

折反射共光路多谱段激光雷达光学系统设计

李晶^{1,2}, 车英¹, 王加安¹, 金美善², 栾爽²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²空军航空大学航空基础学院, 吉林 长春 130022

摘要 激光雷达不仅可用于分析目标光谱特性,还能够获取空间目标方位、距离、三维形貌及运动特征。常规激光雷达测量的目标特征单一,难以同时具备以上所有的探测能力。针对激光雷达的多种功能需求,设计了一种同时具备以上多种测量能力的激光雷达,采用发射/接收共光路系统结构形式,极大地简化了光学系统结构,光学系统为特殊的折反射结构,在仅使用两种光学材料的情况下即可实现 400~1400 nm 宽波段的发射与接收。为实现多谱段探测,激光光源采用光参量振荡器单脉冲可调谐激光器,光谱调节范围覆盖整个探测波段。激光发射系统的激光等效扩束比达到 12.6,单色回波接收系统等效 F 数为 8,采用光电倍增管,20 μm 内的径向能量接近 100%。为满足对目标的跟踪与精细结构测量,在共光路的基础上,加入可见光接收系统,使多谱段激光雷达还具备可见光成像能力,可见光接收系统全视场为 1.6° ,所设计的调制传递函数在 $37 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处优于 0.5。系统各项设计指标满足探测需求。

关键词 遥感; 传感器; 共光路; 激光雷达; 光学系统设计; 可调谐激光器

中图分类号 E933.43

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0510008

Optical System Design for Multi-Spectral Laser Radar with Refraction and Reflection in Co-Path

Li Jing^{1,2}, Che Ying¹, Wang Jiaan¹, Jin Meishan², Luan Shuang²

¹College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Aviation Foundation College, Aviation University of Air Force, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Laser radar can be used not only to analyze the target spectral characteristics, but also to obtain the spatial orientation, distance, three-dimensional profile and movement characteristics of the target. The conventional lidars can only measure single characteristic of the target, thus it is difficult to obtain the above measurement features of the target at the same time. To meet the multi-functional requirements, such kind of lidar with the above measurement capabilities is designed. The structure of the optical system is greatly simplified by adopting transmitting/receiving common optical system. The optical system, with a special refraction /reflective structure, can achieve 400-1400 nm wide band transmission and reception by using two kinds of optical materials. To achieve multi-spectral detection, the laser light source uses an optical parametric oscillator single pulse tunable laser, of which spectral adjustment range covers the entire detection band. The equivalent beam expansion ratio of the laser emission system reaches 12.6, and the equivalent F number of monochrome echo receiving system is 8. The radial energy within 20 μm is close to 100% with the photomultiplier tube. In order to track and finely measure the structure of the target, a visible light receiving system is adopted to the common light path. Thus, the multi-spectral laser radar has visible light imaging capabilities. The full field of view of the visible light receiving system is 1.6° , and the designed modulation transfer function is better than 0.5 at $37 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$. The design parameters of the system meet the detection requirements.

Key words remote sensing; sensor; laser radar; co-path; optical system design; tunable laser

OCIS codes 280.3420; 280.4788; 220.2740

收稿日期: 2017-11-03; 收到修改稿日期: 2017-12-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11274053)

作者简介: 李晶(1981—),女,博士研究生,主要从事精密测量与仪器、激光雷达、光学设计等方面的研究。

E-mail: 568026388@qq.com

导师简介: 车英(1964—),男,博士,教授,主要从事精密测控方面的研究。E-mail: cheying@cust.edu.cn(通信联系人)

1 引言

从世界上第一台激光器诞生开始,人类对激光的应用研究从未止步。在引入雷达探测原理以后,激光雷达作为激光的应用方向之一,不仅可用于分析目标光谱特性,还能够获取空间目标方位、距离、三维形貌及运动特征^[1-6]。具体应用方向包括大气探测、目标跟踪、空间遥感、陆地三维形貌探测、激光测距等^[7-13]。国外,激光雷达一般采用发射激光与接收系统分析的方法。1974年,Hoge^[14]提出了卫星测量跟踪激光雷达,其中,发射系统与接收测量系统分离,发射系统采用红宝石激光器,接收测量系统采用TV相机与光放大管,构建了激光跟踪雷达的经典结构,但其发射与接收仅限于单个波段。即便如此,其光学系统也比较复杂,尤其是后端TV相机模块就使用了6块透镜。2015年,张欣婷等^[15]提出了激光雷达发射与接收共光路光学系统设计,系统采用透射结构,在单一波段(1550 nm)实现了2~18 m范围内的激光测距,其激光发射系统达到了8倍扩束比。该设计结构能够较好地解决共光路激光测试问题,但工作波段单一,无法满足光谱特征测试需求。

本文搭建了一种折反射共光路多谱段激光雷达,利用可调谐激光器作发射光源,在400~1400 nm波段范围内实现了目标光谱特性分析,具备目标方位获取、目标距离测量、三维形貌及运动特征信息提取的能力,在小型化、集成化的基础上,极大地提高了激光雷达的探测功能。

2 光学系统整体设计及指标分析

2.1 性能指标

多谱段激光雷达光学系统要求工作波段覆盖400~1400 nm,激光发射功率大于 $1 \text{ mW} \cdot \text{nm}^{-1}$,扩束比大于10,带宽优于0.5 nm,整个光谱调节范围内波长精度优于0.2 nm。多谱段激光雷达还需具备可见光跟瞄能力,可见光相机视场(FOV)大于 1.6° ,角分辨率优于0.013 mrad。为保证接收系统探测能力,接收系统 F 数小于10。综合以上因素、市售探测器尺寸,以及光学系统设计经验,激光雷达光学指标如表1所示。

2.2 光学系统

一般情况下,激光雷达发射系统与接收系统分离,各用一套光学系统。美国AN/FPQ-6雷达在地面测量跟踪卫星时就采用了这种技术,激光扩束采

表1 激光雷达参数

Table 1 Optical parameters of laser radar

Parameter	Value
Wavelength /nm	400-1400
F	8
FOV in visible spectrum range /($^\circ$)	1.6
Resolution /mrad	0.0135
Laser beam expanding ratio	12.6
Detection range/km	>10

用伽利略望远镜,回波接收系统采用折反射结构,20 cm口径光学系统即可实现1000 km目标的跟踪测量。为使系统实现小型化、集约化,设计方案采用折反射共光路技术,实现激光扩束与接收一体化设计,在共用一套望远系统的条件下,既满足激光扩束与激光接收,也能满足可见光相机跟踪目标的需求,实现集约化光学系统整体设计。折反系统能够极大地降低光学系统的光学元件数量,系统设计方案利用卡塞格林R-C结构复杂化与多重结构共同优化设计,完成发射系统与接收系统的共光路结构。为避免中心遮拦对激光发射系统造成能量损失与光束遮挡,激光发射系统采用了偏轴应用。

2.3 激光光源

考虑到能量输出需求较高,经过综合调研,激光光源采用OPOTEK公司355I-HE型可调谐激光器。它的主要特点是,较低的抽运强度使晶体和其他光学结构长期运行而不受损害,配合精密的光学框架和防尘设计,确保激光器参数输出的长期稳定性和可靠性。355I-HE型可调谐激光器输出光束直径3 mm,带宽满足0.5 nm要求,波长精度优于0.2 nm,工作波段分别为400~680,740~2200,400~1400 nm,最大输出功率可达 $6.5 \text{ mW} \cdot \text{nm}^{-1}$,最小输出功率可达 $1.5 \text{ mW} \cdot \text{nm}^{-1}$,除了在680~740 nm无输出光谱以外,基本满足整体性能指标要求。光参变振荡器(OPO)可调谐激光器可以用传统的多模Nd:YAG激光器作为抽运源以获得较高的转换效率,而不必使用TEM₀₀模或者单纵模(SLM)激光器作为抽运源,从而减少了运行和维护成本。同时,超紧凑的设计使系统的光学平台节省空间,容易与后续光学系统集成。355I-HE抽运光源输出波长355 nm,脉冲周期7 ns。

2.4 探测器选择

根据指标要求,多谱段激光雷达光学系统探测器主要包括两个,一个是用于测量激光回波的灵敏度极高、动态范围较大的光电倍增管,另一个是用于跟踪测量的可见光CCD。

光电倍增管选择日本滨松公司的 R5503-43 型端窗探测器,光阴极材料为 InP/InGaAsP,工作波段范围 300~1400 nm,峰值波长位于 1300 nm,峰值量子效率达 20%,光阴极尺寸 3 mm×8 mm,倍增极数为 10 级,阴极电压 1750 V,平均阳极电流 0.002 mA,典型增益可达 10⁶,阳极暗电流 4 nA,上升时间响应达 3 ns,灵敏度及相应时间均适用于激光雷达探测。R5503-43 阳极暗电流 4 nA,倍增管放大倍率 1000000,光电倍增管响应度 10 mA·W⁻¹,激光器输出功率大于 1.5 mW·nm⁻¹,目标发射率按 0.2 计算,朗伯散射、10 km 作用距离下,可见光波段大气垂直向上透过率约为 0.5,光学系统透过率 0.2。经过计算,信噪比为 5 时,该探测器能够保证作用距离达到 10 km。

根据光学系统视场、*F* 数与分辨率需求,可见光 CCD 采用英国 EEV 公司货架产品 4240 型 CCD,像元尺寸 13.3 μm×13.3 μm,读出噪声 2e⁻¹,最大读出频率 5 MHz,满阱电荷 100 ke⁻¹,采用背照式结构设计,600 nm 处量子效率高达 90%,动态范围 50000:1,感光面尺寸 26 mm×26 mm,在视场达到 1.6°、焦距 1000 mm 的情况下,能够满足系统观测的角分辨率需求。

3 光学结构设计

3.1 设计结构的理论分析

折反系统像差计算较为复杂,为简化系统设计,并考虑到软件复杂化的强大设计能力,设计模型以两反系统为基础进行结构分析。根据两反光学系统像差理论可得^[16]:

$$S_I = \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\alpha(\beta-1)^3}{4} e_2^2 \right] - \frac{\beta^3}{4} (1-e_1^2), \quad (1)$$

$$S_{II} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[\frac{\alpha(\beta+1)^3}{4} - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta} \right] - \frac{1}{2}, \quad (2)$$

$$S_{III} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^2 \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta^2} - \frac{\alpha(\beta-1)^3}{4\beta^2} e_2^2 \right] - \frac{(1-\alpha)(\beta+1)(\beta-1)}{\alpha\beta} - \frac{\alpha\beta-\beta-1}{\alpha}, \quad (3)$$

$$S_{IV} = \beta - \frac{1+\beta}{\alpha}, \quad (4)$$

式中 α 表示次镜离主镜焦点的距离,决定次镜遮拦比, β 表示次镜放大倍率, e_1 为主镜偏心率, e_2 为次

镜偏心率。

可见光接收系统为有焦系统,激光扩束系统为无焦系统。

对于无焦系统,需满足 $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0$,

$$\begin{cases} \beta = \pm \infty \\ \alpha = -0.333. \\ e_1^2 = e_2^2 = 1 \end{cases} \quad (5)$$

根据计算结果,无焦系统两反射镜都是抛物镜,主镜为正光焦度,次镜为负光焦度,扩束比能达到 3 倍左右。如果想获得更高扩束比,需要更大结构,而且也不利于可见光接收系统的进一步复杂化设计。

R-C 结构为卡塞格林型等晕结构。对于 R-C 系统,只需满足 $S_I = S_{II} = 0$,

$$\begin{cases} e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2} \\ e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{(1-\alpha)} + (1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3} \end{cases} \quad (6)$$

R-C 结构简单,虽然不能达到光学系统的视场要求,但其结构简单,易于折反设计的复杂化。如果满足 $0 < \alpha < 1$,也就是次镜在主镜焦点之前, e_1^2 总是大于 1,为双曲面。 $|\beta|$ 越大, e_1^2 越接近 1,只要满足 $\beta < -1$,系统就属于卡塞格林型, e_2^2 也总大于 1,也为双曲面。对于 R-C 结构,主次镜均为双曲面。

利用 R-C 结构作为原始结构,对光学系统进行折反射复杂化设计,采用增加透射结构逐步撤销非球面系数。根据光学系统指标要求,采用多重结构优化方案,实现多谱段激光雷达的光学系统设计。

3.2 设计结果及分析

多谱段激光雷达包括激光发射系统、单色回波接收系统与可见光接收系统,共用同一套望远系统主体,采用分束镜对后端各单元进行分光处理。激光发射系统如图 1 所示,该系统相当于扩束器,将 3 mm 激光光束扩束成 38 mm 直径的光束。为避免望远系统中心位置遮挡,激光光源离轴使用。望远系统主体部分由主镜与次镜构成,主镜与次镜均为折反射结构,这种主体结构由于采用了折反射镜体,色差相对较小,也能够适用于宽波段矫正像差。发射系统的望远系统主体部分与后端镜组之间是分束棱镜,该分束镜主要用于剥离发射系统与接收系统,棱镜中间镀 400~1400 nm 的半反半透膜。扩束系统属于无焦光学系统,点列图与调制传递函数(MTF)不能反映其像差情况,可对系统进行波前分析,系统波像差结果如图 2 所示。波前峰谷(PV)值

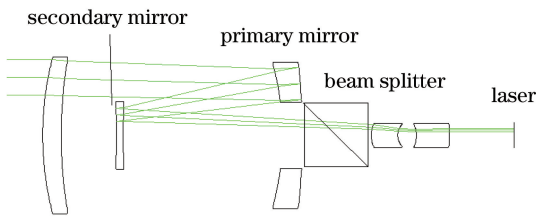


图 1 激光发射系统

Fig. 1 Laser transmitter system

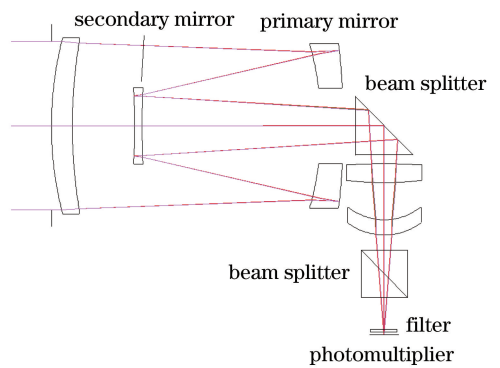


图 4 单色回波接收系统

Fig. 4 Monochrome echo receiving system

间可以对目标直接测量,在日间光照条件下,须过滤掉带外杂光,在光电倍增管前引入特定波段的带通滤波片,根据可调谐激光器的输出波段选择响应的接收滤波片。滤波片基底材料选用熔石英,夜间应用时直接用等厚的未镀膜的熔石英平板补偿像差,由滤波片轮来实现各石英平板切换。

可见光相机接收系统的 MTF 截图如图 5 所示。

CCD 像元尺寸 $13.5 \mu\text{m}$, 对应奈奎斯特频率约为 $37 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$, 该频率下光学系统的设计 MTF 已经达到 0.5, 满足成像应用需求。图 6 为光学系统点列图, RMS 为均方根值, 各视场光斑平均半径优于 0.013 mm 。光学系统径向能量分析如图 7 所示, $16 \mu\text{m}$ 内的径向能量达到 82%, 满足成像系统两个像元尺寸占 80% 能量的需求。

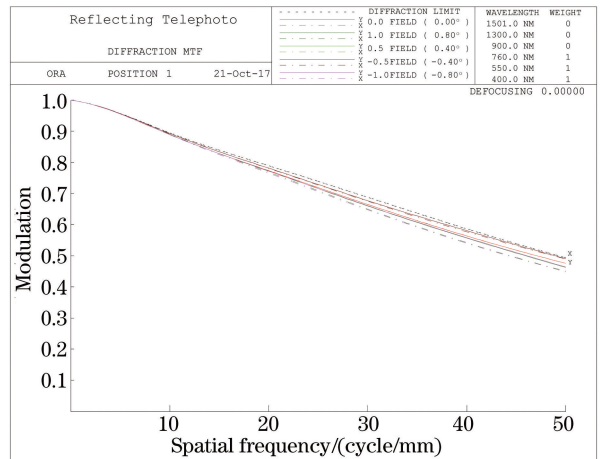


图 5 可见光接收系统 MTF

Fig. 5 MTF of visible light receiving system

光电倍增管探测器属于非成像系统,因此对成像质量的要求较低,主要考查径向能量。其径向能量分析如图 8 所示。在 0.05° 视场范围内, $20 \mu\text{m}$ 内的径向能量接近 100%, 完全满足探测需求。

对以上各光学系统进行合成,系统总体结构如

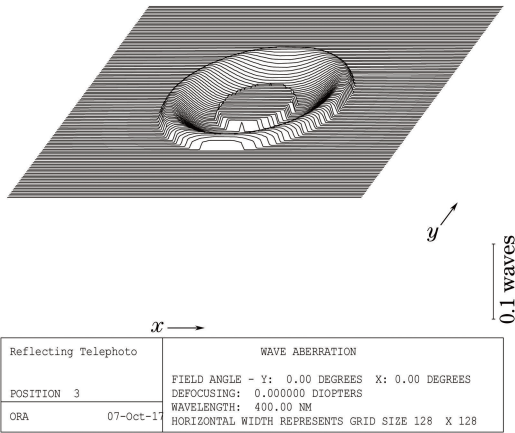


图 2 激光发射系统波像差

Fig. 2 Wave aberration of laser ablation system

已经优于 0.1λ , 光学系统性能良好, 满足应用需求。

接收系统由分束器分光后再次分成两路: 一部分接可见光探测器 CCD, 构成可见光接收系统; 另一部分接光电倍增管探测器, 构成单色回波接收系统。两个系统分别如图 3 与图 4 所示。表 1 已经列举了部分光学系统指标, 此处不再赘述。光学系统入瞳尺寸为 160 mm 。为实现光学系统在 $400 \sim 1400 \text{ nm}$ 宽波段的矫正色差, 而同一种光学材料无法实现很高的成像质量, 因此, 系统采用了两种光学材料, 一种是熔石英, 另外一种是 CaF_2 。考虑到 CaF_2 材料较软、加工相对困难、容易潮解, 在光学系统中仅使用一块 CaF_2 透镜, 并且在应用时须镀防潮膜系, 以保证光学系统成像质量。接收系统在夜

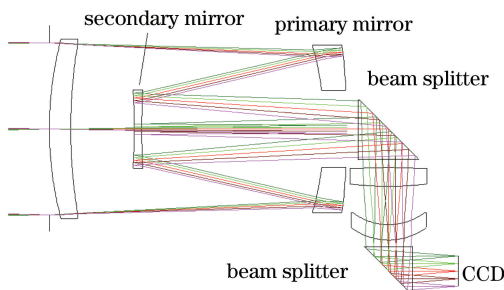


图 3 可见光接收系统

Fig. 3 Visible light receiving system

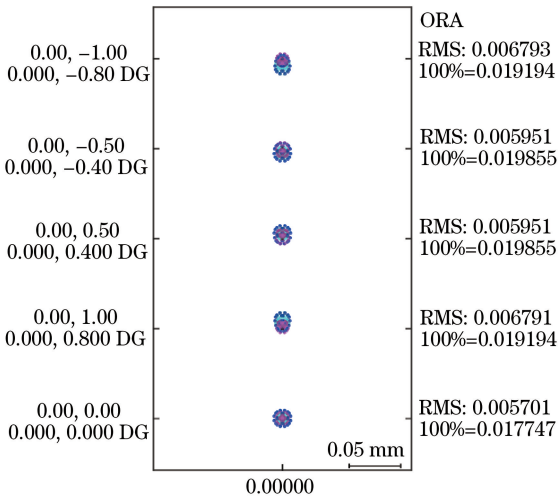


图 6 可见光接收系统点列图

Fig. 6 Spot diagram of visible light receiving system

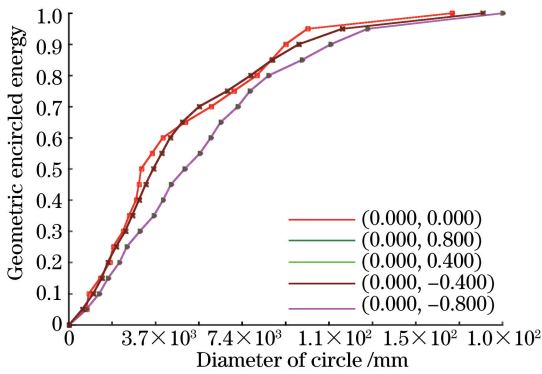


图 7 可见光接收系统径向能量

Fig. 7 Radial energy of visible light receiving system

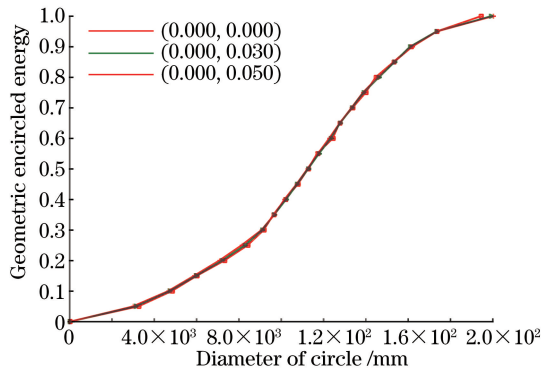


图 8 单色回波接收系统径向能量

Fig. 8 Radial energy of monochrome echo receiving system

图 9 所示。后端光学系统各部分分布较为合理，结构紧凑，实现了光学系统小型化与集约化。此外，整套光学系统均采用球面结构，也能够降低研制成本。

4 结 论

设计一种多用途激光雷达，采用发射/接收共光

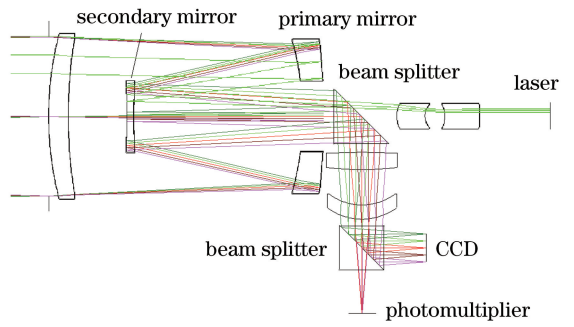


图 9 系统结构

Fig. 9 System structure

路结构形式，利用光学软件对多重结构进行仿真设计，简化了光学系统结构。光学系统主体部分为特殊的折反射结构，在使用两种光学材料的情况下即可实现 400~1400 nm 宽波段探测。其中，发射系统激光等效扩束比达到了 12.6，接收系统等效 F 数为 8。为满足对目标的跟踪与精细结构测量，在共光路的基础上，多谱段激光雷达还具备可见光成像的能力，全视场 1.6° 。为实现多谱段探测，激光光源采用 OPO 单脉冲可调谐激光器，光谱调节范围覆盖整个探测波段。可见光成像系统采用 EEV4240 CCD，像元尺寸 $13.3 \mu\text{m}$ ，系统设计 MTF 在 $37 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处达到 0.5。接收系统采用弱信号探测的光电倍增管， $20 \mu\text{m}$ 内的径向能量接近 100%，各项设计指标满足探测需求。

参 考 文 献

- [1] Johnson R E, Weiss P F. Laser tracking system with automatic reacquisition capability [J]. Applied Optics, 1968, 7(6): 1095-1102.
- [2] Cai Y Y, Sun D S, Xue X H, et al. Parameter design and performance analysis of lidar system for thermospheric helium [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0910001.
蔡云云, 孙东松, 薛向辉, 等. 热层氦激光雷达系统参数设计和性能分析 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0910001.
- [3] Lucy R F, Peters C J, McGann E J, et al. Precision laser automatic tracking system [J]. Applied Optics, 1966, 5(4): 517-524.
- [4] Anjum M R, Wang X W, Khanzada T J S, et al. Design of an optical emitting system for scannerless imaging LIDAR based on ZEMAX [J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2014, 12(6): 4825-4832.
- [5] Shao J F, Hua D X, Wang L, et al. Full-time lidar system for ultraviolet high spectral rayleigh

- temperature measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0601003.
- 邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 全天时紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统 [J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0601003.
- [6] Yang H Z, Zhao C M, Zhang H Y, *et al.* Design and optimization of all-fiber lidar transmitting and receiving optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106005.
- 杨宏志, 赵长明, 张海洋, 等. 全光纤激光雷达发射和接收光学系统设计与优化 [J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106005.
- [7] Liu J X, Ma Q, Yang Z H. Laser tracking system and its application in the development of spacecraft [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(3): 286-290.
- 刘建新, 马强, 杨再华. 激光跟踪测量系统及其在航天器研制中的应用 [J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(3): 286-290.
- [8] Zheng Y C, Zhao M J, Zhang W P, *et al.* Trend of laser radar technology development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(z3): 240-246.
- 郑永超, 赵铭军, 张文平, 等. 激光雷达技术及其发展动向 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(z3): 240-246.
- [9] Weibring P, Abrahamsson C, Sjöholm M, *et al.* Remote analysis of gas mixtures using an optical parametric oscillator based lidar system [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, IEEE*, 2003: 472.
- [10] Weibring P, Smith J N, Edner H, *et al.* Development and testing of a frequency-agile optical parametric oscillator system for differential absorption lidar [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(10): 4478-4484.
- [11] Koch B. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(6): 581-590.
- [12] Matthey R, Mitev V. Pseudo-random noise-continuous-wave laser radar for surface and cloud measurements [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2005, 43(3/4/5): 557-571.
- [13] Moryakov S I, Nesterov S M, Skorodumov I A. Ambiguity function of the radar signal in the synthesis of the 2D radar image of an aircraft [J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2012, 57(8): 775-782.
- [14] Hoge F E. Integrated laser/radar satellite ranging and tracking system [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(10): 2352-2358.
- [15] Zhang X T, An Z Y, Kang L. Design of 3D laser radar transmitting/receiving common path optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0618004.
- 张欣婷, 安志勇, 亢磊. 三维激光雷达发射/接收共光路光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0618004.
- [16] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 11-37.
- 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 11-37.