku 6.43 a MTF diagram na obrázku 6.44.

	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d _e [mm]	Materiál	k	A ₄	A ₆
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno					
1	1. r.š.č. 1 (clona)	-766,86	13,18	200,00	IRG24	-1,42.10 ⁻⁴	-9,01.10 ⁻⁹	-9,80.10 ⁻¹⁴
2	2. r.š.č. 1	-250,86	192,12	207,06				
3	zrkadlo	-542,94	-192,12	214,06		-0,59		
4	zrkadlo	-250,86	183,81	70,00		-5,41		
5	1. r.š.č. 2	-78,09	8,31	30,74	IRG26	-8,00.10 ⁻³	-2,50.10 ⁻⁶	-1,26.10 ⁻⁹
6	2. r.š.č. 2	-42,01	100,00					
7	obr. rovina	nekonečno						

Tabuľka 6.24: Optimalizované lens data optiky detektora tvoreného variantom č. 3 Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu, d_e je efektívny priemer optického povrchu a r.š.č. znamená rozhranie šošovky číslo.



Obr. 6.43: Optimalizovaný model optiky detektora tvoreného variantom č. 3 Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde KD je korekčná doska, PZ je primárne zrkadlo, SZ je sekundárne zrkadlo a OR je obrazová rovina.



Obr. 6.44: MTF optiky detektora tvoreného variantou č. 3 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

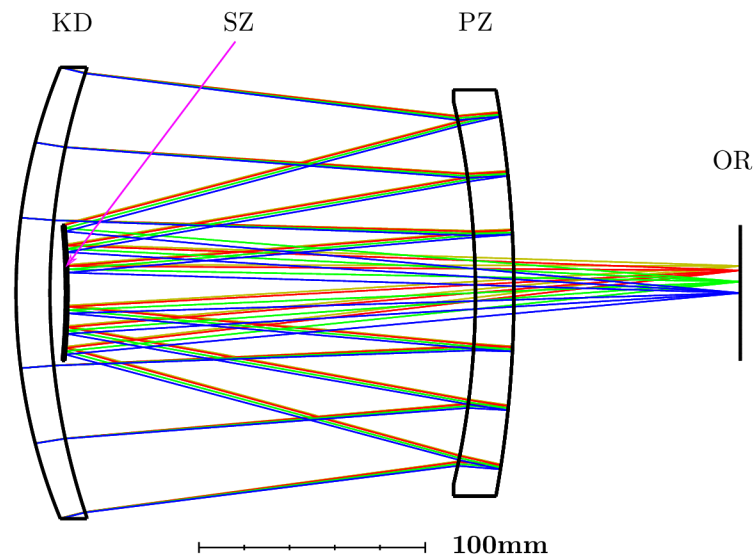
Varianta č. 4

Poslednou variantou je návrh podobný variante č. 2 s tým rozdielom, že povrch sekundárneho zrkadla je nanosený na zadnú stranu zrkadla. Takto navrhnuté zrkadlá sa využívajú najmä vo fotografickom priemysle na výrobu kompaktných objektívov s veľkými ohniskovými vzdialenosťami. Optimalizovaný návrh nadobúda parametrov v tabuľke 6.25, podobu na obrázku 6.45 a MTF diagram na obrázku 6.46.

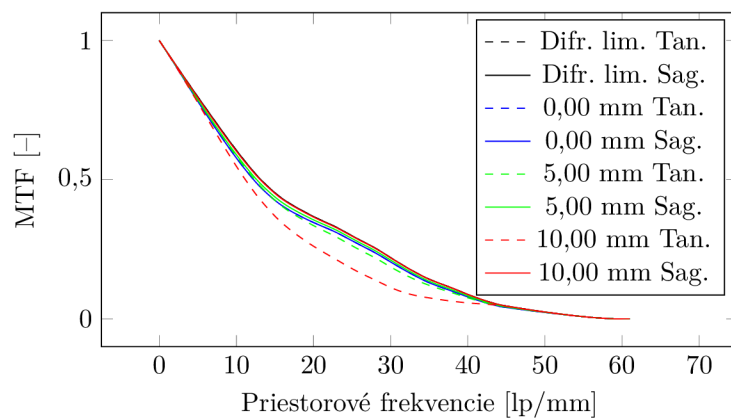
	Typ povrchu	R [mm]	t [mm]	d_e [mm]	Materiál	k	A_4	A_6
0	obj. rovina	nekonečno	nekonečno					
1	1. r.š.č. 1 (clona)	234,51	15,00	200,00	IRG24	$-2,55 \cdot 10^{-4}$	$-2,26 \cdot 10^{-9}$	$-1,80 \cdot 10^{-14}$
2	2. r.š.č. 1	312,12	188,00	194,56				
3	1. r.š.č. 2	-302,61	17,00	156,73	IRG24	$-3,51 \cdot 10^{-4}$	$-9,65 \cdot 10^{-10}$	$-5,44 \cdot 10^{-14}$
4	zrkadlo	-517,31	0,00	157,41		0,84		
5	2. r.š.č. 2	-517,31	-17,00	153,69	IRG24	0,84		
6	1. r.š.č. 2	-302,61	-180,00	60,00		$-3,51 \cdot 10^{-4}$	$-9,65 \cdot 10^{-10}$	$-5,44 \cdot 10^{-14}$
7	zrkadlo	-318,27	297,00					
8	obr. rovina	nekonečno						

Tabuľka 6.25: Optimalizované lens data optiky detektora tvoreného variantou č. 4 Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde R je polomer krivosti optického povrchu, t je osová hrúbka optického povrchu, d_e je efektívny priemer optického povrchu a r.š.č. znamená rozhranie šošovky číslo.

6.3. NÁVRH OPTIKY DETEKTORA



Obr. 6.45: Optimalizovaný model optiky detektora tvoreného variantov č. 4 Cassegrainovým typom ďalekohľadu, kde KD je korekčná doska, PZ je primárne zrkadlo, SZ je sekundárne zrkadlo a OR je obrazová rovina.

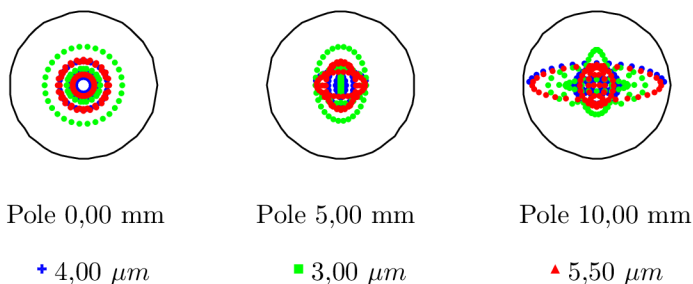


Obr. 6.46: MTF optiky detektora tvoreného variantou č. 4 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

Z predošlých štyroch variantov návrhov ďalekohľadu Cassegrainovho typu sme vybrali ako ideálny návrh variantu č. 2, ďalekohľad s korekčnou doskou v tvare prevrátenej Maksutovej korekčnej dosky. Výhodou tohto návrhu je pomerne vysoká kvalita zobrazovania pri zachovaní jednoduchosti návrhu.

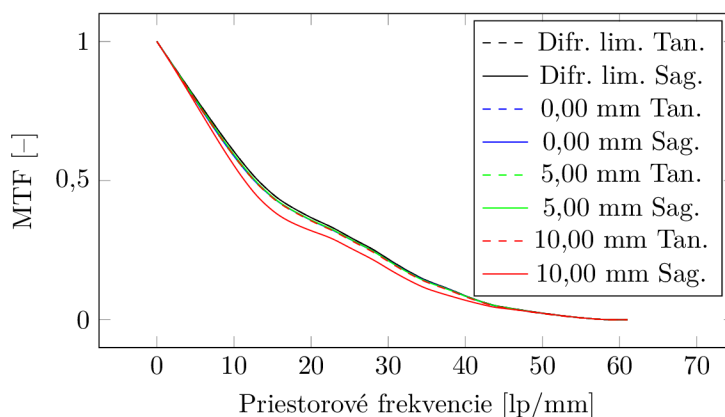
6.3.6. Analýza

Prvým ukazovateľom kvality je spot diagram na obrázku 6.47.



Obr. 6.47: Bodový diagram optimalizovanej optiky detektora tvoreného variantou č. 2 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

Z diagramu je pozorovateľné, že sa spoty nachádzajú prevažne v Airiho disku, z toho sa dá usúdiť, že samotné optické vady (okrem klenutia poľa) nebudú mať významný vplyv na kvalitu zobrazovania. Airiho disk dosahuje polomeru $r_A = 26,89 \mu m$, táto hodnota je pomerne veľká a je spôsobená neprimerane veľkou ohniskovou vzdialenosťou $f_{OD} = 1100 \text{ mm}$, ktorá spôsobuje veľké clonové číslo, čo spôsobuje horší difrakčný limit. Vplyv clonového čísla môžeme dobre pozorovať na diagrame MTF na obrázku 6.48.



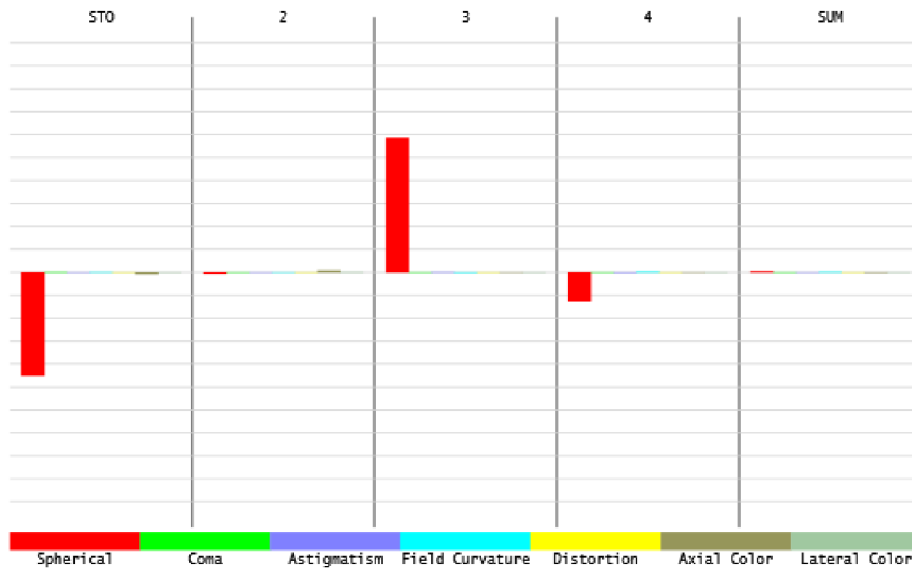
Obr. 6.48: MTF optiky detektora tvoreného variantou č. 2 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

Zároveň je dobré si povšimnúť tvar krivky difrakčného limitu. Tu môžeme pozorovať mierny pokles priebehu v okolí frekvencií od 12 lp/mm do 18 lp/mm. Tento pokles je spôsobený práve prítomnosťou sekundárneho zrkadielka a jeho tienenia svetelného signálu.

Aberácie

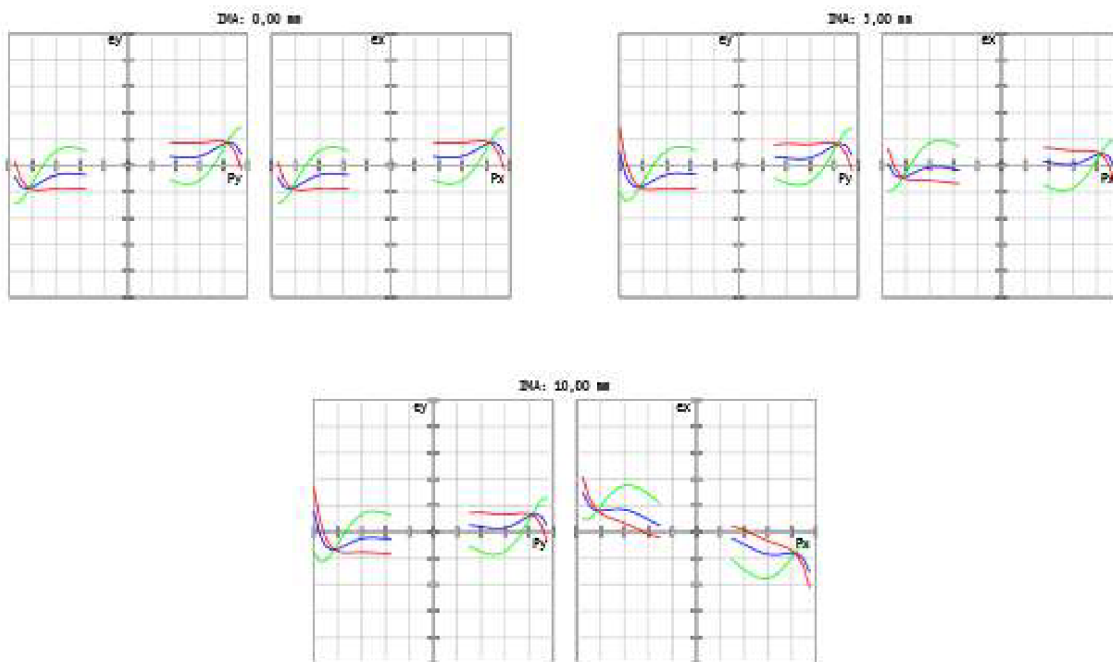
Analýzu aberácií začneme analýzou Seidelového diagramu, obrázok 6.49, vyjadrujúci mieru aberácií jednotlivých optických elementov.

6.3. NÁVRH OPTIKY DETEKTORA



Obr. 6.49: Seidelov diagram optiky detektora tvoreného variantou č. 2 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

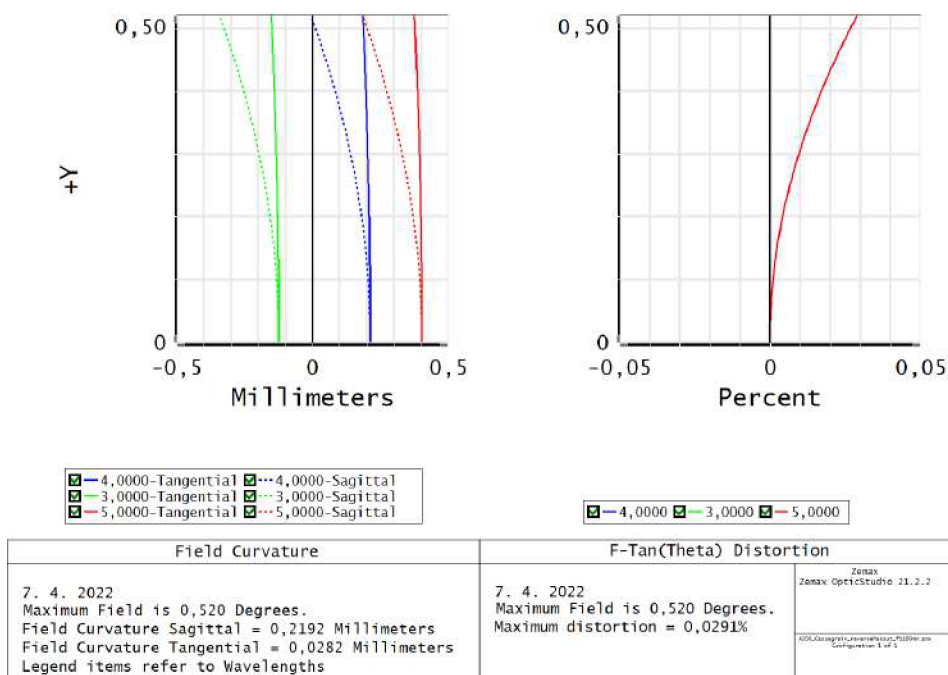
Zo Seidelových diagramov môžeme konštatovať, že optimalizácia viedla ku minimalizácii najmä sférickej vady. Vplyv výsledných väd na zobrazovanie je znázornený na Ray Fan diagrame na obrázku 6.50.



Obr. 6.50: Ray Fan diagram optiky detektora tvoreného variantou č. 2 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

Z Ray Fan diagramov pozorujeme nespojitý priebeh jednotlivých kriviek, ktorá je spôsobená prítomnosťou sekundárneho zrkadla. Ďalej môžeme pozorovať po okrajoch vplyv sférickej vady a u polí s výškou 10 a 12 mm miernu defokusáciu spôsobenú axiálnym posunom farieb.

Posledným ukazovateľom kvality zobrazovania je diagram klenutia a distorzie poľa, obrázok 6.51.



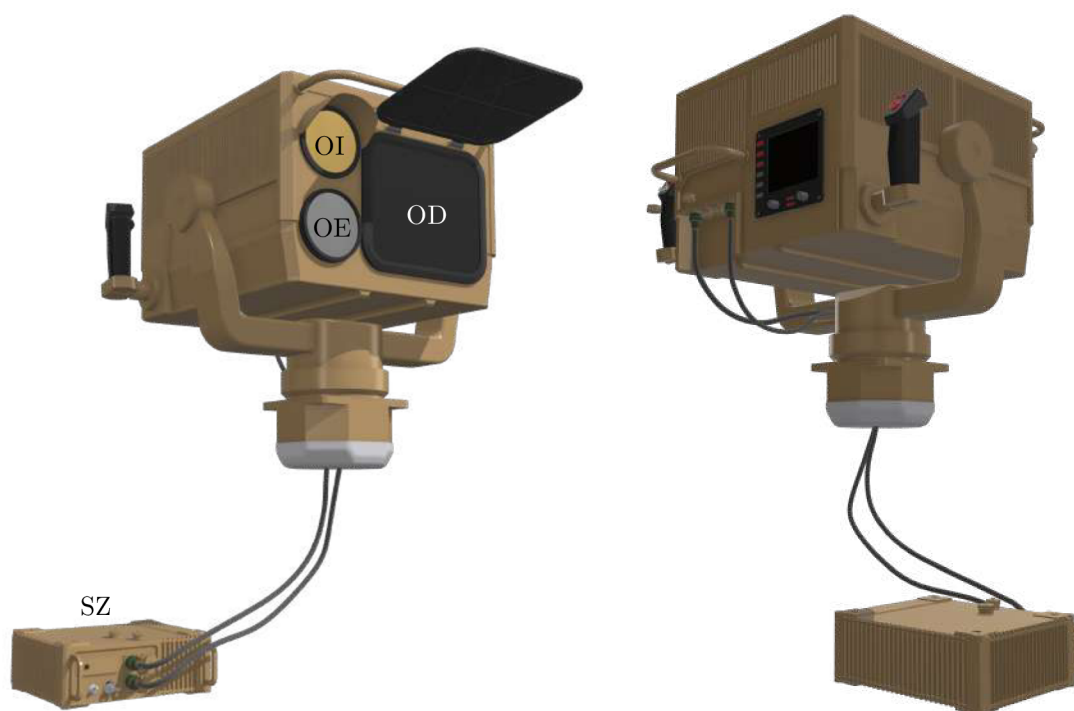
Obr. 6.51: Klenutie a distorzia poľa optiky detektora tvoreného variantou č. 2 Cassegrainovým typom ďalekohľadu.

Z diagramu môžeme usúdiť mierny axiálny posun farieb v sagitálnej a tangenciálnej rovine v rozmedzí od -0,5 mm do 0,5 mm s maximálnou distorziou poľa len 0,0419 %. Takto nízka hodnota distorzie je spôsobená veľkou ohniskovou vzdialenosťou navrhovanej optiky.

7. Mechanický návrh

V kapitolách 5 a 6 sme sa venovali návrhu optických systémov, svetelných zdrojov a návrhom jednotlivých funkčných častí optického systému. Taktiež sme si uviedli, že práca bude pozostávať z dvoch koncepčných návrhov optických systémov. Prvý pre pozemné účely a druhý pre letecké účely. V tejto časti si jednotlivé návrhy predstavíme a popíšeme si niektoré konštrukčné aspekty návrhov.

7.1. Návrh pre pozemné účely



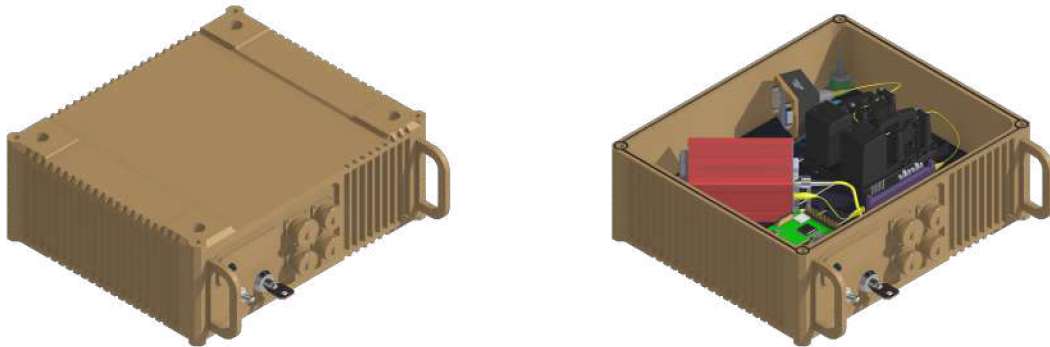
Obr. 7.1: Koncepčný návrh pre pozemné účely, kde OI je objektív infračervenej kamery, OE je optika emitora, OD je optika detektora a SZ je svetelný zdroj.

Na obrázku 7.1 je znázornený model koncepčného návrhu pre pozemné účely, ktorý je konštrukčne navrhovaný pre umiestnenie na vozidle, poprípade na stojane. Návrh disponuje oddeleným uložením svetelného zdroja a riadiacej jednotky v kabíne vozidla, ktoré sú so zvyškom optického systému prepojené káblami. Takéto riešenie sme zvolili, z dôvodu bezpečného uloženia niektorých funkčných častí a možnosti operátora ovládať optický systém z kabíny vozidla. Návrh taktiež umožňuje manuálne ovládanie za pomoci dvoch rukovätí, ktoré sa nachádzajú po stranách spoločnej konštrukcie systému LiDAR a sprievodnej optiky.

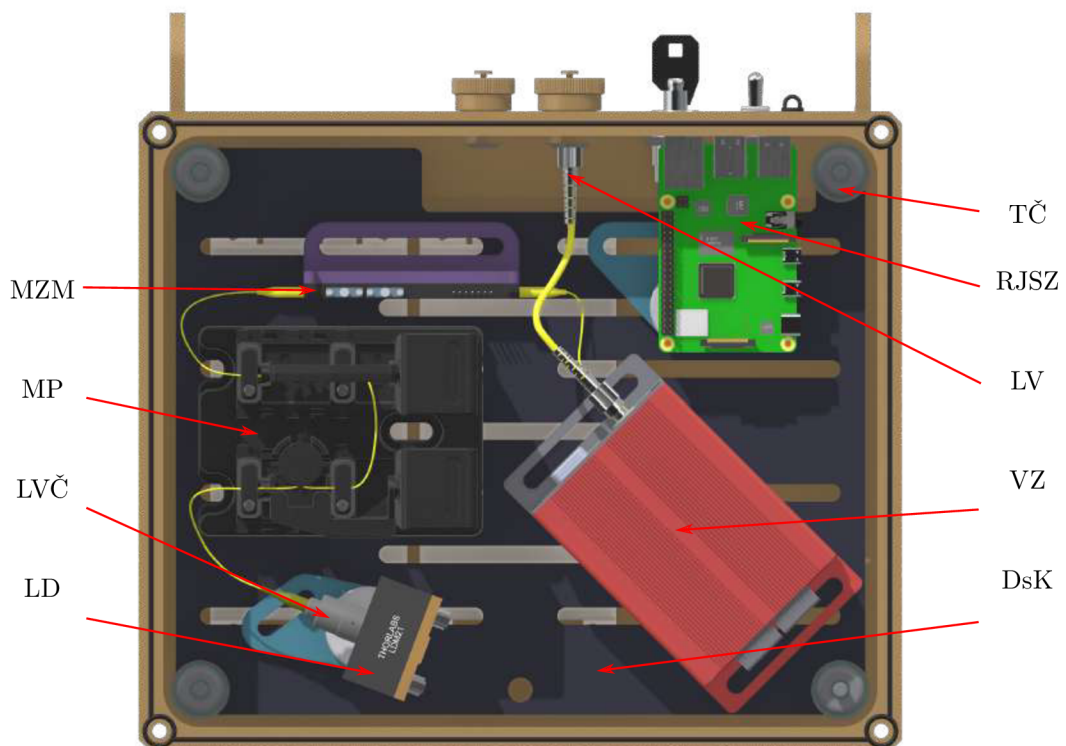
7.1.1. Svetelný zdroj

Na obrázkoch 7.2 a 7.3 je znázornený koncepčný návrh konštrukcie svetelného zdroja. O návrhu svetelného zdroja pre pozemné účely sme pojednávali v časti 5.1. Svetelný zdroj je uložený na doske s koľajnicami, ktorá umožňuje ľubovoľné vzájomné uloženie jednotlivých komponentov,

z ktorých je svetelný zdroj zostavený. Uloženie jednotlivých komponentov nie je podmienené požiadavkou precízneho vzájomného uloženia, keďže sú navzájom prepojené optickým vláknom. Aby sa zabránilo nepriaznivým vplyvom otrasov a vibrácií, je doska s kolajnicami spolu s krytovaním svetelného zdroja spojená pomocou štyroch tlmiacich členov. Svetelný zdroj taktiež disponuje riadiacou jednotkou svetelného zdroja, ktorá zaručuje vzájomnú komunikáciu medzi samotnými komponentami a zvyškom optického systému.



Obr. 7.2: Konštrukčný návrh svetelného zdroja operujúceho v kontinuálnom režime.



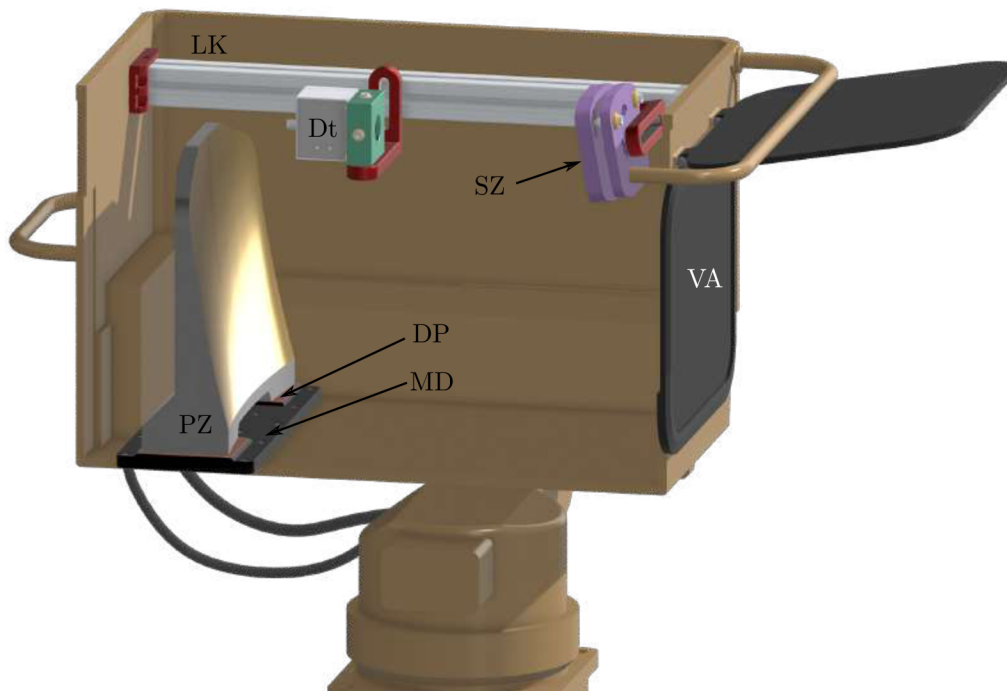
Obr. 7.3: Uloženie optických komponentov svetelného zdroja operujúceho v kontinuálnom režime, kde LD je laserová dióda, LVČ je laserový väzbový člen, MP je modulátor polarizácie, MZM je Mach-Zehnderov modulátor, DsK je doska s kolajnicami, VZ je vláknový zosilovač, LV ja laserový výstup, RJSZ je riadiaca jednotka svetelného zdroja a TČ je tlmiaci člen.

7.1.2. Uloženie optiky detektora

Na obrázku 7.4 je znázornené uloženie optiky detektora. Primárne zrkadlo je uložené na montážnej doske, ktorá je prichytená na rám konštrukcie. Presnú výšku uloženia primárneho zrkadla

7.1. NÁVRH PRE POZEMNÉ ÚČELY

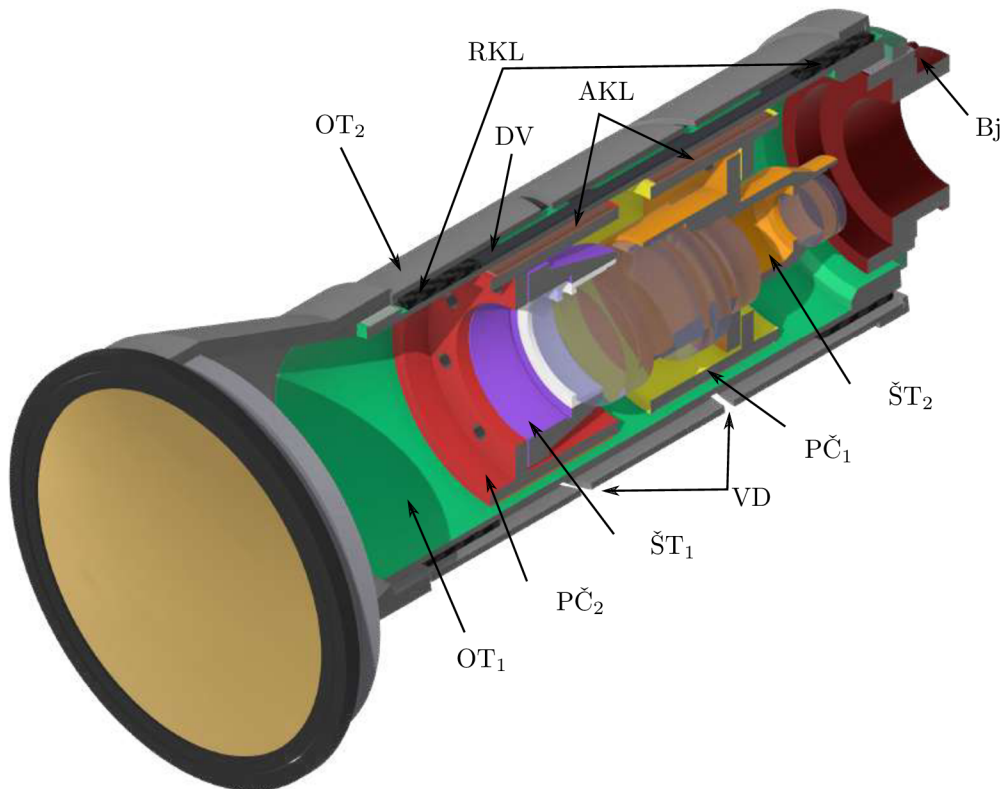
zaručujú dištančné podložky. Primárne zrkadlo je pevne uložené, bez možnosti dodatočnej justáže. Možnosti dodatočnej justáže majú sekundárne zrkadlo a detektor, ktoré sú prichytené k lineárnej koľajnici pomocou L-profilu s drážkami. Takéto nastavenie slúži k hrubej justáži oboch komponentov. K jemnej justáži slúži držiak umožňujúci translačný pohyb v dvoch osiach, na ktorom je umiestnený detektor a trojbodový kinematický držiak, na ktorom je umiestnené sekundárne zrkadlo. Ako čiastočná slnečná clona systému LiDAR slúži vyklopená krytka vstupnej apertúry. Krycie sklo Solaris™ IR S306 vstupnej apertúry je vyrobené z polymethylmethakrylátu s optickými vrstvami od firmy PSC, ktorý je dizajnovaný práve pre vlnovú dĺžku $\lambda = 1550 \text{ nm}$ s priepustnosťou až 98 %.[59]



Obr. 7.4: Uloženie optiky detektora, kde PZ je primárne zrkadlo, MD je montážna doska, DP je dištančná podložka, VA je vstupná apertúra, SZ je sekundárne zrkadlo, Dt je detektor a LK je lineárna koľajnica.

7.1.3. Objektív infračervenej kamery

Na obrázku 7.5 je znázornený konštrukčný návrh trojskupinového objektívu infračervenej kamery, kde jednotlivé funkčné sústavy šošoviek sú uložené v objímkach č. 1 a č. 2. Objímky sú prichytené k posuvnej časti č. 1 a č. 2 a ich presné uloženie je zaručené dištančnými krúžkami. Na obvode posuvných častí sa nachádzajú axiálne klzné ložiská, ktoré im umožňujú hladký axiálny pohyb v objektívovom tubuse č. 1. Tento pohyb je vyvolaný radiálnym pohybom objektívového tubusu č. 2 s vodiacimi drážkami. K hladkému chodu je kontakt medzi tubusmi č. 1 a č. 2 sprostredkovaný dvojicou radiálnych klzných ložísk, ktorých vzájomný rozostup zaručuje dištančný valec.

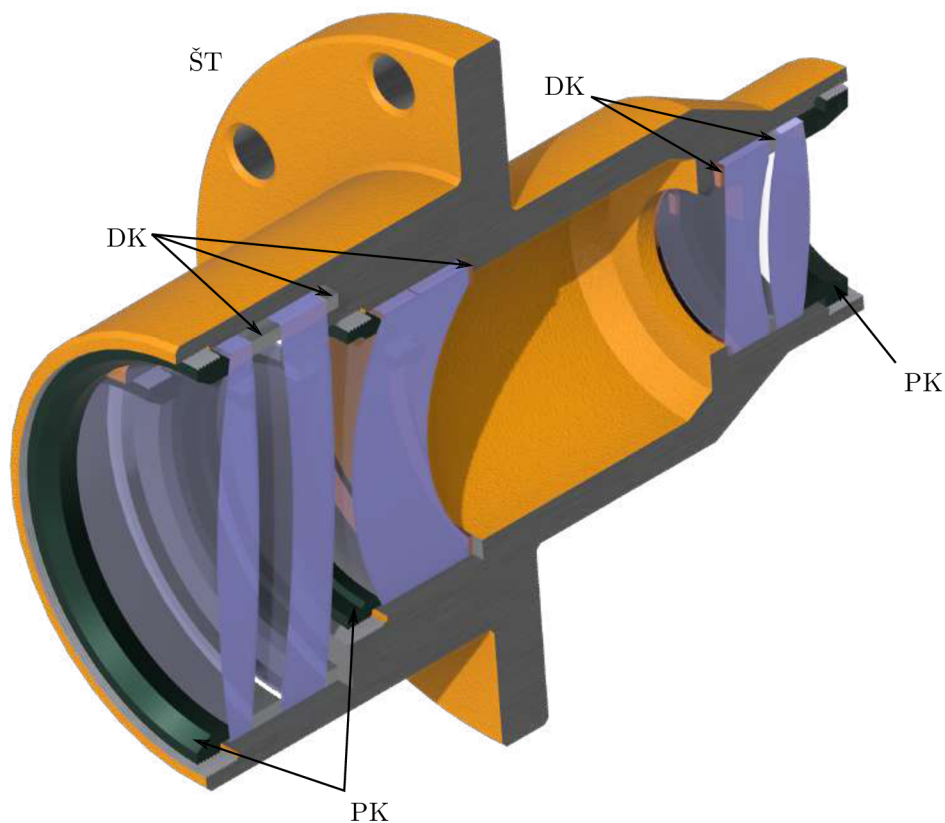


Obr. 7.5: Konštrukčné prevedenie objektívu infračervenej kamery, kde OT₁ a OT₂ sú objektívové tubusy č. 1 a č. 2, PČ₁ a PČ₂ sú posuvné časti č. 1 a č. 2, ŠT₁ a ŠT₂ sú objímky č. 1 a č. 2, AKL sú axiálne klzné ložiská, RKL sú radiálne klzné ložiská, VD sú vodiace drážky, DV je dištančný valec a Bj je bajonet objektívu.

Uloženie šošoviek

Na obrázku 7.6 je znázornené uloženie šošoviek do objímky. Jedná sa o uloženie sústavy hlavnej šošovky v zadnej časti objektívu, ktorá ma za úlohu korigovať optické vady vzniknuté predošlými funkčnými sústavami šošoviek. Šošovky musia byť presne uložené v objímke, preto je objímka vyrobený z jedného dielu. Šošovky sú do objímky vkladané z oboch strán, ich presné uloženie je zaručené dištančnými krúžkami a na mieste sú zaistené poistnými krúžkami, ktoré kontaktnou plochou opisujú tvar danej šošovky.

7.2. NÁVRH PRE LETECKÉ ÚČELY



Obr. 7.6: Uloženie šošoviek v objímke v zadnej časti objektívu infračervenej kamery, kde PK sú poistné krúžky, DK sú dištančné krúžky a ŠT je objímka.

7.2. Návrh pre letecké účely

Druhým koncepčným návrhom je návrh pre letecké účely, znázornený na obrázku 7.7. Návrh nadobúda podoby leteckého optického systému, obrázok 3.2. Optický systém je navrhnutý pre umiestnenie na lietadle alebo vrtulníku, poprípade na bezpilotnom drone. Návrh disponuje oddelenou riadiacou jednotkou, ale na rozdiel od systému pre pozemné účely je svetelný zdroj súčasťou hlavnej konštrukcie. Celý systém je uložený na Kardanovom závесе s dvoma osami rotácie, čo umožňuje smerovať optický systém požadovaným smerom.



Obr. 7.7: Konceptný návrh pre letecké účely, kde OE je optika emitora a OD+OIK je spoločná optika detektora a infračervenej kamery.

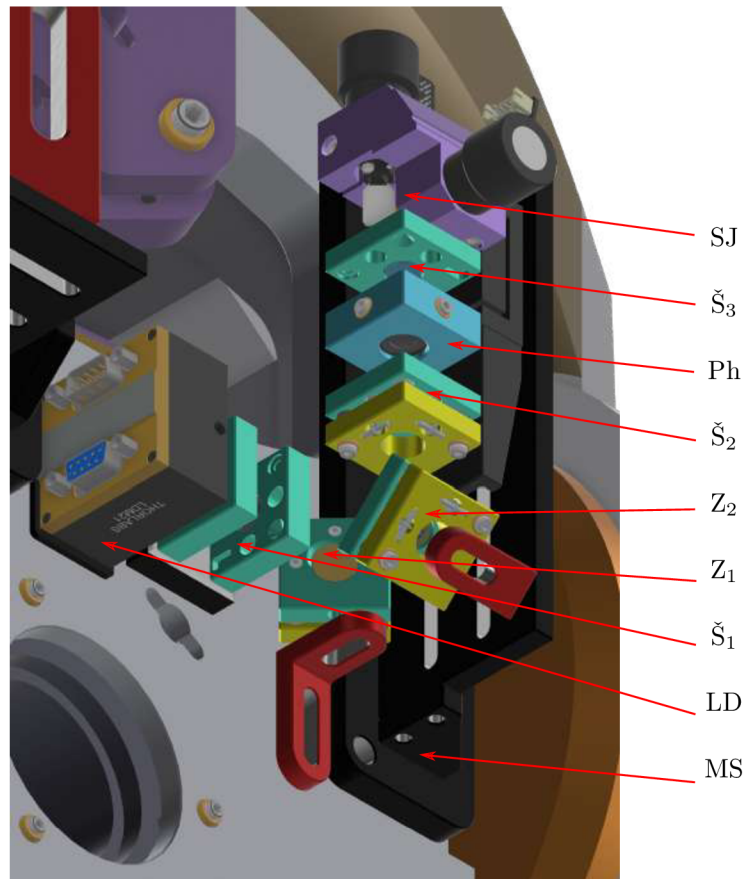
7.2. NÁVRH PRE LETECKÉ ÚČELY

7.2.1. Svetelný zdroj



Obr. 7.8: Pohľad na zadné krytovanie koncepčného návrh pre letecké účely.

V časti 5.2 sme sa venovali návrhu svetelného zdroja pre letecké účely, ktorý pracuje v pulznom režime. Na rozdiel od návrhu svetelného zdroja pre pozemné účely je svetelný zdroj súčasťou hlavnej konštrukcie optického systému, obrázok 7.8. Zároveň svetelný signál nie je vedený optickým vláknom a preto musí byť zaručená presná vzájomná poloha optických komponentov, obrázok 7.9.

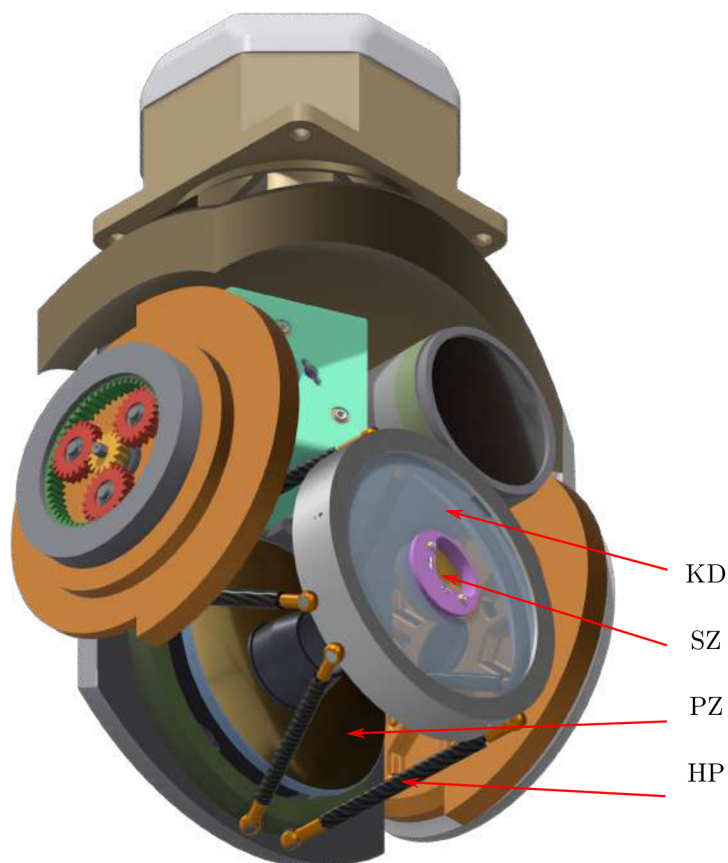


Obr. 7.9: Uloženie optických komponentov svetelného zdroja operujúceho v pulznom režime, kde MS je montážny stôl, LD je laserová dióda, Š₁, Š₂ a Š₃ sú šošovky č. 1, č. 2 a č. 3, Z₁ a Z₂ sú zrkadlá č. 1 a č. 2, Ph je priestorový filter a SJ je skenovacia jednotka.

Laserová dióda a dvojica valcových šošoviek č. 1 sú na svoje pozície pevne osadené bez možnosti jemnej justáže. Z tohoto dôvodu je kladený vysoký dôraz na precízne uloženie týchto dvoch optických komponentov pomocou dištančných podložiek. Zrkadlá č. 1 a č. 2 majú za úlohu kolimovaný svetelný zväzok presne nasmerovať šošovku č. 2 pred priestorovým filtrom. K presnému nasmerovaniu svetelného zväzku slúži k hrubej justácii L-profil s drážkou a k jemnej justácii sú zrkadlá č. 1 a č. 2 uložené na trojbodový kinematický držiak. Asferická šošovka č. 2 je uložená taktiež v trojbodovom kinematickom držiaku z dôvodu požiadavky precízneho zaostrenia svetelného zväzku na otvor priestorového filtra. Za filtrom sa nachádza šošovka č. 3 a skenovacia jednotka, ktoré sú uložené na lineárnom posuve z dôvodu možnosti defokusácie svetelného lúča podľa potreby, časť 4.2.1. Súčasťou konštrukcie svetelného zdroja je montážny stôl, ktorý umožňuje hrubú justáž niektorých optických komponentov.

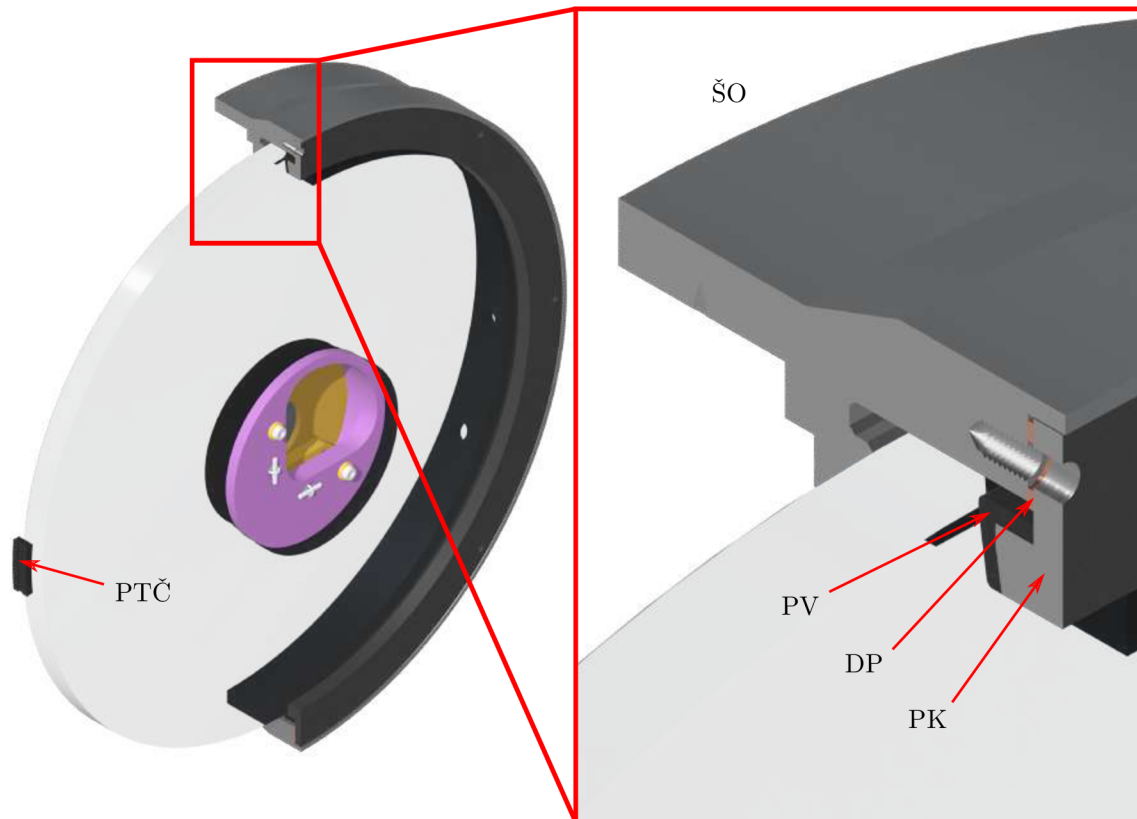
7.2.2. Uloženie optiky emitora a IR kamery

Uloženie primárneho zrkadla je sprostredkované pomocou trojbodového kinematického uloženia na základnú konštrukčnú dosku. Uloženie sme volili z dôvodu jemnej justáže primárneho zrkadla a pre jednoduchú rozoberateľnosť. Korekčná doska ďalekohľadu a sekundárne zrkadlo je uložené na konštrukcii tvorenej hexapodom. Pre veľké rozmery korekčnej dosky nie je konštrukčne možné zaistiť jemnú justáž korekčnej dosky trojbodovým kinematickým držiakom. Preto je zaisťovaná jemná justáž primárneho zrkadla a hrubá justáž korekčnej dosky za pomoci hexapodu. Sekundárne zrkadlo je taktiež uložené na trojbodovom kinematickom držiaku, obrázok 7.10.



Obr. 7.10: Uloženie spoločnej optiky detektora a infračervenej kamery, kde KD je korekčná doska, SZ je sekundárne zrkadlo, PZ je primárne zrkadlo a HP je hexapod.

Uloženie korekčnej dosky v šošovkovej objímke je znázornené na obrázku 7.11. Keďže korekčná doska má veľký priemer musí byť kontaktná plocha poistného krúžku potiahnutá gumovou vrstvou. Gumová vrstva bráni veľkému namáhaniu korekčnej dosky, ktoré by mohlo spôsobiť jej prasknutie. Korekčná doska je zároveň uchytená k objímke gumenými členmi, ktoré slúžia k tlmeniu vibrácií. Poistný krúžok je k šošovkovej objímke prichytený skrutkovým spojom. Na vymedzenie presnej vzdialenosti šošovkovej objímky a poistného krúžku slúži dištančná podložka.

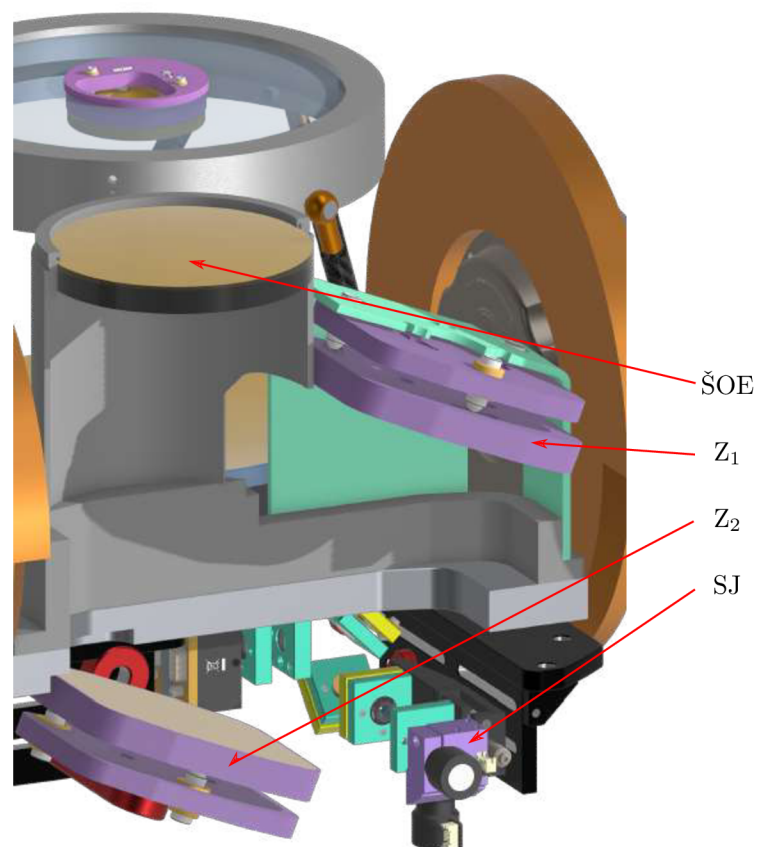


Obr. 7.11: Uloženie korekčnej dosky v objímke, kde ŠO je objímka, PK je poistný krúžok, DP je dištančná podložka, PV je gumová vrstva a PTČ je gumový tlmiaci člen.

7.2.3. Uloženie optiky emitora

Na obrázku 7.12 je znázornené uloženie optiky emitora. V časti 6.1.3 sme si uviedli, že šošovka optiky emitora je vzdialená od skenovacej jednotky približne 565 mm. Takúto konštrukčnú dĺžku návrhu si nemôžeme dovoliť a preto ju zmenšíme použitím zrkadiel č. 1 a č. 2, ktoré sú uchytané v trojbodovom kinematickom držiaku. Toto uchytanie má za úlohu presne nasmerovať svetelný lúč na šošovku optiky emitora, ktorá je uložená bez možnosti justáže.

7.2. NÁVRH PRE LETECKÉ ÚČELY



Obr. 7.12: Uloženie optiky emitora, kde ŠOE je šošovka optiky emitora, Z₁ a Z₂ sú zrkadlá č. 1 a č. 2 a SJ je skenovacia jednotka.

8. Záver

V práci sme pojednávali o návrhu optického systému LiDAR pre účely diaľkového mapovania terénu a rekonštrukciu jeho 3D modelu s možnosťou sekundárnej detekcie a sledovanie rýchlo sa pohybujúcich objektov. Navrhli sme dva koncepčné návrhy so zameraním na pozemné a letecké účely.

Stanovili sme vlnovú dĺžku 1550 nm svetelného zdroja ako ideálne riešenie pre navrhované systémy. Takáto vlnová dĺžka umožňuje použitie vysokej maximálnej prípustnej intenzity žiarenia $570 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a dobrej atmosferickej priepustnosti až 98 % na vzdialenosť 10 km. Zároveň optika emitora disponuje výstupnou apertúrou s priemerom až 120 mm, čo umožňuje optickému systému používať svetelný zdroj s výkonom 4 W v prípade Gaussovského a 4,5 W v prípade super Gaussovského priebehu intenzity. Stanovili sme účinnosť detekcie v závislosti na geometrií šírenia svetelného signálu a šumu pozadia. Šum pozadia pri detekcii objektu počas snežného dňa na vzdialenosť 10 km prevyšuje približne 13-násobne signál systému LiDAR. Signál šumu pozadia je však stabilný a môže sa softvérovo odstrániť.

Návrh pre pozemné účely spočíva v použití svetelného zdroja operujúceho v kontinuálnom režime. Zároveň neboli kladené požiadavky na konštrukčné rozmery návrhu s možnosťou uložiť svetelný zdroj mimo konštrukcie systému. Optika detektora tvorí mimoosový ďalekohľad s plochou primárneho zrkadla $\approx 70000 \text{ mm}^2$, čo zaručuje systému vysokú pravdepodobnosť detekcie emitovaného svetelného signálu. Súčasťou návrhu je sprievodná optika tvorená infračervenou kamerou operujúcou v spektrálnom rozsahu od 3 μm do 5 μm a parfokálnym objektívom s možnosťou kontinuálnej zmeny ohniskovej vzdialenosti v rozsahu od 100 do 500 mm. Objektív má plochu vstupnej apertúry $\approx 11000 \text{ mm}^2$, čo zaručuje vysokú svetelnosť. Systém je navrhovaný na umiestnenie na vozidle alebo stojane s možnosťou manuálneho ovládania.

Návrh pre letecké účely je na rozdiel od návrhu pre pozemné účely dizajnovaný tak, aby sme dosiahli menšie rozmery a nižšiu cenu. Preto návrh obsahuje svetelný zdroj umiestnený na hlavnej konštrukcii optického systému a pracuje v pulznom režime. Zároveň detektor a infračervená kamera zdieľajú jeden optický systém sprostredkovaný Cassegrainovým ďalekohľadom s korekčnou doskou. Vstupná apertúra ďalekohľadu dosahuje plochy $\approx 33000 \text{ mm}^2$. Takto navrhnutá apertúra zaručuje pomerne vysokú pravdepodobnosť detekcie svetelného signálu (približne dvojnásobne menšia ako u návrhu pre pozemné účely), ale zároveň zaručuje vysokú svetelnosť infračervenej kamery (približne trojnásobne väčšiu ako u návrhu pre pozemné účely).

Literatúra

- [1] WEAIRE, D., DONEGAN, J.F. and FLORIDES, P.S.: Unknown genius. *Institute of Physics Publishing Bristol in Philadelphia*, 2013, p.28-29. ISSN 0953-8585.
- [2] WEAIRE, D.: Synge, Edward Hutchinson. *The Dictionary of Irish Biography is a project of the Royal Irish Academy*, 2013, DOI <https://doi.org/10.3318/dib.009583.v1>.
- [3] BROOKER, G.: *Introduction to Sensors for Ranging and Imaging*. Raleigh, NC, USA: SciTech Pub. Inc., 2009. 717 p. ISBN 9781891121746.
- [4] McMANAMON, P.F.: *LiDAR technologies and systems*. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2019. 504 p. ISBN 9781510625402.
- [5] WENG, Q.: *Lidar Remote Sensing and Applications*. Oakville: Apple Academic Press Inc., 2018. 200 p. ISBN 9781482243017.
- [6] MELIN, M., SHAPIRO, A.C. and GLOVER-KAPFER, P.: LIDAR for ecology and conservation. *WWF Conservation Technology Series 1(3)*, 2017, 40 p.
- [7] GEOHUB: Lidar survey : Gaining a better understanding. <https://geohubkenya.wordpress.com/2017/08/13/lidar-survey-gaining-a-better-understanding/>, 2020 [online]
- [8] WAGNER, G.A., PLUSQUELLIC, D.F.: Multi-frequency differential absorption LIDAR system for remote sensing of CO₂ and H₂O near 1.6 μm. *National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80305, USA*, 15 p., Vol. 26, No. 15, 23. Jul 2018
- [9] KNOBELSPIESSE, K., et al.: Combined retrievals of boreal forest fire aerosol properties with a polarimeter and lidar. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol. 11, no. 14, p. 7045-7067. DOI 10.5194/acp-11-7045-2011.
- [10] WEITKAMP, C., WALTER, H.: *LIDAR: Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. New York, NY, USA: Springer, 2005. 455 p. ISBN 9780387400753.
- [11] MacAULAY, A.D.: *Military Laser Technology for defense: Technology for revolutionizing 21st Century warfare*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011. 305 p. ISBN 9780470255605.
- [12] PASCHOTTA, R.: *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. 1.edition: Wiley-VCH, 2008. ISBN 9783527408283.
- [13] HICKMAN, I.: *Analog Electronics: Analog Circuitry Explained*. Oxford: Heinemann Newnes, 1990. ISBN 9780434907236.
- [14] STANĚK, T., et al.: Metody Q spínání *Materiály k předmětu LT2*, Prezentácia, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 14 p.
- [15] SPULER, S.M., MAYOR, S.D.: Raman shifter optimized for lidar at a 1,5 μm wavelength. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 15, p. 2990-2995. DOI 10.1364/AO.46.002990.
- [16] HVOŽDARA, L., et al.: Kvantové kaskádové lasery *Kvantová mechanika v praxi*, Január 2005, Prezentácia, Bratislava MFF UK, 21 p.
- [17] LI, J.S., et al.: Quantum Cascade Laser Spectrometry Techniques: A New Trend in Atmospheric Chemistry. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2013, p. 523-559. DOI 10.1080/05704928.2012.757232.

- [18] POWELL, R.C.: *Physics of Solid-State Laser Materials*. Tuscon, AZ, USA: Springer, 1998. 423 p. ISBN 9781461268529.
- [19] TOTEMS, J., et al.: Signal Processing Methods and Poly-Pulse Waveforms for Laser Vibrometry in Pulsed Mode. *15th Coherent Laser Radar Conference*, 2009, 4 p.
- [20] STANN, B., et al.: Chirped amplitude modulation lidar for range and Doppler measurements and 3-D imaging. *Laser Radar Technology and Applications XII*, 2007, vol. 6550, p. 31-42 DOI 10.1117/12.719523.
- [21] HOLMES, J.F., RASK, B.J.: Coherent, CW, pseudo-random code-modulated lidar for path-resolved optical remote sensing. *Atmospheric Propagation and Remote Sensing III*, 1994, vol. 2222, p. 20-28. DOI 10.1117/12.177994.
- [22] BASHKANSKY, M., et al.: RF phase-coded random-modulation LIDAR. *Optics Communications*, 2004, vol. 231, no. 1, p. 93-98. DOI 10.1016/j.optcom.2003.12.029.
- [23] MARSHALL, G.F., STUTZ, G.E.: *Optical and Laser Scanning*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012. 749 p. ISBN 9781439808801.
- [24] HAWE, L.E. II.: *Control of a Fast Steering Mirror for Laser-Based Satellite Communication*. [Diploma thesis.] Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2006. 259 p.
- [25] OSTASZEWSKI, M., et al.: Risyly Prism Beam Pointer . *Free-Space Laser Communications VI*, 2006, vol. 6304, p. 630406 1-10. DOI 10.1117/12.679097.
- [26] Solid State Division: MEMS mirrors. *HAMAMATSU PHOTONICS*, 2020, Cat.No KOTH9003E04, 38 p. <https://www.hamamatsu.com/jp/en.html>. [online]
- [27] WANG, Z., et al.: Chip scale GaAs optical phased arrays for high speed beam steering. *Applied Optics*, 2020, vol. 59, no. 27, p. 8310-8313. DOI 10.1364/AO.396524.
- [28] RAJ, T., et al.: A Survey on LiDAR Scanning Mechanisms. *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 5, p. 2079-9292. DOI 10.3390/electronics9050741.
- [29] HUNTINGTON, A.S., et al.: Linear-mode single-photon APD detectors. *Advanced Photon Counting Techniques II*, 2007, vol. 6771, p. 145-155. DOI 10.1117/12.751925.
- [30] SLINEY, D., WOLBARSH, M.: *Safety with Lasers and Other Optical Sources*. New York, NY, USA: Springer Science, 1980. 1035 p. ISBN 9781489935984.
- [31] GUNNAR, R.: Laser Safety Calculations for Imaging Sensors. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 17, p. 3765-3803. DOI 10.1117/12.751925.
- [32] ISO/IEC 1997. "ISO/IEC 60825-1." Safety of laser products. *Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide*, ISO/IEC, Edition 1.2, www.iec.ch/catlg-e.htm.
- [33] SOLTANI, M.D., et al.: Safety Analysis for Laser-based Optical Wireless Communications: A Tutorial. *Computer and information sciences*, arXiv, 2021, DOI 10.48550/ARXIV.2102.08707.
- [34] SLINEY, D., WOLBARSH, M.: *U.S. STANDART ATMOSPHERE*. Washington, D.C., USA: U.S. Government Printing Office, 1976. 1035 p. ASIN B002WC9654.
- [35] MAYERHOFNER, T., PAHLOW, S., POPP, J.: The Bouguer-Beer-Lambert Law: Shining Light on the Obscure. *ChemPhysChem*, 2020, vol. 21, p. 1-19. DOI 10.1002/cphc.202000464.

LITERATÚRA

- [36] HITRAN online : Definitions and Units: Line-by-line Parameters. <https://hitran.org/docs/definitions-and-units/>, 2004 [online]
- [37] Wolfram MathWorld: Lorentzian Function. <https://mathworld.wolfram.com/Lorentzian-Function.html>, 2022 [online]
- [38] Apply a Savitzky-Golay filter to an array: `scipy.signal.savgol.filter`. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.savgol.html>, 2022 [online]
- [39] MISHCHECKO, M.I., TRAVIS, L.D., LACIS, A.A.: *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002. 488 p., ISBN 9780521782524.
- [40] Appendix 2: Volume of Gaussian Curve. <http://www.jonmarchant.clara.net/space/thesis/Appendix2.pdf>, 2022 [online]
- [41] Alan Zucconi: The Mathematics of Rayleigh Scattering. <https://www.alanzucconi.com/2017/10/10/atmospheric-scattering-3/>, 2017 [online]
- [42] MALÝ, P.: *OPTIKA*. Praha, CZ: Nakladatelství Karolinum, 2013. 368 p. ISBN 9788024622460.
- [43] Edmund Optics: Gaussian Beam Propagation. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>, 2022
- [44] GUNNAR, R.: Učební text k přednášce UFY102: Fotometrie a radiometrie. *Fyzikální ústav UK*, 2019, 11 p.
- [45] CAO, N., et al.: A method of background noise reduction in lidar data. *Applied Physics B*, 2013, vol. 113, p. 115–123. DOI 10.1007/s00340-013-5447-9.
- [46] BOORD, W.J., HOFFMAN, J.B.: *Air and Missile Defense Systems Engineering*. Broken Sound Parkway, NW, USA: CRC Press, 2016. 305 p. ISBN 9781439806715.
- [47] THORLABS: Manual Fiber Polarization Controllers. <https://www.thorlabs.com/>, 2022 [online]
- [48] THORLABS: Lithium Niobate Electro-Optic Modulators, Fiber-Coupled . <https://www.thorlabs.com/>, 2022 [online]
- [49] THORLABS: Pinhole Spatial Filter System . <https://www.thorlabs.com/>, 2022 [online]
- [50] THORLABS: Numerical Aperture is not a Good Parameter for Single Mode Fibers. <https://www.thorlabs.com/n>, 2022 [online]
- [51] DRIGGERS, R.G., FRIEDMAN, M.H., NICHOLS, J.M.: *Introduction to infrared and electro-optical systems*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2012. 3583 p. ISBN 9781608071005.
- [52] DHAR, V., et al.: Comparison of the performance of LWIR and MWIR thermal imagers for varying ambient temperature and humidity conditions. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2011, vol. 8014, p. 1-10. DOI 10.1117/12.884372.
- [53] MWIR or LWIR thermal cameras for surveillance applications?. *acal bfi*, 2022, p. 1-4. <https://www.acalbfi.com/>. [online]

- [54] Thermal cameras Chapter 5. *Intelligent Network Video: Understanding Modern Surveillance Systems*, 2022, p. 97-110.
- [55] A PENCIL OF RAYS: The Ultimate Guide to Lens Design Forms: The types of optical systems in a lens designer's toolbox. <https://www.pencilofrays.com/lens-design-forms/>, 2022 [online]
- [56] Photographic zooms: A file exchange site for lens designs. <https://www.lens-designs.com/photographic-zooms>, 2022 [online]
- [57] EDMUND OPTICS, Knowledge Center: Introduction to Modulation Transfer Function. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/introduction-to-modulation-transfer-function/>, 2022 [online]
- [58] Ophir Optronics Solutions Ltd. *Advanced IR Zoom Lenses for Next Generation Thermal Imaging Applications*, 2020, p. 1-3., <https://www.ophiropt.com/infrared/> [online]
- [59] Cast acrylic NIR filters. <https://psc.dk/en/products/pmma-acrylic-optical-filter-solutions/cast-acrylic-nir-filters/>[online]

Obrázky

- [60] Todd Neff: Images from the early days lidar : Colidar Mark II. <https://toddniff.com/books/lidarhistory/extras/photos-and-video-the-laser-thats-changing-the-world/ancient-history/>[online]
- [61] SURVEYING GROUP NEW: LIDAR: Do you know how many types of LiDAR are there?. <https://surveyinggroup.com/do-you-know-how-many-types-of-lidar-are-there/>[online]
- [62] USHIO: Laser Diodes: The Technology Explained. <https://www.ushio.eu/laser-explained/>[online]
- [63] RP PHOTONICS: Encyclopedia: Q Switching. <https://www.rp-photonics.com/>[online]
- [64] A short discussion on 980nm and 1480nm pump based Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA). <https://mapyourtech.com/entries/general/a-short-discussion-on-980nm-and-1480nm-pump-based-erbium-doped-fiber-amplifiers-edfa/>[online]
- [65] FindLight BLOG: Edge Emitting vs Surface Emitting Lasers: A Comparison of Performance. <https://www.findlight.net/blog/2019/02/15/edge-emitting-vs-surface-emitting/>[online]
- [66] ScannerMAX: XY SCANNING SYSTEMS. <https://scannermax.com/collections/xy-scanning-systems>[online]
- [67] Lissajous curve. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=Lissajous+curve&title=Special:MediaSearch&GoType=image>[online]
- [68] Polygon and scanning mirrors. <https://www.lt-ultra.com/en/metal-optics-and-tools/metal-optics/polygon-and-scanning-mirrors/>[online]
- [69] MLA Technology. <https://ams.com/en/mla>[online]
- [70] MEMS-based handheld confocal microscope for in-vivo skin imaging. <https://www.researchgate.net/publication/43134417>[online]

LITERATÚRA

- [71] Optical phased array technology on-chip at both near infrared and blue wavelengths. <https://www.youtube.com/watch?v=xEqV879qDNEab-channel=ColumbiaEngineering>[online]
- [72] HgCdTe avalanche photodiodes: A review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/>[online]
- [73] Visible Light Communications towards 5G. <https://www.researchgate.net/publication/274963972-Visible-Light-Communications-towards-5G>[online]
- [74] ISR Sensor Ball for Aircraft. <https://dsiac.org/technical-inquiries/notable/isr-sensor-ball-for-aircraft/>[online]
- [75] Particle Physics (30 of 41) What is a Photon? 14. Mie Scattering (Continued 2). <https://www.youtube.com/watch?v=4Lyf2zBSlCoab-channel=MichelvanBiezen>[online]
- [76] Lambert's cosine law. <https://en.wikipedia.org/wiki/Lambert's-cosine-law>[online]
- [77] Black body radiation. <https://www.sun.org/encyclopedia/black-body-radiation>[online]
- [78] Laser beam shaping applications. <https://www.holor.co.il/beam-shaping-in-laser-welding/>[online]
- [79] Fujinon Broadcast Lenses. <https://www.provideocoalition.com/fujinon-announces-new-8k-and-a-4k-lenses/>[online]

9. Zoznam použitých symbolov

A [-]	absorbancia
$A_{4,6}$ [-]	4., 6. rád asférického povrchu
c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	rýchlosť svetla
c_A [$\text{M} \cdot \text{cm}^{-3}$]	molárna koncentrácia
D [m]	priemer výstupnej apertúry
D_{IK} [m]	priemer výstupnej apertúry infračervenej kamery
D_{OE} [m]	priemer výstupnej apertúry optiky emitoru
D_{OD} [m]	priemer výstupnej apertúry optiky detektora
D_G [m]	priemer svetelnej stopy Gaussovského lúča
D_s [m]	priemer svetelnej stopy
D_{sG} [m]	priemer svetelnej stopy super Gaussovského lúča
D_{sv} [m]	priemer svetelnej stopy skenovanej vzorky
f [m]	ohnisková vzdialenosť
f_{IK} [m]	ohnisková vzdialenosť infračervenej kamery
f_{OD} [m]	ohnisková vzdialenosť optiky detektoru
f_{OE} [m]	ohnisková vzdialenosť optiky emitoru
f_t [m]	ohnisková vzdialenosť infračervenej kamery
G [-]	geometrický koeficient
h [m]	výška
I [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	výsledná intenzita žiarenia
I_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	počiatočná intenzita žiarenia
I_i [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	intenzita dopadajúceho žiarenia
I_{max} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	maximálna prípustná intenzita žiarenia
I_r [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	intenzita rozptýleného žiarenia
I_{SZ} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	intenzita žiarenia svetelného zdroja
k [-]	koeficient paraboly
l [m]	dĺžka optickej dráhy
L [m]	konštrukčná dĺžka
l_{IK} [m]	maximálna konštrukčná dĺžka

l_{max} [m]	maximálna vzdialenosť skenovanej roviny
M^2 [-]	koeficient kvality svetelného lúča
n [-]	index lomu
N [m ⁻³]	počet molekúl obsiahnutých vo vzduchu
P_G [J · s ⁻¹]	výkon lasera s Gaussovským priebehom intenzity
P_r [J · s ⁻¹]	výkon obsiahnutý v rezonátore
P_s [J · s ⁻¹]	stratový výkon
P_{sG} [J · s ⁻¹]	výkon lasera so super Gaussovským priebehom intenzity
r [m]	polomer
r_A [m]	polomer Airiho disku
r_{st} [m]	polomer svetelnej stopy
T [-]	priepustnosť
T_{IK} [-]	priepustnosť objektívu infračervenej kamery
T_z [-]	zjednotená priepustnosť
T_a [-]	výsledná atmosferická priepustnosť
t_p [s]	doba letu laserového pulzu
β [-]	Rayleighho koeficient
γ [°]	uhol dopadu
δ [mm]	posun
ϵ_λ [M ⁻¹ · cm ²]	absorpčný koeficient
θ [°]	rozptylový uhol
λ [nm]	vlnová dĺžka
λ_{IK} [nm]	vlnová dĺžka infračervenej kamery
λ_{SZ} [nm]	vlnová dĺžka svetelného zdroja
ξ [lp/mm]	priestorové rozlíšenie
ξ_c [lp/mm]	medzné priestorové rozlíšenie
ρ [-]	pomer hustoty vzduchu
φ [°]	náklon okolo osi
ϕ [°]	uhol okolo optickej osi
Ω [sr]	priestorový uhol

10. Zoznam príloh

Príloha 1: Výkres šošovky optiky emitoru

Príloha 2: Parametre optiky emitoru

Príloha 3: Výkres zostavy objektívu infračervenej kamery

Príloha 4: Parametre objektívu infračervenej kamery č.1

Príloha 5: Parametre objektívu infračervenej kamery č.2

Príloha 6: Výkres korekčnej dosky Cassegrainovho ďalekohľadu

Príloha 7: Výkres primárneho zrkadla Cassegrainovho ďalekohľadu

Príloha 8: Výkres sekundárneho zrkadla Cassegrainovho ďalekohľadu

Príloha 9: Výkres dištančného krúžku korekčnej dosky

Príloha 10: Výkres dištančného krúžku hlavného zrkadla

Príloha 11: Výkres gumenej podložky

Príloha 12: Výkres kolíčku

Príloha 13: Výkres montážneho okružia

Príloha 14: Výkres objímky

Príloha 15: Výkres poistného krúžku

Príloha 16: Výkres tlmiaceho krúžku

Príloha 17: Výkres tubusovej clony

Príloha 18: Výkres vodiacej tyče

Príloha 19: Výkres zrkadlového tubusu

Príloha 20: Výkres zostavy optiky systému lidar pre letecké účely