

星载激光雷达系统杂散光分析与抑制

穆永吉^{1,2}, 李蕊¹, 万渊¹, 刘继桥¹, 侯霞¹, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对全球范围 CO₂ 浓度和气溶胶检测的星载激光雷达系统的可行性进行研究。由于大气后向散射信号很弱, 故星载激光雷达对杂散光很敏感。激光雷达系统由 Ritchey-Chretien 接收望远镜、多波段中继光学系统以及光电探测系统构成, 因此, 相比于传统成像光学系统, 其杂散光的分析与抑制技术得到改进。对光机结构建模, 基于杂散光来源分类和大量光线追迹, 提出了一种位于激光雷达后光学系统中, 而非接收望远镜中的杂散光抑制方法。仿真结果表明, 位于后光学系统中准直器镜筒上的挡光环极大地抑制了杂散光。因此, 可以舍去接收望远镜上的挡光环。

关键词 光学设计; 杂散光抑制; 双向散射分布函数; 星载激光雷达

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0510005

Stray Light Analysis and Suppression for Spaceborne Lidar System

Mu Yongji^{1,2}, Li Rui¹, Wan Yuan¹, Liu Jiqiao¹, Hou Xia¹, Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The feasibility of a spaceborne lidar system for global CO₂ concentration and aerosol detection is studied. As the atmospheric backscatter signal is weak, the spaceborne lidar is very sensitive to stray light. The lidar system is composed of Ritchey-Chretien receiving telescopes, multi-band relay optical systems, and photodetection systems. Therefore, compared with conventional imaging optical systems, the analysis and suppression of stray light of the lidar system can be improved. Based on the modeling of opto-mechanical structures and the classification of stray light sources and a large number of ray traces, a stray light suppression method is proposed in the laser lidar rear-optical system rather than in the receiving telescope. The simulation results show that the baffles in the collimator lens barrels in rear-optical system largely suppresses the stray light. Therefore, the baffles in the receiving telescope should be removed.

Key words optical design; stray light suppression; bidirectional scattering distribution function; spaceborne lidar

OCIS codes 220.4298; 290.2648; 290.1483; 010.3640

1 引言

激光雷达利用激光与大气分子的相互作用, 可实现多种大气参量的测量^[1-3]。因大气分子与气溶胶分子对 532 nm 激光频谱会产生不同程度的频谱展宽及后向散射, 基于高分辨率光谱的测量原理^[4], 在研的大气激光雷达系统将在全球范围内探测大气

气溶胶。其探测器采用光电倍增管(PMT), 由于大气后向散射信号很弱, 星载大气激光雷达对杂散光很敏感。信号功率位于 0.03 nW 至 1 nW 之间, 而每个回波信号的信噪比接近于 1。因此, 分析和抑制星载激光雷达系统中的杂散光对提高仪器的测量精度至关重要。

与成像光学系统相比, 由于所探测的原理及方

收稿日期: 2017-11-13; 收到修改稿日期: 2017-12-12

作者简介: 穆永吉(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: mu_yongji@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光遥感与空间激光器技术方面的研究。

E-mail: wbchen@siom.ac.cn

法不同,在仪器设计过程中采用的评价标准也不同。激光雷达接收系统用于收集不同目标(如气溶胶、云层和地球表面)后向散射的激光能量,根据目标与探测激光的物理作用原理,从所探测到的信号能量反演出目标的特征。成像光学系统的评价标准主要是基于像差的分析方法,如光线扇形图、点列斑半径和光学传递函数等;而激光雷达接收系统的评价标准主要是能量检测效率和信噪比。杂散光对激光雷达光学系统和成像光学系统的影响分别是降低信噪比和降低光照对比度,因此两类系统的杂散光分析过程中的评判标准也是不同的。

在大型激光雷达项目中,一般利用大型反射望远镜作为能量接收天线。尽管在成像领域对同类望远镜的杂散光分析和抑制已有较深入的研究^[5-11],但是在激光雷达领域,由于探测后光学系统的存在,

杂散光的抑制方法还有改进的空间。在深入分析星载激光雷达系统的杂散光问题之后,设计了一种新的位于后光学系统中的杂散光抑制挡光环,从而替代了位于接收望远镜中传统的杂散光遮光罩。

2 光机结构及杂散光来源分类

大气激光雷达接收系统由一个 Ritchey-Chretien 望远镜和后光学系统组成,其中后光学系统包括一个视场小孔光阑、消色差准直器和光电探测通道,如图 1(a)所示。雷达接收系统所能探测到的光能量由信号光与噪声光两部分构成,如图 1(b)。噪声光可分为接收视场内的背景辐射光与视场外杂散光。视场外的杂散光可通过直接入射与表面散射两种方式到达探测器;表面散射光可通过一次散射或多次散射被探测器探测到。

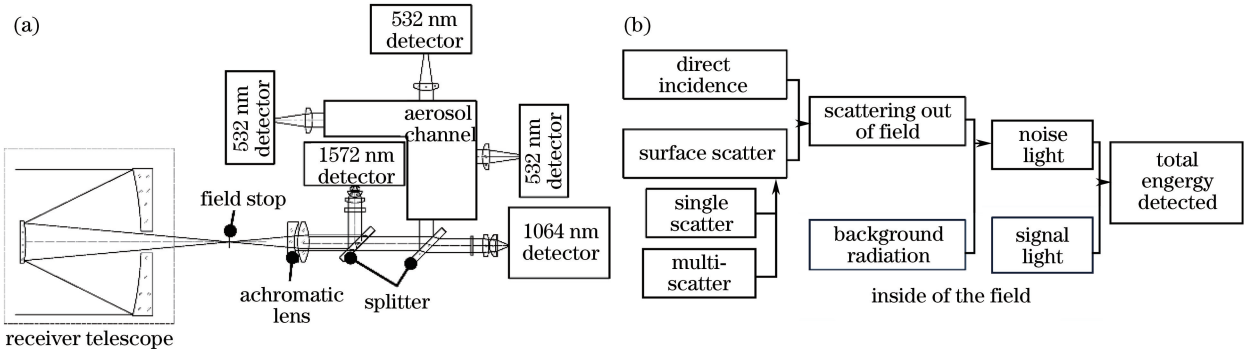


图 1 (a)星载激光雷达接收光学系统及(b)探测器接收能量分类

Fig. 1 (a) Spaceborne lidar receiver optical system and (b) detected energy classification of detector

图 2 为大气激光雷达的光机结构剖视图。在研大气激光雷达将运行在近极地的太阳同步轨道,当卫星进入或离开地球阴影区时,太阳光将以相对于光轴约 63° 的角度入射雷达接收系统。在工程设计

的前期阶段设置一个免受阳光辐射的前遮光罩,用于保护望远镜的次镜部件。但是,该遮光罩内侧一部分会被太阳光照射,并将光线散射到接收望远镜系统中。由于遮光罩在接收望远镜的探测视场之外,来自遮光罩的单次散射光将不会被任何探测器探测到。只有散射光被内部结构(如次镜支架或主镜遮光罩)再次散射才能到达探测器。前期设计的遮光罩内部还增加了一系列挡光环,以减少散射到内部结构的能量。

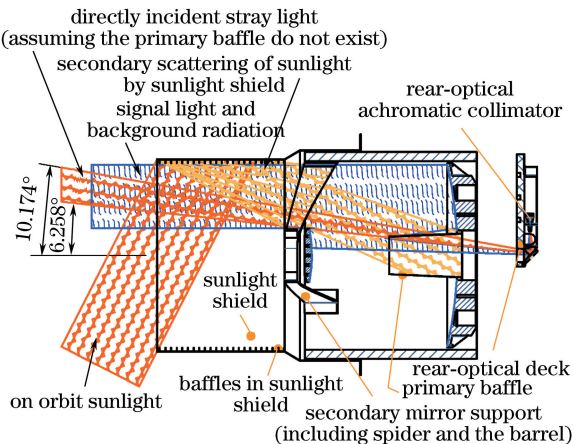


图 2 噪声光来源示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the source of noise

图 2 中还展示了当主镜遮光罩不存在时可能到达探测通道的锥形杂散光。外锥角为 10.174° ,由系统视场光阑的直径和后光学平台通孔的直径决定,分别为 1.2 mm 和 72 mm ,二者轴向距离为 204 mm ;内锥角为 6.285° ,由视场光阑直径和次镜外径决定,次镜外径为 296 mm ,二者间的距离为 1330 mm 。由于接收望远镜指向地表,锥形杂散光的来源即是地球和云层的反射。

另一种来源于地表或云层的杂散光是视场的背

景辐射。尽管激光雷达后光学器件包含可以抑制背景辐射的滤波器,但是在雷达系统工作波段中的辐射可以在任何情况下抵达探测器。此部分的噪声光可通过降低滤波器的带宽或接收望远镜的视场得到进一步抑制。

3 杂散光分析与抑制

接收望远镜的探测视场为 0.15 mrad,由位于消色差准直器焦点上的小孔光阑决定。消色差准直器将接收望远镜收集到的光场准直到发散角为 6 mrad 的准平面波并分离到每个探测通道内。由于系统的小接收视场及后光学系统中的准直操作,任何可以到达探测器的噪声光必须通过小孔光阑,并由消色差准直器进行准直。如图 2 所示,可以影响杂散光传播的系统结构有:1)前遮光罩及其内部的挡光环;2)次镜支撑结构(包括次镜支架即次镜支撑筒);3)光路中的通孔内壁,如光学平台通孔内壁等;4)主镜遮光罩;5)接收望远镜镜面的粗糙亚表面。

通过分析接收系统的几何布局,被前遮光罩内侧散射的光线可以通过以下方式到达探测器:1)被次镜支架再次散射,然后经主次镜多次反射或散射;2)被主镜遮光罩再次散射,然后被主次镜多次反射或散射;3)由主镜再次散射,然后被次镜反射或多次散射;4)被次镜支撑筒再次散射,然后在望远镜内部表面多次散射或镜面反射。

在气溶胶检测通道的 532 nm 工作波长中,太阳功率谱密度 $\omega(0.532) \approx 2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$,因此,前遮光罩的内部将受到的辐射功率为

$$P_s = \omega(0.532) \times \pi (D/2)^2 \times \Delta\lambda \times \cos 63^\circ \approx 0.025 \text{ W}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda = 30 \text{ pm}$ 为滤波器带宽; $D = 1 \text{ m}$ 为接收望远镜的口径。假设覆盖结构表面的涂覆层吸收率为 0.8,其余能量符合朗伯散射规律,则杂散光到达探测器之前最大散射次数为 $N_s = \log_{(1-0.8)}(0.03 \times 10^{-9}/2.5) \approx 16$ 。

利用光学软件 ZEMAX 来模拟能够影响杂散光传播的光机结构表面。将非光学表面的涂覆层设为朗伯散射物体,散射入射光能量的 20%。接收望远镜的主次镜的亚表面粗糙度所引起的散射,按照双向散射分布函数(BSDF)进行建模:

$$F_{\text{BSDF}}(|\sin \theta_s - \sin \theta_i|) = b_0 \left[1 + \left(\frac{|\sin \theta_s - \sin \theta_i|}{l} \right)^2 \right]^{s/2}, \quad (2)$$

式中: θ_i 与 θ_s 分别为入射光束在散射表面的入射角与反射角;而 b_0 、 l 和 s 为 3 个与加工指标参数中的有效表面粗糙度 σ_λ 相关的常量参数,即

$$b_0 = \frac{2\pi\Delta n^2 B^2}{\lambda^4} \frac{\sigma_\lambda(-c-2)}{1 - (1 + B^2/\lambda^2)^{(2+c)/2}}, \quad (3)$$

$$l = \frac{\lambda}{B}, \quad (4)$$

$$s = -c, \quad (5)$$

式中 B 和 c 为 BSDF 理论中 k 相关模型的常量参数^[12-13]; λ 为入射波长; Δn 为散射面前后介质的折射率差,对于反射面 $\Delta n = 2$ 。如前所述,任何可以到达探测器的噪声光都应该透过小孔光阑并被准直器准直,因此,在 ZEMAX 的光学模型中,在准直器之后设置宽度大于准直器口径的探测表面来检测噪声光。

如表 1 所示,构建了 5 种不同的光机结构模型,以便对不同的杂散光抑制策略进行深入的分析研究。模型 1 如图 3(a)所示,前遮光罩内挡光环与主镜遮光罩以及其他非光学表面的散射系数均设置为 0.2,接收望远镜的主次镜反射率设置为 0.95,无散射;模型 4 中除主次镜具有散射特性外,其他表面的散射特性均未考虑,目的是为了模拟仿直接收望远镜光学表面的散射影响;表中的“×”表示模型 1 至模型 4 中不包含消色差准直器内挡光环,而模型 5 则加入了在消色差准直器镜筒中设计的新挡光环结构并将该结构的散射系数也设置为 0.2,同时移除了位于接收望远镜中的主镜遮光罩及前遮光罩内的挡光环,并考虑接收望远镜主次镜的散射。消色差准直器内挡光环模型如图 3(b)所示,所设计的新挡板是通过几何结构分析得出的,目的是取代前遮光罩内的挡光环以及主镜遮光罩。

如图 4 所示,准直器透镜的通光口径大于信号光束直径,穿过小孔光阑的杂散光将在镜筒内壁产生多次散射光。点 A 为小孔结构的末端,镜筒内壁的散射亦从该点开始,点 O 为透镜有效口径;而虚线 OA 代表散射光能够通过透镜的范围。因此,在虚线 OA 与信号光边缘光线交点处设置挡光环 1,用于阻挡点 A 至挡光环 1 区间内镜筒内壁的散射光。同时,通过小孔结构末端的 O' 点与挡光环 1 边缘作虚线 $O'B$,交镜筒内壁于 B 点,则挡光环 1 与点 B 区间内镜筒内壁为阴影区,故不再产生杂散光。再作虚线 OB , OB 内部仍存在杂散光,因此在虚线 OB 与信号光边缘光线交点处设置挡光环 2。重复上述过程,阴影区域完全覆盖准直器镜筒内壁位置。最终设计的挡光环参数如图 5 所示。在杂散

表 1 不同策略下的杂散光分析模型

Table 1 Stray light analyzing models for different strategies

Including	Model No.				
	1	2	3	4	5
Baffles in front shield	0.2 scatter	Absorption	Absorption	Absorption	×
Primary mirror baffle	0.2 scatter	0.2 scatter	Absorption	Absorption	×
Baffles in achromatic lens barrel	×	×	×	×	0.2 scatter
Other non-optical surfaces	0.2 scatter	0.2 scatter	0.2 scatter	Absorption	0.2 scatter
Receiver telescope mirrors	Reflection	Reflection	Reflection	Reflection+0.001 scatter	Reflection+0.001 scatter

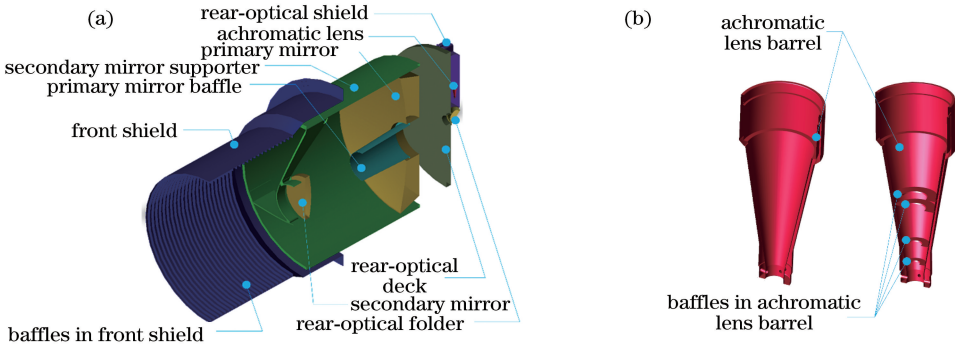


图 3 (a) 杂散光分析模型; (b) 消色差准直器内挡光环模型

Fig. 3 (a) Stray light analyzing model and (b) new baffles model in achromatic collimator barrel

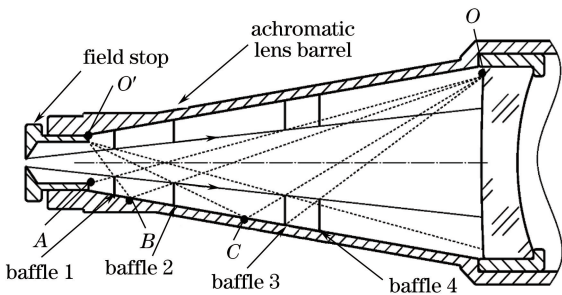


图 4 消色差准直器镜筒内挡光环设计方法

Fig. 4 Design method of the new baffles in achromatic collimator barrel

光分析模型 4 中, 散射表面仅包含接收望远镜的主次镜, 而其他表面均设定了完全吸收的属性, 其目的是根据 BSDF 模型模拟分析主次镜面的散射, 并且 BSDF 的模型中参数设定为: $\sigma_\lambda = 0.008 \mu\text{m}$, $B = 200 \mu\text{m}$ 以及 $c = -1.5$ 。模型 1~3 用于比较分析前遮光罩挡光环和主镜遮光罩对噪声光的贡献, 仿真结果如图 6 所示。

图 6(a)、(d)、(f) 为前 3 个模型的探测器所探测到的能量视图, 结果表明非光学表面散射的噪声光基本没有抵达探测器。比较图 6(b)、(d)、(f)、(g)

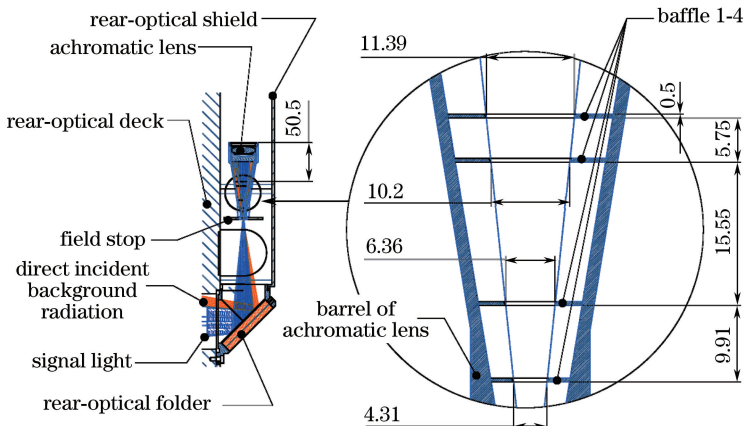


图 5 在消色差准直器镜筒内的挡光环

Fig. 5 New designed baffles in achromatic collimator barrel

可以看出,可以到达探测器的大部分噪声来自接收望远镜亚表面散射,而前遮光罩内挡光环与主镜遮光罩对杂散光的抑制几乎没有影响。图 6(a)、(c)、(e)表明,前遮光罩内挡光环的主要作用是减少传输到望远镜内的散射光。同时,主镜遮光罩 1 挡住了从望远镜中孔漏出的大部分散射光。虽然当不存在主镜遮光罩时,从主镜中孔向后漏出的杂散光远远

多于主镜遮光罩存在时漏出的杂散光,但由于入射角较大,所以此部分杂散光要么被后光学系统平台挡住,要么不能通过系统小孔光阑。因此,从抑制杂散光的作用来考虑,主镜遮光罩可以舍去。通过比较图 6(g)和 6(h),消色差准直镜筒中新设计的挡光环可有效地抑制系统杂散光,使噪声光功率从 1.22 pW 显著降低至 0.00656 pW。

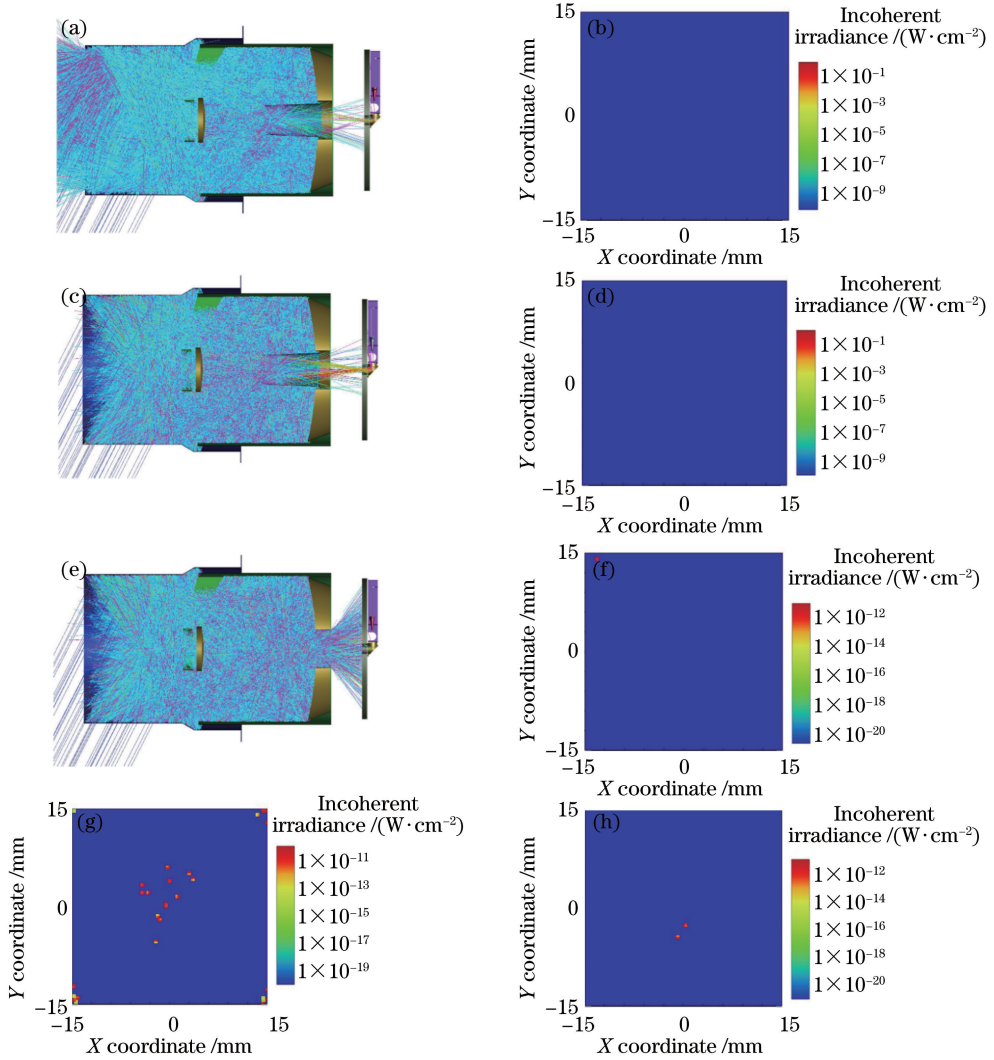


图 6 杂散光模拟结果。(a)、(c)、(e)分别是模型 1~3 的散射光线图;(b)、(d)、(f)分别是相应的探测器视图,均没有探测到达到阈值的噪声光。(g)模型 4 的探测器视图,被探测到的杂散光功率为 1.22 pW。(h)模型 5 的探测器视图,检测到的噪声光功率为 0.00656 pW

Fig. 6 Noise light simulation results. (a), (c) and (e) are the scattering ray plots of models 1, 2, 3, respectively; and (b), (d) and (f) are the detector views respectively. There is no stray light to the detectors. (g) is the detector view of telescope mirrors scattering simulation model. Detected noise light power is 1.22 pW. (h) is the detector view of new noise light suppression baffles model. Detected noise light power is 0.00656 pW

4 结 论

将可以到达探测器的噪声光来源分为直接入射的被地表及云层散射的光、前遮光罩内表面散射的

太阳光和视场中的背景辐射,对在研的星载大气激光雷达系统的杂散光进行模拟。被望远镜接收并且经过非光学表面多次散射后,噪声光的能量会很弱。另一方面,经过 ZEMAX 的仿真分析可知:能够到

达探测器的噪声光主要来自望远镜主次镜面的散射。在工程设计前期所设置的前遮光罩内挡光环及主镜遮光罩对杂散光的抑制作用较小。然而,新设计的位于消色差准直器中的挡光环则可以有效地抑制大部分杂散光。因此,大气激光雷达接收系统中的前遮光罩内挡光环及主镜遮光罩可舍去,从而简化设计。

参 考 文 献

- [1] Shen J, Cao N W. Measurement of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610003.
沈吉, 曹念文. 米-拉曼激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610003.
- [2] Zhang Y P, Liu D, Yang Y Y, *et al.* Spectrum filter performance analysis on near-infrared high-spectral-resolution lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0414004.
张与鹏, 刘东, 杨雨英, 等. 近红外高光谱分辨率激光雷达光谱滤波器性能分析[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0414004.
- [3] Zhang N N, Han Y L, Chen T D, *et al.* Design of direct detection doppler lidar with coherent light path[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1010005.
张楠楠, 韩於利, 陈廷娣, 等. 相干光路的直接探测多普勒激光雷达设计[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1010005.
- [4] Liu J T, Chen W B, Song X Q. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1548-1553.
刘金涛, 陈卫标, 宋小全. 基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1548-1553.
- [5] Du B, Li L, Huang Y. Stray light analysis of an on-axis three-reflection space optical system[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(6): 569-572.
- [6] Zhao Y C, Xu Y J, Sha W, *et al.* Stray light analyze and suppress of the space-borne infrared optical system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1016001.
赵宇宸, 许艳军, 沙巍, 等. 天基红外成像光学系统杂散光分析与抑制[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1016001.
- [7] Park J O, Jang W K, Kim S H, *et al.* Stray light analysis of high resolution camera for a low-earth-orbit satellite[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2011, 15(1): 52-55.
- [8] Zhu Y, Zhang X, Wu Y X, *et al.* Optical design and stray light analysis for ultraviolet board width off-axis four mirrors optical system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0216001.
朱杨, 张新, 伍雁雄, 等. 紫外宽幅离轴四反光学系统设计及其杂散光分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0216001.
- [9] Lin J C, Sun L W, Chen B Y, *et al.* Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0116001.
林剑春, 孙丽崑, 陈博洋, 等. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0116001.
- [10] Shi R, Zhou J, Ji Y, *et al.* Stray light analysis and baffle design of remote sensing camera for microsatellite[C] // Proceedings of SPIE, 2009, 7506: 75060T.
- [11] Sun C, Zhao F, Zhang Z. Stray light analysis of large aperture optical telescope using TracePro[C] // International Symposium on Optoelectronic Technology and Application: Imaging Spectroscopy and Telescopes and Large Optics, 2014, 9298: 92981F.
- [12] Fest E. Scattering from optical surface roughness and coatings[M/OL] // Stray light analysis and control, [S. l. : s. n.], 2013[2017-10-25]. <http://ebooks.spiedigitallibrary.org/book.aspx?bookid=553#>.
- [13] Dittman M G. K-correlation power spectral density and surface scatter model[C] // Proceedings of SPIE, 2006, 6291: 62910R.