



偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

冯帅 常军 胡瑶瑶 吴昊 刘鑫

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

Feng Shuai Chang Jun Hu Yao-Yao Wu Hao Liu Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 244202 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200920

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高光谱分辨率激光雷达鉴频器的设计与分析

Design and analysis of high-spectral resolution lidar discriminator

物理学报. 2017, 66(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.184202>

基于希尔伯特变换的结构光照明快速三维彩色显微成像方法

Fast structured illumination three-dimensional color microscopic imaging method based on Hilbert-transform

物理学报. 2020, 69(12): 128701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200352>

一种无需定标的地基激光雷达气溶胶消光系数精确反演方法

An accurate inversion method of aerosol extinction coefficient about ground-based lidar without needing calibration

物理学报. 2019, 68(7): 074205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181825>

基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计

Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory

物理学报. 2019, 68(13): 134201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190299>

受激辐射损耗超分辨显微成像系统研究的新进展

New advances in the research of stimulated emission depletion super-resolution microscopy

物理学报. 2020, 69(10): 108702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200168>

外差式偏振干涉成像光谱技术研究

Heterodyne polarization interference imaging spectroscopy

物理学报. 2017, 66(16): 160702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.160702>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析*

冯帅¹⁾ 常军^{1)†} 胡瑶瑶¹⁾ 吴昊²⁾ 刘鑫¹⁾

1) (北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2) (中国人民解放军 96911 部队, 北京 100011)

(2020 年 6 月 15 日收到; 2020 年 7 月 24 日收到修改稿)

基于偏振调制的三维成像激光雷达, 具有测量范围远、测量精度较高、成像速度快、无运动伪像等优点, 同时不受其他调制方式中增强电荷耦合器件、雪崩光电二极管阵列探测器工艺复杂、易饱和损坏等缺点限制, 但存在需要双相机、成像视场角受电光晶体限制、成像质量易受到入射角度及云雾等大气条件影响等缺点. 为克服上述缺点, 本文提出采用偏振成像激光雷达与短波红外变焦光学系统共孔径复合的方式, 构建双模目标探测成像系统. 开展偏振成像激光雷达与短波红外复合光学系统设计研究, 使用光学设计软件完成系统光学设计, 并对完成系统像质分析; 使用光学仿真软件对光学系统成像过程仿真; 分析仿真结果表明所设计光学系统成像质量良好、设计正确可行. 本文所采用方法为偏振调制成像激光雷达研究提供一种新思路.

关键词: 三维成像, 激光雷达, 偏振, 短波红外, 光学设计**PACS:** 42.15.Eq, 42.60.-v**DOI:** 10.7498/aps.69.20200920

1 引言

三维成像激光雷达因具备主动照明、角度分辨率高、可探测距离信息等优势, 被视为是被动遥感和微波雷达后的下一代技术产品, 与传统被动传感器成像及微波雷达相比, 三维成像激光雷达具有明显优势^[1], 同时还具备抗干扰能力强、易于小型化等特点^[1-5]. 非扫描式三维成像激光雷达是目前研究的热点方向之一, 其中基于偏振调制的非扫描型三维成像激光雷达(后文称偏振成像激光雷达)具有测量范围远、测量精度较高、成像速度快、无运动伪像等优点, 同时不受其他调制方式中增强型电荷耦合器件、雪崩光电二极管阵列探测器工艺复杂、易饱和和损坏等缺点限制; 但其也存在需要双相机、成像视场角受电光晶体限制、成像质量易受到入射角度及云雾等大气条件的影响等缺点^[6].

针对上述问题, 本文提出采用偏振成像激光雷达与短波红外变焦光学系统共孔径复合的方式, 构建双模目标探测成像系统, 这样既减小两套系统的体积、解决两套系统共轴的问题, 又可以解决偏振调制成像激光雷达视场角小、成像质量受到入射角度及云雾等大气条件影响以及短波红外成像目标能量较低的限制. 依照上述思路, 开展偏振成像激光雷达与短波红外复合光学系统设计研究, 采用光学设计软件完成系统光学设计, 并对完成系统像质分析; 采用光学仿真软件对光学系统成像过程、偏振成像激光雷达偏振调制成像过程仿真. 结果表明所设计光学系统成像质量良好、设计正确可行.

2 系统原理

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学系统, 其成像原理如图 1 所示. 整套系统由望远镜组、短波红外成像镜组、偏振调制镜组、分光器件

* 国家自然科学基金(批准号: 61471039)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: optics_chang@126.com

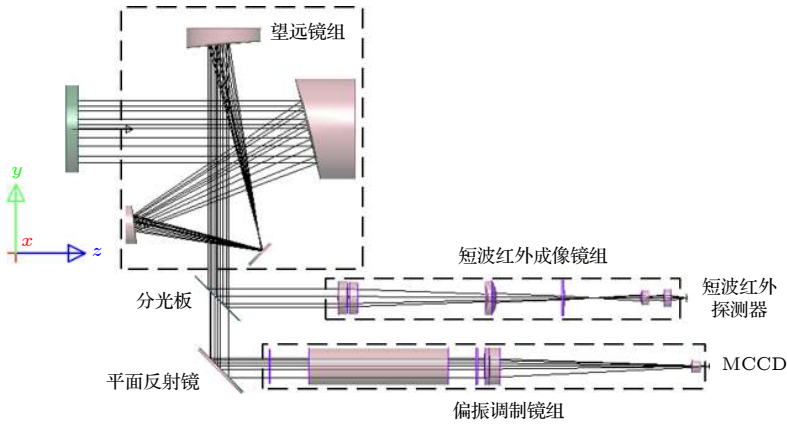


图 1 偏振成像激光雷达与短波红外复合光学系统成像原理图

Fig. 1. Schematic diagram of the polarization imaging lidar and short-wave infrared composite optical system.

以及探测器等组成, 其中望远镜组实现光线接收, 短波红外成像镜组为变焦镜头、实现目标探测识别, 偏振调制镜组通过偏振调制实现目标测距, 分光器件实现光束分光. 短波红外成像镜组与偏振调制镜组通过共孔径结构方式复合, 望远镜组为系统共孔径部分; 望远镜与后端的短波红外成像镜组、偏振调制镜组分别构成完整折反光学系统, 这样设计使系统具备宽波段和大口径的特点^[7-10]. 而共孔径结构存在的视场遮拦问题通过离轴三反结构型式来克服^[9].

偏振成像激光测距为本系统的核心功能, 其调制过程中主要使用的器件为普克尔盒, 而现有普克尔盒有效利用入射光线角度最大为 1° , 这使得偏振成像激光雷达视场角受限^[11-13]. 短波红外变焦成像系统通过移动变焦实现长短焦两种模式切换, 其中短焦模式具备较大视场, 用于任务目标探测; 变焦到长焦模式后具备较高分辨率, 在短焦模式发现目标后用于目标识别; 偏振成像激光雷达视场范围与短波红外系统长焦模式保持一致, 在目标识别的同时完成目标测量, 这样系统就完成目标探测、目

标识别和目标测量的过程. 以距系统 15 km 地面物体为目标, 结合系统功能计算指标参数见表 1^[14,15].

3 系统光学设计结果

系统中望远镜组采用离轴三反结构型式克服视场中心遮拦问题, 短波红外镜组采用移动变焦补偿组的方法来实现变焦^[16], 短波红外探测器选择 Sofradir 公司所生产的 SNAKE SW 型 InGaAs 探测器. 偏振调制镜组中普克尔盒选择 FastPulse Technology 公司的 1144-50 型、分焦平面偏振相机 (MCCD) 选择 LUCID vision LABS 公司的 Phoenix PHX050S-P 型偏振相机.

3.1 望远镜组设计结果

采用离孔径的方式实现离轴, 便于设计完成后的加工制造以及检测装调; 孔径光阑设置在主镜上, 便于整体光学设计; 在次镜和三镜之间的中间

表 1 复合系统参数指标

Table 1. Parameter of the composite system.

参数	短波红外变焦成像	偏振成像激光雷达
工作波段	0.9—1.7 μm	0.532 μm
探测器像元尺寸	15 μm	3.45 μm
探测器像元数	640 × 512	2448 × 2048
焦距	300(900) mm	725 mm
视场角	$2^\circ \times 1.5^\circ$ ($0.67^\circ \times 0.5^\circ$)	$0.67^\circ \times 0.56^\circ$
入瞳直径	150 mm	150 mm
F数	2(6)	4.8
MTF _{design}	≥ 0.408	≥ 0.408

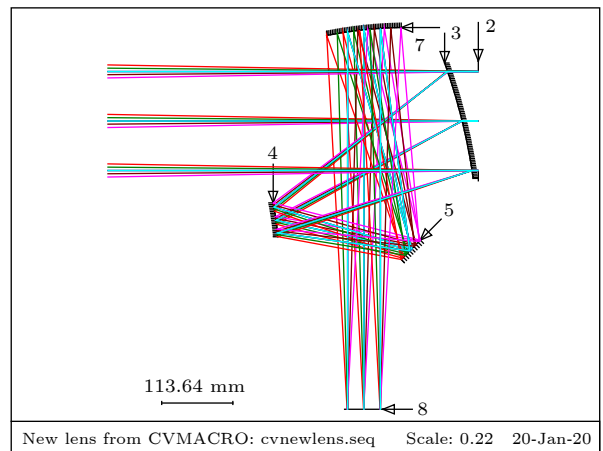


图 2 接收光学系统光路图

Fig. 2. Optical path figure of the receiving optical system.

像面处设置一面平面反射镜来折叠光路,以减小系统的体积;同时平面反射镜设置成为视场光阑,这样可以起到有效减少系统杂散光的效果.其光路图如图 2 所示,主镜 3、次镜 4、三镜 7 面型均采用二次曲面,系统入瞳直径为 150 mm,出瞳直径为 50 mm,缩束比为 3 倍.

对其进行像质评价,结果如图 3 所示,工作波段的调制传递函数 (MTF) 已经接近衍射极限,各个视场所成像斑均在艾里斑内部,光斑 RMS (均方根) 直径均小于 5 μm . 分析结果表明望远镜组成像质量良好,光学设计满足系统要求.

3.2 短波红外成像镜组设计结果

短波红外成像镜组与望远镜组合后光路图如图 4 所示,短波红外成像镜组由前固定组 (10—

13 面)、变倍补偿组 (14—17 面)、后固定组 (18—21 面) 三部分 6 片镜片组成. 使用直线电机带动变焦补偿组前后移动来实现系统光学变焦,系统总长固定为 551.8454 mm,镜片材料分别选择 ZNSE 和 IRG26 两种材料,其中 IRG26 为红外硫系玻璃.

对其进行像质评价,结果如图 5 所示,两种焦距光学系统 MTF 曲线均接近衍射极限,系统视场光斑 RMS 直径大小均在 3.2 μm 及 9.3 μm 以下,均小于探测器 15 μm 像元大小. 分析系统斯特列尔比可知,长焦模式系统斯特列尔比最小值为 0.985,最大值为 0.997,都接近于 1;短焦模式系统斯特列尔比最小值为 0.850,最大值为 0.990,只有子午方向边缘光线斯特列尔比略小,其他也接近于 1. 分析结果表明短波红外成像镜组成像质量良好,光学设计满足系统要求 [17].

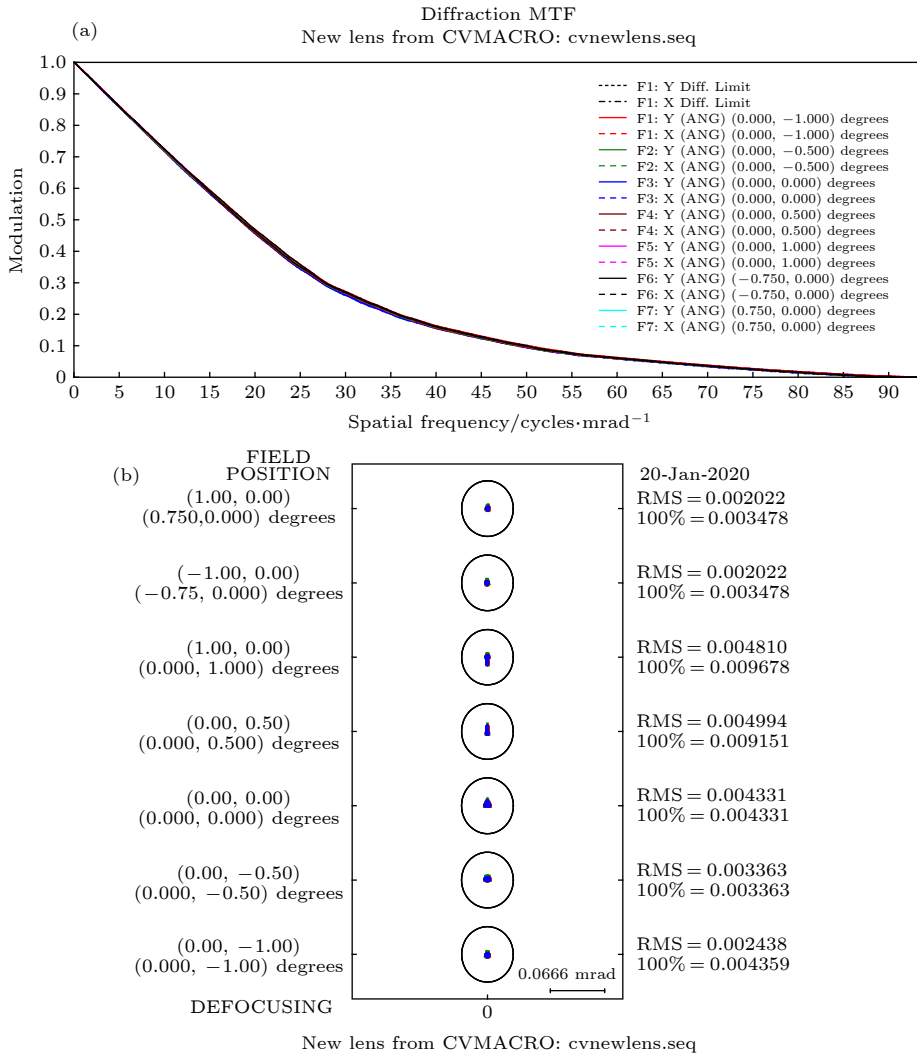


图 3 接收光学系统像质分析图 (a) MTF 图; (b) 点列图

Fig. 3. Image quality analysis diagram of the receiving optical system: (a) MTF diagram; (b) point column diagram.

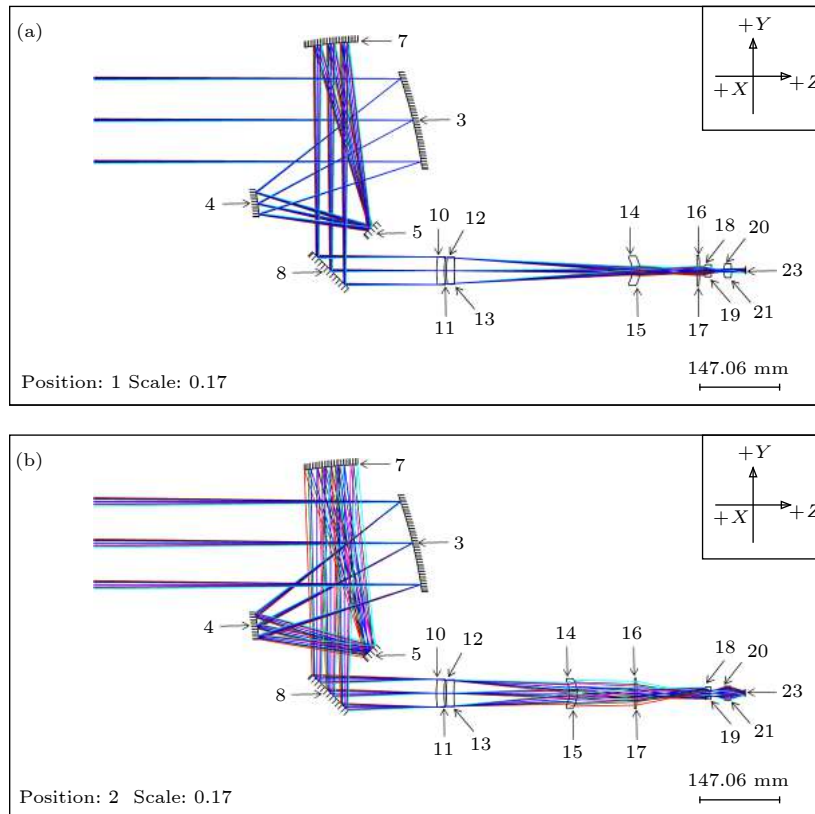
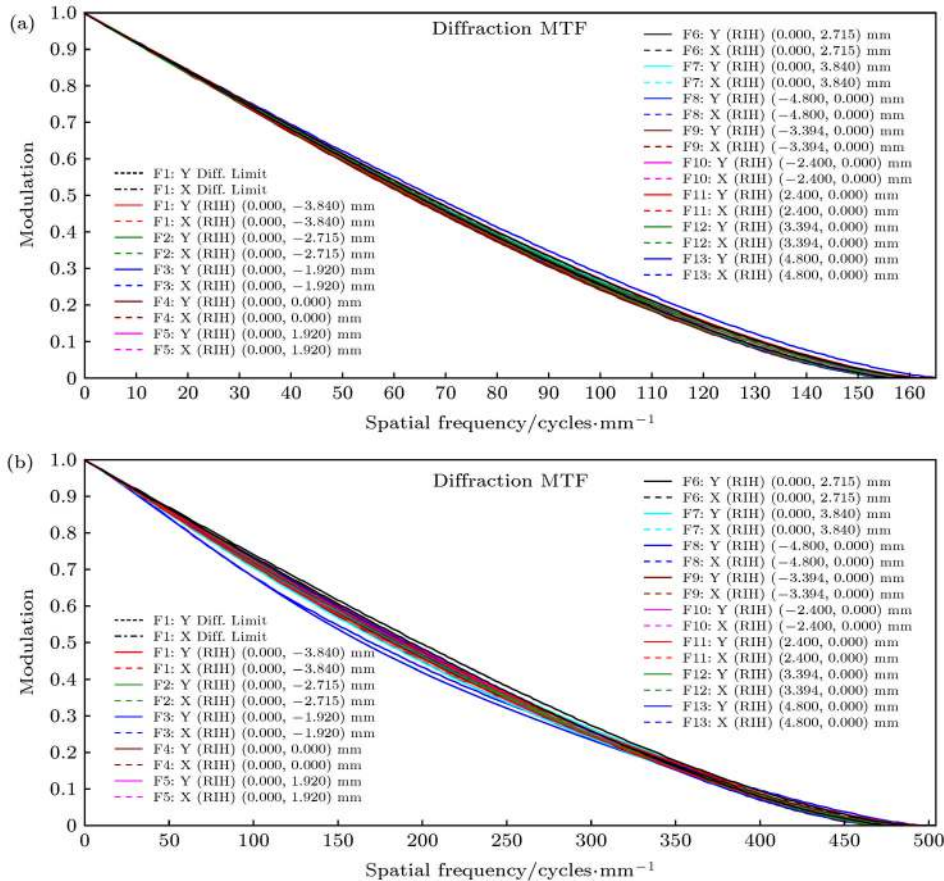


图 4 短波红外成像镜组光路图 (a) 长焦模式, 焦距为 900 mm; (b) 短焦模式, 焦距为 300 mm

Fig. 4. Optical path figure of the short wave infrared imaging lens: (a) Long-focus mode (the focal length is 900 mm); (b) short-focus mode (the focal length is 300 mm).



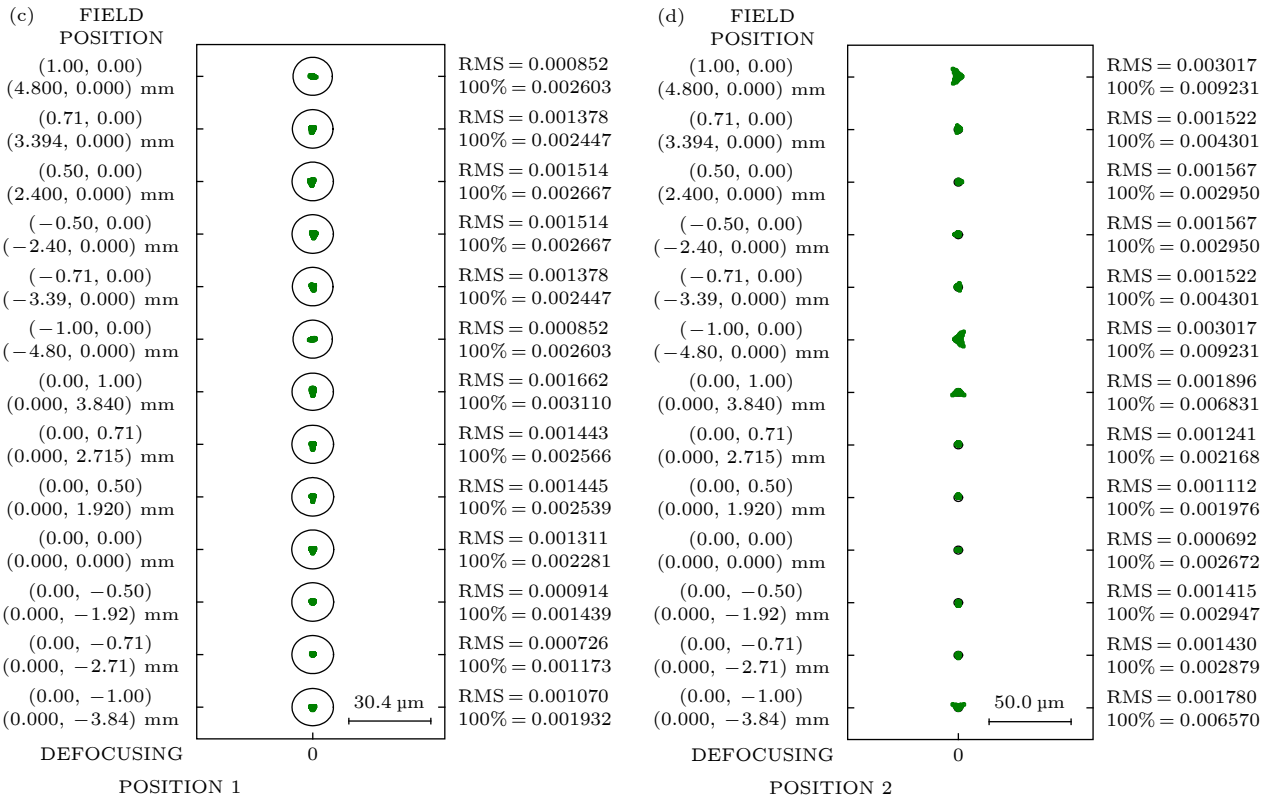


图 5 短波红外成像镜组像质分析图 (a) 长焦模式 MTF 图; (b) 短焦模式 MTF 图; (c) 长焦模式点列图; (d) 短焦模式点列图
 Fig. 5. Image quality analysis diagram of the short wave infrared imaging lens: (a) MTF diagram of the long-focus mode; (b) MTF diagram of the short-focus mode; (c) point column diagram of the long-focus mode; (d) point column diagram of the short-focus mode.

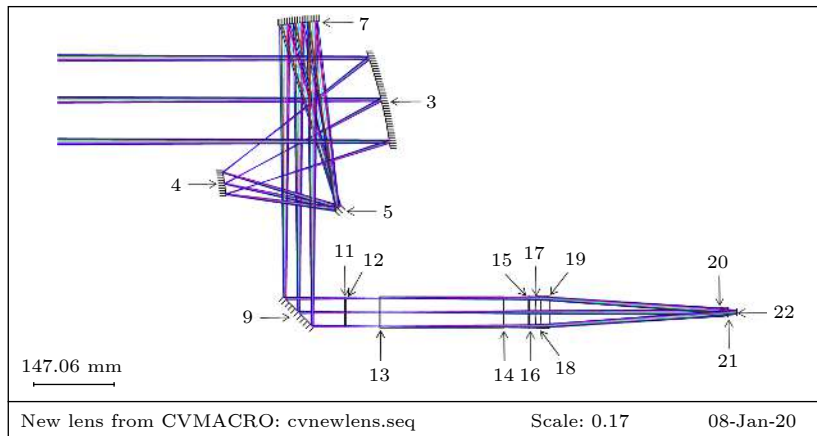


图 6 偏振调制镜组光路图
 Fig. 6. Optical path figure of the polarization modulating lens.

3.3 偏振调制镜组设计结果

偏振调制镜组由偏振片 (P)、普克尔斯盒 (PC)、四分之一波片 (QWP)、成像镜组 (L)、MCCD 相机组成, MCCD 可分别在 0° , 45° , 90° , 135° 四个偏振方向成像, 通过这四个偏振方向光强相互计算得出 PC 所引入相位延迟, 进而间接算出光束飞行时间, 实现并行激光测距^[10]. P, PC, QWP 使用 BK7

平板玻璃表示, L 使用成都光明生产的 HLAk1 和 HZF6 两种玻璃材料, 光阑设置在 PC 第 1 面上, 与望远镜组合后光路图如图 6 所示. 同样使用前述的 MTF、点列图等方法对其像质分析可知, 各视场 MTF 均接近衍射极限, 光斑均在艾里斑内、RMS 半径大小均在 0.002 mm 以下, 均小于探测器 $3.45 \mu\text{m}$ 像元大小. 同样光学设计满足系统要求.

4 结果分析

4.1 公差分析

对 3.2 节和 3.3 节中所设计光学系统 (已经与 3.1 节所设计望远镜组合置成一套系统, 共孔径部

表 2 光学系统公差值

Table 2. Tolerance value of the optical system.

公差项	短波红外成像镜组	偏振调制镜组
曲率半径公差最小值/mm	0.01	0.1
厚度公差最小值/mm	0.01	0.5
表面不规则度公差最小值/ring	0.5	0.5
空气间隔公差最小值/mm	0.04	0.08
装调偏心公差最小值/mm	0.01	0.02
装调倾斜公差最小值/mrad	0.15	0.15
折射率公差最小值	0.002	0.001

分公差分配值保持一致) 进行公差分析, 将望远镜的主镜表面倾斜 α , 并与成像像面一起作为补偿器, 主镜补偿范围为 ± 0.002 rad, 成像像面补偿范围为 ± 0.5 mm, 使用复色 MTF 公差标准反向灵敏度计算, 分别在空间频率 33 和 50 lp/mm 处所有视场及所有变焦范围内进行分析. 经过反复调整分析, 系统参数公差值部分如表 2 所列, 由公差结果可得, 大部分公差在工业级范围内, 只有少数公差在精确级公差范围内, 说明系统整体属于较易加工装调的范围 [18,19].

4.2 成像仿真分析

根据上述光学设计结果, 使用光学仿真软件建立系统仿真模型, 在距模型进光口 15 km 的系统视场范围内设置待测光源 (图 7), 以仿真不同形状目标物体在系统中成像过程, 在视场范围外设置有杂散光光源, 以仿真视场范围外杂散光 [20]. 图 8 给

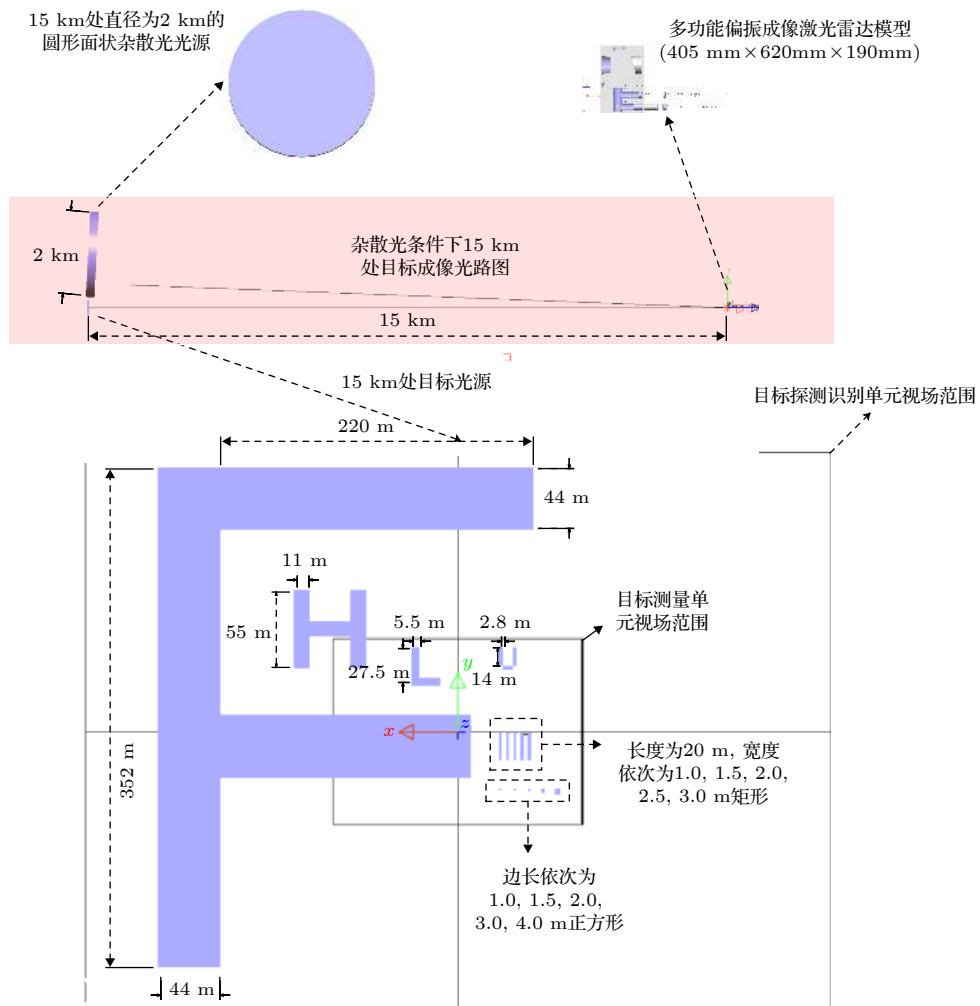


图 7 杂散光条件下 15 km 处目标成像仿真光路及目标光源图

Fig. 7. Target imaging simulation optical path and target light source diagram at 15 km under stray light condition.

出了系统的光学仿真模型图, 其中偏振器件 P, PC, QWP 按调制原理分别设置为线性起偏器、旋转 45°线性延迟片、旋转 0°线性延迟片.

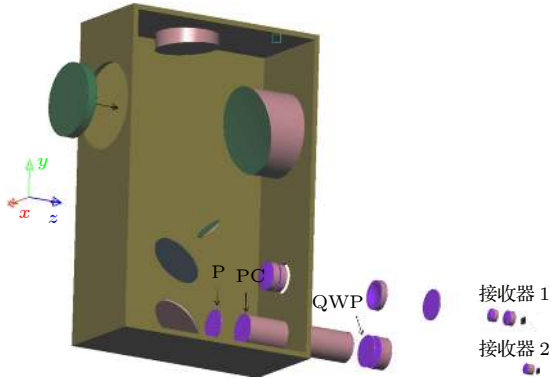


图 8 系统的光学仿真模型图

Fig. 8. Lighttools simulation model diagram of the system.

通过对 10^7 条光线追迹, 相对光线功率阈值设置为 10^{-12} , 在杂散光条件下, 正向模拟完成系统成像仿真过程, 成像结果如图 9 所示. 由分析可知, 视场范围内, 杂散光较少, 可以忽略; 短波红外短焦模式时, 目标探测识别单元边缘视场存在少量畸变, 畸变量小于 5%, 目标边缘成像清晰; 能分辨直径 1 m 的独立正方形目标, 当形状相似的目标之间距离小于 3.25 m 时, 系统无法完全区分. 短波红外长焦模式时, 视场范围内成像畸变较小, 目标边缘成像清晰, 能分辨直径 1 m 的独立正方形目标, 当形状相似的目标之间距离为 2.25 m 时, 系统依然可以进行区分, 而偏振成像激光雷达与短波红外长焦模式成像视场范围、成像质量与目标探测识别单元长焦成像基本一致. 整体来说, 系统成像质量较好.

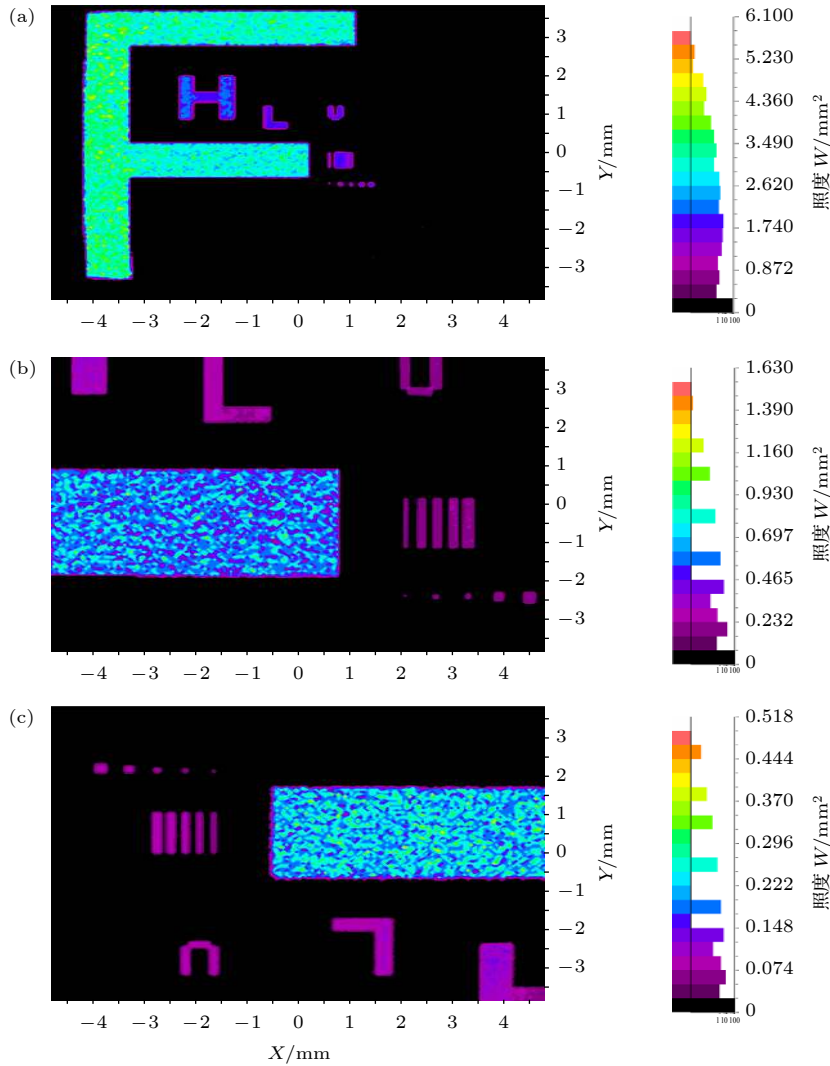


图 9 成像照度分析图 (a) 短波红外短焦模式; (b) 短波红外长焦模式; (c) 偏振成像激光雷达

Fig. 9. Analysis diagram of the imaging illuminance: (a) Short-wave infrared short-focus mode; (b) short-wave infrared long-focus mode; (c) polarization imaging lidar.

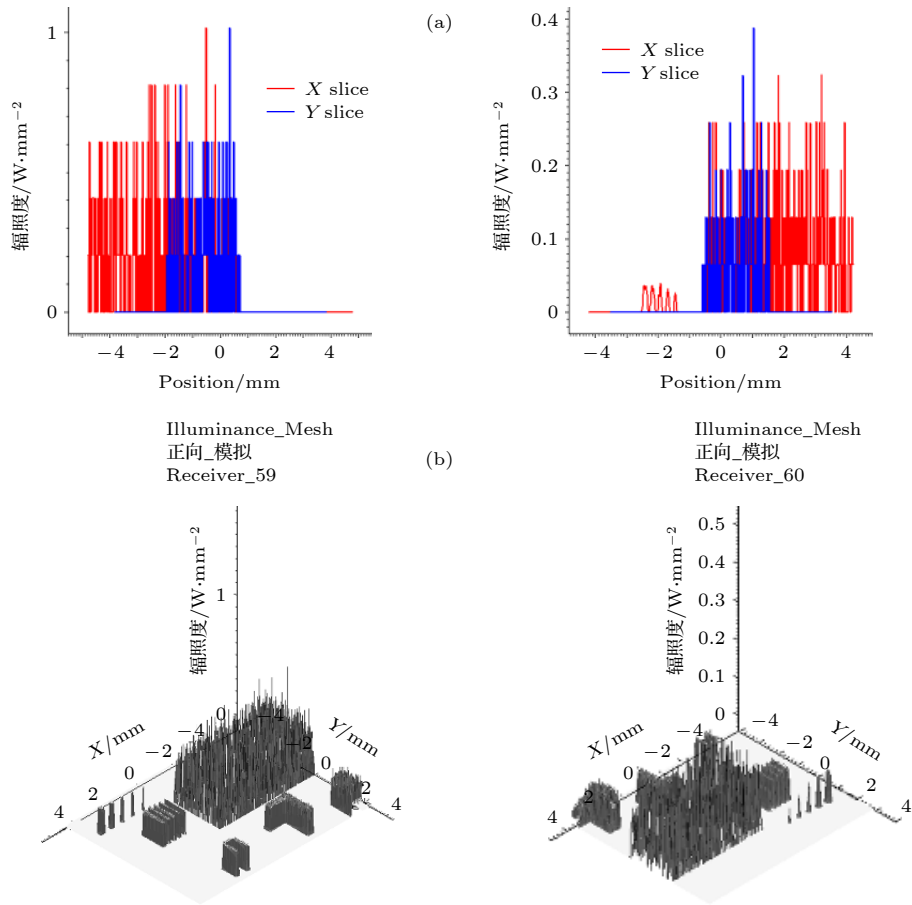


图 10 偏振成像激光雷达与短波红外长焦模式照度对比图 (a) 成像表面照度; (b) 三维照度对比图

Fig. 10. Contrast chart of the polarization imaging LiDAR and short-wave infrared long-focus mode imaging: (a) Surface illumination; (b) three-dimensional illumination.

将偏振成像激光雷达与短波红外长焦模式成像结果比较, 如图 10 所示, 偏振成像激光雷达接收照度值约为短波红外长焦模式下的 2.4 倍, 且偏振成像激光雷达整体能量分布更加均衡.

5 总结

本文针对基于偏振调制的非扫描型三维成像激光雷达存在需要双相机、成像视场角受电光晶体限制、成像质量易受到入射角度及云雾等大气条件的影响等缺点, 提出采用偏振成像激光雷达与短波红外变焦光学系统通过共孔径的方式, 来复合构建双模目标探测成像系统. 采用光学设计软件完成望远镜组、短波红外成像镜组、偏振调制镜组及系统整体光学设计, 并对完成系统像质分析, 可知所设计光学系统成像质量良好, 光学设计满足系统设计要求. 使用光学仿真软件对光学系统成像过程进行

仿真, 由结果可知偏振成像激光雷达及短波红外成像质量均较好, 杂散光对系统成像影响很小, 目标边缘成像清晰, 均能分辨直径 1 m 的独立正方形目标; 短波红外短焦模式视场范围为其长焦模式的 9 倍; 短波红外长焦模式与偏振成像激光雷达视场范围基本一致; 偏振成像激光雷达接收照度值约为短波红外长焦模式下的 2.4 倍, 且偏振成像激光雷达整体能量分布更加均衡, 成像效果更佳. 本文采用的方法为偏振调制成像激光雷达研究提供一种新思路, 下一步将完成实物加工装调, 选定合适目标开展实验研究.

参考文献

[1] Yan H M, Ni X X, Chen Q L, Lu Z K 2000 *Chin. J. Lasers* **27** 861 (in Chinese) [严惠民, 倪旭翔, 陈奇霖, 陆祖康 2000 *中国激光* **27** 861]
 [2] McManamon P F 2012 *Opt. Eng.* **51** 060901
 [3] Molebny V, Steinvall O 2014 *Proc. SPIE* **9080** 908002

- [4] Li B, Yu Y, Jiang S 2019 *Opto-Electronic Eng.* **46** 190167 (in Chinese) [刘博, 于洋, 姜朔 2019 *光电工程* **46** 190167]
- [5] Cao Q S 2016 *Infrared Laser Eng.* **45** 1003002 (in Chinese) [曹秋生 2016 *红外与激光工程* **45** 1003002]
- [6] Bu Y M, Du X P, Zeng C Y, Zhao J G, Song Y S 2018 *Chin. OPT.* **11** 711 (in Chinese) [卜禹铭, 杜小平, 曾朝阳, 赵继广, 宋一铄 2018 *中国光学* **11** 711]
- [7] Jiang K 2013 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [姜凯 2013 博士学位论文 (西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [8] Li R G, Zhang X D, Sun C F, Liu L, Li J Y, Wang C 2013 *Laser Infrared* **43** 128 (in Chinese) [李荣刚, 张兴德, 孙昌锋, 刘琳, 李江勇, 王诚 2013 *激光与红外* **43** 128]
- [9] Jia B, Cao G H, Lv Q Y, Ding H C 2016 *Infrared Laser Eng.* **46** 218001 (in Chinese) [贾冰, 曹国华, 吕琼莹, 丁红昌 2016 *红外与激光工程* **46** 218001]
- [10] Cong H J 2013 *M.S. Thesis* (Haerbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [丛海佳 2013 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [11] Jo S, Kong H J, Bang H 2016 *Opt. Express.* **24** A1580
- [12] Chen Z, Li B, Wang S J, Liu E H 2018 *Appl. Opt.* **57** 7750
- [13] Chen Z 2017 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Graduate School of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [陈臻 2017 博士学位论文 (成都: 中国科学院研究生院)]
- [14] Bai T Z, Jin W Q 2015 *Opto-electric Imaging Technology* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) pp48–52 (in Chinese) [白廷柱, 金伟其 2015 *光电成像原理与技术* (北京: 北京理工大学出版社) 第48—52页]
- [15] Xing Z C 2018 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [邢振冲 2018 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [16] Chang J, Zhang X F, Zhang K, Niu Y J 2017 *Modern Reflective Zoom Optical System* (Beijing: National Defence Industry Press) pp6–10 (in Chinese) [常军, 张晓芳, 张柯, 牛亚军 2017 *现代反射变焦光学系统* (北京: 国防工业出版社) 第6—10页]
- [17] Pang W B, Chen Z F, Li X T, Qian W, Shang H B, Xu W C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234202 (in Chinese) [庞武斌, 岑兆丰, 李晓彤, 钱炜, 尚红波, 许伟才 2012 *物理学报* **61** 234202]
- [18] Li L, Huang Y F, Wang Y T 2015 *Modern Methods of Optical Design* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) pp61–65 (in Chinese) [李林, 黄一帆, 王涌天 2015 *现代光学设计方法* (北京: 北京理工大学出版社) 第61—65页]
- [19] Meng Q Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Haerbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [孟庆宇 2012 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [20] Yin Y L, Sun X B, Song M X, Chen W, Chen F N 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 024203 (in Chinese) [殷玉龙, 孙晓兵, 宋茂新, 陈卫, 陈斐楠 2019 *物理学报* **68** 024203]

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system*

Feng Shuai¹⁾ Chang Jun^{1)†} Hu Yao-Yao¹⁾ Wu Hao²⁾ Liu Xin¹⁾

1) (*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*96911 of PLA, Beijing 100011, China*)

(Received 15 June 2020; revised manuscript received 24 July 2020)

Abstract

The basic principle of three-dimensional (3D) imaging lidar—an active imaging technology, is parallel laser ranging. Compared with traditional passive sensor imaging and microwave radar, the 3D imaging lidar has obvious advantages, so it promises to possess a wide application prospect. Non-scanning 3D imaging lidar has seven modulation modes. Among them, the 3D imaging lidar based on polarization modulation has the advantages of large measurement range, high measurement accuracy, fast imaging speed, and no motion artifacts. At the same time, it is not limited by other modulation methods, such as intensified charge coupled device and avalanche photodiode array detectors, and its process is complex but easy to saturate and damage. However, its disadvantage is that it requires two cameras, electro-optic crystal limits the imaging field of view, and is easily affected by atmospheric conditions such as incident angle and cloud and mist.

In order to overcome the above shortcomings, in this paper we propose to use polarization imaging lidar and short-wave infrared zoom optical system to construct a dual-mode target detection imaging system by means of common aperture, which can not only reduce the volume of the two systems and solve the coaxial problem of the two systems, but also solve the problems such as the influence of atmospheric conditions (small viewing angle, incident angle and cloud and mist) on imaging quality of polarization modulation imaging lidar and the limitation of low energy of short-wave infrared imaging targets. According to the above ideas, the design and research of polarization imaging lidar and shortwave infrared composite optical system are carried out. The optical design software is used to complete the optical design of the telescope group, shortwave infrared imaging lens group, polarization modulation lens group and the system as a whole. In the telescope group the off-axis three-mirror structure is used to solve the blocking problem of the center of the field of view, and in the shortwave infrared lens group the type of mobile zoom compensation group is used to realize zooming. Analysis of the image quality of the optical system shows that the designed optical system has high imaging quality and its optical design meets the requirements for system design. The optical simulation software is used to simulate the imaging process of the optical system. The results show below. The polarization imaging lidar and shortwave infrared imaging have high quality, the stray light has little influence on the imaging of the system, the target edge imaging is clear, and the independent square targets with a 1-m in diameter can be distinguished. The field of view of the short-wave infrared short-focus mode is 9 times that of the long-focus mode. The shortwave infrared telescopic mode is basically consistent with the field of view of polarization imaging lidar. The received illuminance value of polarization imaging lidar is about 2.4 times that of short-wave infrared long focal length mode. The overall energy distribution of polarization imaging lidar is more balanced, and the imaging effect is better. The method adopted in this paper provides a new idea for studying the polarization modulated imaging lidar. The next step in experimental research is to complete the physical processing, assembly and adjustment, and selection of suitable targets.

Keywords: three-dimensional imaging, lidar, polarization, short wave infrared, optical design

PACS: 42.15.Eq, 42.60.-v

DOI: [10.7498/aps.69.20200920](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61471039).

† Corresponding author. E-mail: optics_chang@126.com