

文章编号 2095-1531(2016)06-0663-08

激光准直系统中的杂散光分析与抑制

宋延嵩, 安岩*, 李欣航, 董科研, 姜会林
(长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:针对不同光学系统中存在的杂散光所造成的假信号或信号饱和影响, 本文结合像面照度分析和消光环抑制的方法, 对准直系统进行分析, 找到产生杂散光的主要原因, 设计了3种不同结构的消光环以消除杂散光。仿真实验结果确定了最优形式的消光环结构, 边缘杂散光抑制最大下限值为0.38%, 平均抑制值 $5.68 \times 10^{-4}\%$; 以此模型为基础, 进行了杂散光抑制实验。实验结果表明, 带有消光环结构的准直系统可以有效抑制杂散光, 保证了后续光学系统的功能实现, 对其他杂散光抑制系统具有借鉴作用。

关键词: 杂散光抑制; 像面照度分析; 消光环; 准直系统

中图分类号: O439 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20160906.0663

Analyzing and suppressing of stray light in laser collimating system

SONG Yan-song, AN Yan*, LI Xin-hang, DONG Ke-yan, JIANG Hui-lin
(*Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China*)
* Corresponding author, E-mail: anyan_7@126.com

Abstract: As for the negative influence of false signals and signal saturations caused by stray light in different optical systems, collimating system as an important subsystem is analyzed by combining the imaging illumination analysis and the extinction rings method, and the main causes of stray light are found out. Furthermore, three different structures of extinction rings are designed to eliminate the stray light. The optimal extinction rings structure is selected by a simulation experiment. Simulation results show that the largest degree of inhibition in the edge reaches 0.38% and the average degree of inhibition is $5.68 \times 10^{-4}\%$. The structure is actually manufactured and is tested by designed experiments. The result shows that stray light inhibition can be effectively realized in collimating system with optimal structure of the extinction ring. Therefore, this method has a reference value in other stray light suppression system.

Key words: stray light suppression; imaging illumination analysis; extinction ring; collimating system

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期: 2016-07-13

基金项目: 长春理工大学青年科学基金项目(No. XQNJJ-2013-12); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(吉教科合字[2016]第368号)

Supported by Young Science Foundation of CUST(No. XQNJJ-2013-12); The 13th Five-Year Plan Project of Jilin provincial Science and Technology Research(No. 2016368)

1 引言

杂散光是未按光学设计到达探测器上的光线,主要包括鬼像、一次散射光、直接照射光、多次散射光和边缘衍射光等。在各类光学系统中,关于杂散光的分析和抑制,一直是光学设计之后需要考虑的一项关键技术。

2006年,付跃刚等人分析了机载激光通信系统中的杂散光情况,包括内部收发光学系统的杂散光情况,并给出了相应的抑制措施^[1];2010年,李海燕等人讨论了激光探潜系统中的杂散光情况,并考虑了红外光学系统中镜筒和镜组的温度变化导致的杂散辐射能量影响^[2];2014年,胥全春等人分析了星地激光通信终端的杂散光情况,包括太阳背景辐射和地球背景辐射等,提出了消光环的具体设计方法,并进行了理论仿真与分析^[3];2015年,张欢等人分析了星敏光学系统中的杂散光情况,主要包括太阳直射光、月亮直射光和地气反射光等,并对系统进行建模分析,其抑制效果可以降低外界空间环境杂散光对星敏感器的影响^[4];2016年,豆修浔等人设计了手机镜头,利用光学 LightTools 软件和机械 SolidWorks 软件建立了完整的模型并进行了杂散光仿真与模拟,开展了实际的检测实验工作^[5]。

综上,不同光学设计领域均需要考虑杂散光的影响,其主要产生原因包括视场不匹配、孔径不匹配、机械外壳的表面散射、镜面产生的二次或多次反射等。常用的抑制方法有增加光阑、遮光罩、滤光片、消光环、消光漆和镀减反膜等。常用的杂散光评价函数包括点源透过率、杂散光系数、遮挡衰减、消光比和照度分析图等。不同抑制手段和评价函数的配合使用,不同设计背景下的搭配使用方式均不尽相同,杂散光的抑制手段和评价方式需要具体问题具体分析。结合上述方法,本文针对一种激光准直系统模型的杂散光进行分析,指出其产生原因,采用消光环方法并结合像面照度分析来抑制杂散光,实现准直系统中杂散光仿真与抑制^[6-19]。

2 杂散光建模与仿真

准直光学系统是一种常见的光学结构,它具有可靠性高、准直性高、体积小和结构简单等优点。在光纤作为光源的准直系统中,杂散光的影响是不容忽视的,与信号光能量同等量级的杂散光会造成虚假信号,混淆有用信号,致使系统分辨不清所需要的光信号,甚至造成信号饱和。由杂散光引入的虚假信号会导致激光模拟仿真失效。因此,在准直系统中对杂散光的分析与消除是必不可少的环节。准直光路系统是将光纤光源发出的光线进行准直,采用两片双凸透镜式设计,具体准直系统的指标参数如表1所示,对应的光学系统如图1所示。

表1 准直系统光学参数

Tab.1 Optical parameters of the collimating system

Index	Value
Object NA	0.22
Field/ μm	400
Wavelength/ μm	1.064
The interval between two lens/mm	59.27

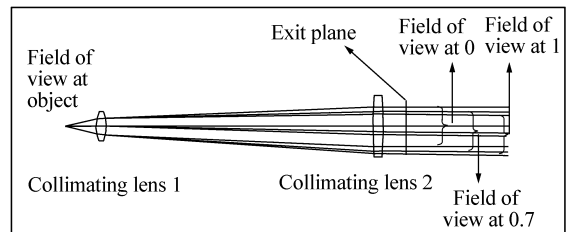


图1 准直系统光路仿真图

Fig.1 Light path simulation diagram of the collimating system

通过该系统产生杂散光主要有两种情况,一是光纤与准直系统光轴的失对称,当光纤端面与准直系统光轴产生垂直光轴方向的偏移,系统物方视场会变成失对称情况,一端视场的物高变大,另一端视场的物高变小;二是光线与准直镜筒的

口径不匹配,边缘视场光线发散角变大造成光束口径增加,大于该镜筒内壁口径的边缘光线会照射到镜筒内壁,产生反射或散射,进入到后续系统则会不可避免的成为杂散光,具体仿真分析情况如下。

(1) 光纤与准直镜筒的光轴失对准

在实际对准过程中,由于系统固有误差或器件之间的螺纹锁定结构未正确安装,会导致光纤端面与准直镜筒的偏心,进而造成两部件光轴失对准。此类失对准问题在偏差较小的情况下,会导致出射平面上所形成的光斑出现缺口并带有散射的小光斑,如图2所示。在偏差较大的情况下,像面光斑会出现大范围的缺口,如图3所示。

匹配会产生杂散光,若由物方视场光纤发出的光线经过准直镜1之后的光束高度大于镜筒内壁口径,便会带来光线被反射或散射的问题,产生杂散光的主要位置集中在准直镜1和准直镜2之间的筒壁。如图4所示。

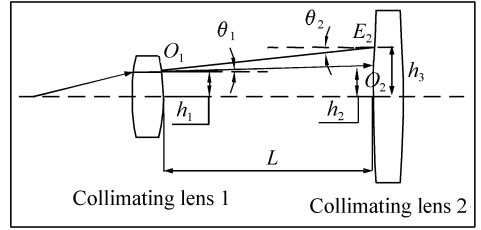


图4 准直镜光路图

Fig. 4 Light path diagram of collimating system

图4中,光线与准直镜1第二个面交点为 O_1 、 O_1 的垂轴高度为 h_1 ,光线与准直镜2第一面交点为 O_2 、 O_2 的垂轴高度为 h_2 ,镜筒内壁与透镜2的交点为 E_2 、 E_2 的垂轴高度为 h_3 ,即为镜筒内壁半径,其值为 $h_3 = 3 \text{ mm}$,两准直镜之间的间隔为 $L = 59.27 \text{ mm}$, θ_1 是不同物方视场下的光线出射角度, $\theta_1 \approx (h_2 - h_1)/L$, θ_2 是不同视场下的最大光线出射角度极限值, $\theta_2 \approx (h_3 - h_1)/L$ 。不同视场下,光线出射角度 θ_1 和出射角度极限值 θ_2 不同,当 $\theta_1 < \theta_2$ 时,光线全部进入准直镜2,当 $\theta_1 >$

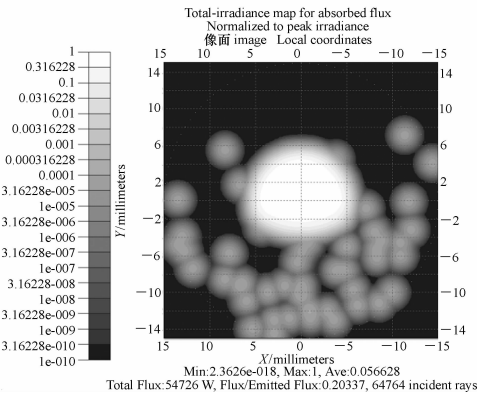


图2 小范围失对准像面仿真图

Fig. 2 Simulation image of small misalignments

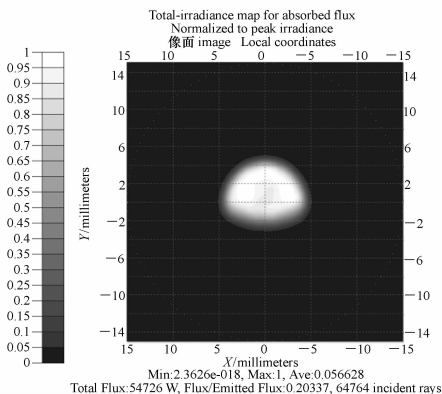


图3 大范围失对准像面仿真图

Fig. 3 Simulation image of large misalignments

(2) 光线与准直镜筒的口径不匹配

不同视场下的光束口径与镜筒内壁口径的不

表2 不同视场下的光束出射角度与极限角度

Tab. 2 Divergence angle and limit angle of exit rays at different fields

The normalized field of view	The divergence angle of exit rays $\theta_1/(\text{°})$	The limit angle of exit rays $\theta_2/(\text{°})$
0	0	2.89
0.202	0.59	2.42
0.404	1.15	1.93
0.45	1.27	1.72
0.5	1.39	1.60
0.52	1.45	1.54
0.53	1.47	1.48
0.54	1.49	1.46
0.55	1.52	1.47
0.602	1.62	1.44
0.8	2.02	0.97
1	2.28	0.45

θ_2 时,一部分光线会被镜筒壁遮挡,产生杂散光。为了得到不同视场下的杂散光情况,对归一化视场后的光线出射角度 θ_1 和出射角度极限值 θ_2 进行采样计算,具体情况如表 2 所示。

通过上表可知,归一化视场在 $0 \sim 0.53$ 之间,光线出射角度 θ_1 小于极限角度 θ_2 ,光线不受镜筒壁影响,经过准直镜 1 的光线可以直接进入到准直镜 2 中;归一化视场在 $0.54 \sim 1$ 之间,会有一部分光线照射到镜筒内壁,经过反射或散射后,进入到准直镜 2 中,形成杂散光。图 5 给出了最大视场下的光线光路示意图,水平虚线部分为未被遮挡时的光线走向,倾斜实线为由镜筒内壁、遮挡反射后进入到准直镜 2 的光线,即为口径不匹配导致的杂散光。

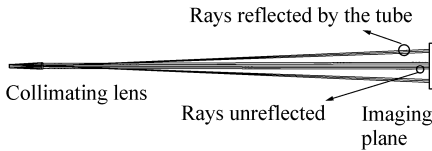


图 5 最大视场下的光线光路示意图

Fig. 5 Light path diagram at the maximum aperture

以此模型为基础,利用 Tracepro 软件进行仿真,得到像面处的照度仿真情况如图 6 所示,其中心光斑附近的外圆环即为由准直镜筒内壁反射后所形成的杂光光环。

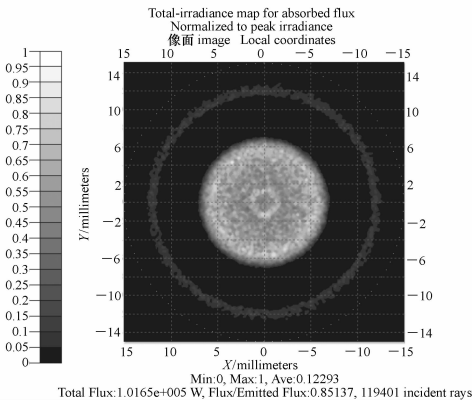


图 6 口径不匹配的杂散光像面仿真图

Fig. 6 Image plane simulation diagram of stray light caused by mismatching aperture

3 杂散光抑制仿真与实验验证

为了消除杂散光,避免因杂散光造成的假信号出现,准直镜筒结构的杂散光建模和消杂散光设计是关键环节。在消除杂散光设计中,通过引入消光环,使光线在环带之间的多次反射和散射,改变光线行进方向,避免其进入到后续光学系统。消光环结构形式不同,杂散光消除的效果不同。为实现良好的消除杂散光效果,本文设计了 3 种不同的消光环结构,在 SolidWorks 软件中进行建模,导入到 TracePro 软件中进行仿真模拟。以照度分析图作为杂散光的评价方式,进行理论分析并指导后续抑制实验。

3.1 消杂光仿真

在消除杂散光设计中,主要提出了 3 种消除杂散光结构方案:第一种消光环的局部形状为第一倾角为 30° 的直角三角形,简称 30° 直角消光环结构;第二种消光环的局部形状为 60° 角的全等三角形,简称 60° 全等消光环结构;第三种消光环的局部形状为第一倾角为 60° 的直角三角形,简称 60° 直角消光环结构,三者的深度均为 0.3 mm 。如图 7 所示。

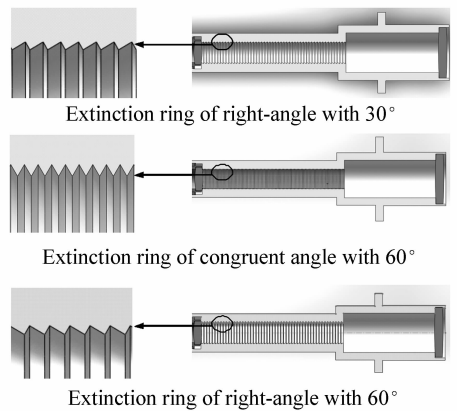
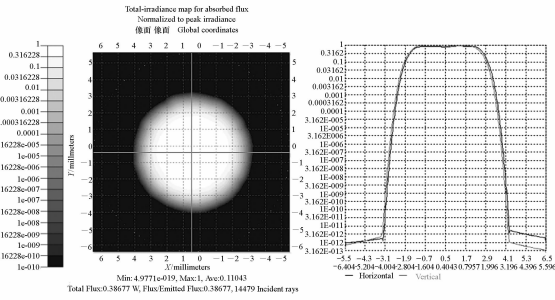


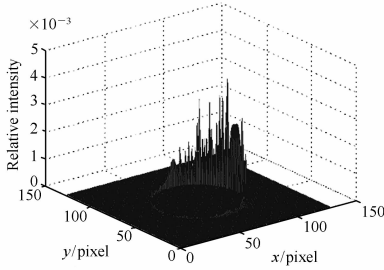
图 7 3 种消光环结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of three kinds of right-angle extinction rings

根据以上 3 种具体结构,利用 Tracepro 软件进行模拟,采用照度分析图的方法,进行杂散光抑制分析,即根据像面接收能量(像面所接收到的能量,扣除有效口径内能量后的剩余能量)情况



(a) 像面照度图
(a) Illumination diagram of image plane

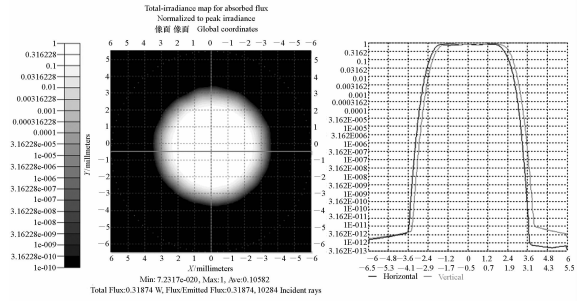


(b) 边缘位置光线抑制图
(b) Inhibition diagram of edge ray

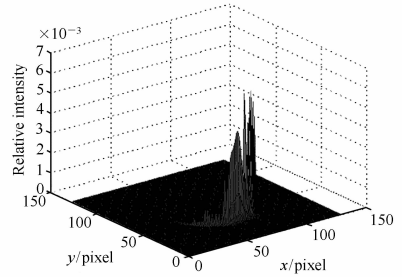
图 8 30°直角消光环结构

Fig. 8 Extinction ring structure of right-angle with 30°

越好。设定 3 种结构光源参数均相同,仿真结果如图 8 ~ 图 10 所示,包括像面照度图和边缘位置光线抑制图。



(a) 像面照度图
(a) Illumination diagram of image plane

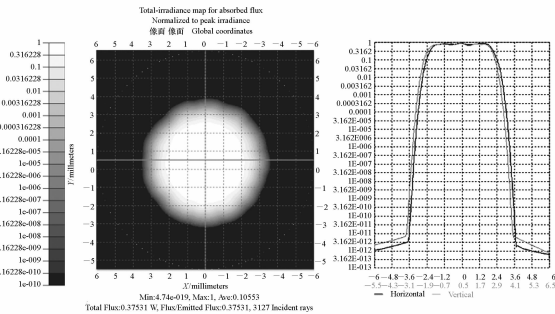


(b) 边缘位置光线抑制图
(b) Inhibition diagram of edge ray

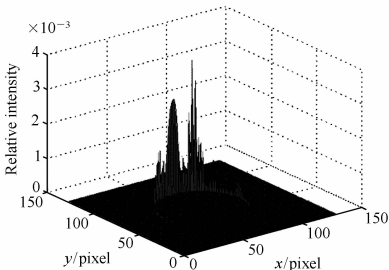
图 10 60°全等消光环结构

Fig. 10 Extinction ring of congruent angle with 60°

边缘光线抑制图中给出了边缘光线抑制情况,从上述仿真结果可以看出,3 种情况下的杂光抑制均能够实现出射光束口径 6 mm,但对于边缘光线的抑制能力,3 种结构不尽相同。用光线抑制值(像面接收的剩余能量值)衡量杂散光抑制



(a) 像面照度图
(a) Illumination diagram of image plane



(b) 边缘位置光线抑制图
(b) Inhibition diagram of edge ray

图 9 60°直角消光环结构

Fig. 9 Extinction ring structure of right-angle with 60°

表 3 3 种消光环结构抑制效果表

Tab.3 Suppression effect of three kinds of the extinction rings

No.	Name	Largest degree of inhibition of stray light/%	Average degree of inhibition of stray light/%
1	Extinction ring of right-angle with 30°	0.4	1.10×10^{-3}
2	Extinction ring of right-angle with 60°	0.38	5.68×10^{-4}
3	Extinction ring of congruent angle with 60°	0.63	1.49×10^{-3}

进行分析,所接收到的能量越少,杂散光抑制效果

情况。通过计算,3种结构的光线抑制最大下限值(剩余能量最小值)与光线抑制平均值如表3所示。

可以看出,相比于另外两种结构,60°直角消光环结构抑制效果最好,可以实现光线抑制最大下限值0.38%,光线平均抑制值 $5.68 \times 10^{-4}\%$ 。对于系统中杂散光线的抑制能力,第一次反射光线的接触面积越大,消杂光效果越好。60°直角消光环结构中,第一次光线反射接触面最大,60°全等消光环结构反射接触面最小。因此,60°全等消光环结构的抑制效果最差,60°直角消光环结构的边缘杂散光线抑制水平最好。

3.2 杂散光抑制实验

实验中采用光纤芯径为400 μm、NA为0.22,在光纤与准直系统光轴失对准的情况下,像面光斑边缘出现杂散光,如图11所示。

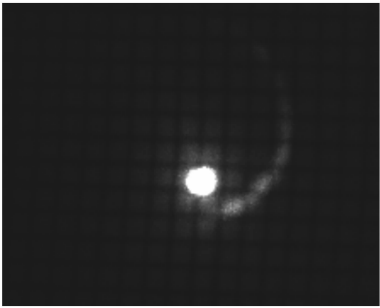


图11 失对准下的杂散光像面图

Fig. 11 Stray light image plane diagram at the condition of misalignments

一般情况下,可以通过精密调整与修正,实现光纤端面与准直镜筒的准确对准,避免两者非同轴引起的拦光。经过精密调整之后,在像面处所接收到的光斑情况如图12所示,除中心光斑外,在其外部部分会产生一个相对亮度较暗的光环,与前文分析中的情况一致。

根据仿真中最优的杂散光抑制情况,即60°直角消光环结构,对准直系统进行改进设计。同时,在准直镜筒内壁喷涂消光漆,做进一步消光处理,处理之后的抑制结果如图13所示。像面光斑边缘外的杂散光线消失,准直系统的杂散光得到了有效的抑制。

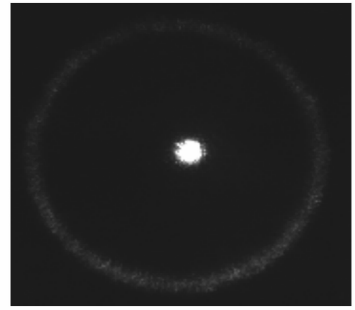


图12 口径不匹配下的杂散光像面图

Fig. 12 Stray light image plane diagram at the condition of mismatching aperture

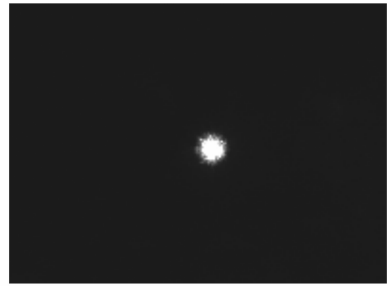


图13 杂散光抑制后像面图

Fig. 13 Image plane diagram after the stray light suppression

4 结 论

杂散光分析和抑制是光学设计过程重要的研究内容。本文在分析现有杂散光研究方法和抑制手段的基础上,以准直系统为研究对象,对其产生的杂散光问题,通过理论分析、软件仿真和实验抑制工作等方面进行验证。提出了3种消除杂散光的消光环方案,利用Tracepro软件,以像面照度图为分析依据,通过对比给出最优结构,60°直角的消光环方案,其光斑口径可以控制在6 mm,边缘杂散光线抑制下限值0.38%,平均抑制值 $5.68 \times 10^{-4}\%$;并按照此模型进行了实际的消光环加工实验,结果表明,准直系统的杂散光得到了有效地抑制,实现了良好的杂散光消除效果,该准直系统的杂散光处理方法对于其他光学系统的杂散光分析与抑制具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 付跃刚,刘志颖,张磊,等. 机载激光通信系统的杂散光分析[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):684-688.
FU Y G, LIU Z Y, ZANG L, et al. Analysis stray lights of airborne free space laser communication terminal[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, 27(6):684-688. (in Chinese)
- [2] 李海燕,胡云安,王连生. 激光探潜系统中杂散光抑制措施分析[J]. 海军航空工程学院学报,2010,25(6):653-656.
LI H Y, HU Y A, WANG L SH. Stray light suppression methods analysis for detecting submarine system by laser[J]. *J. Naval Aeronautical and Aeronautical University*, 2010, 25(6):653-656. (in Chinese)
- [3] 胥全春. 星载激光通信星上终端杂散光分析及抑制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
XU Q CH. Research and analysis on stray light and suppression methods of satellite terminal in satellite-to-ground laser communications[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2014:10-14. (in Chinese)
- [4] 张欢. 星敏感器光学系统设计及杂散光抑制技术的研究[D]. 西安:西安工业大学,2015.
ZHANG H. Design of optical system for star sensor and study on stray light suppressing technology[D]. Xi'an:XI'AN Technology University, 2015. (in Chinese)
- [5] 豆修浔,朱佳巍,丁桂林. 手机镜头的光学系统设计及杂散光模拟[J]. 激光技术,2016,40(4):501-504.
DOU X X, ZHU J W, DING G L. Design of optical system of mobile phone lens and simulation of stray light[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(4):501-504. (in Chinese)
- [6] 叶露. 准直物镜在变焦镜头杂散光系数测试中的作用和影响分析[J]. 应用光学,2010,31(1):83-86.
YE L. Using collimator in testing zoom lens stray light[J]. *J. Applied Optics*, 2010, 31(1):83-86. (in Chinese)
- [7] 李华,秦石乔,姚梅,等. 激光制导半实物仿真中弱激光能量测试和控制[J]. 光电子·激光,2009,20(3):394-377.
LI H, QING S Q, YAO M, et al. Test and model to extra laser energy in the lab on laser guided weapon simulation[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(3):394-377. (in Chinese)
- [8] 董科研,佟首峰,宋延嵩,等. 透射式激光目标半实物仿真系统研究[J]. 激光与红外,2012,42(6):609-612.
DONG K Y, TONG S F, SONG Y S, et al. Research on transmissive laser target hardware-in-the-loop simulation system [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(6):609-612. (in Chinese)
- [9] 张军强,吴清文,颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光检测技术[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(4):337-342.
ZHANG J Q, WU Q W, YAN CH X. Stray light measurement technologies for space-borne imaging spectrometer[J]. *Chinese J. Optics Applied Optics*, 2010, 3(4):337-342. (in Chinese)
- [10] 禹露,程德文,周伟,等. 硬性内窥镜光学系统的杂散光分析与抑制[J]. 光学精密工程,2014,22(3):525-530.
YU L, CHENG D W, ZHOU W, et al. Stray light analysis and suppression of rigid endoscope system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3):525-530. (in Chinese)
- [11] 舒星星,刘卫林. 可见光光学系统杂散光抑制[J]. 激光与光电子进展,2014,51:121101.
SHU X X, LIU W L. Suppression of stray light in visible light optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51:121101. (in Chinese)
- [12] 闫佩佩,李刚,刘凯,等. 不同结构地基光电探测系统的杂散光抑制[J]. 红外与激光工程,2015,44(3):917-922.
YAN P P, LI G, LIU K, et al. Stray light suppression of different ground-based photoelectric detection systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3):917-922. (in Chinese)
- [13] 赵飞,王森,邓超,等. 兴隆1 m 光学望远镜消杂散光系统[J]. 光学精密工程,2010,18(3):513-520.
ZHAO F, WANG S, DENG CH, et al. Stray light control lens for Xing Long 1-meter optical telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):513-520. (in Chinese)
- [14] 李岩,刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报,2013,33(9):0928002.
LI Y, LIU J F. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9):0928002. (in Chinese)
- [15] 陈万英,唐玉国,巴音贺希格,等. 微型平像场近红外光谱仪的消像散设计[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(3):263-267.

- CHEN W Y, TAN Y G, BAYANHESHING, *et al.*. Suppression of stray light in micro flat-field near-infrared spectrometer [J]. *Chinese J. Optics Applied Optics*, 2010, 3(3): 263-267. (in Chinese)
- [16] 程少园, 曹召良, 胡立发, 等. 消除角膜前表面反射杂散光方法的比较[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(3): 257-262.
- CHENG SH Y, CAO ZH L, HU L F, *et al.*. Elimination of stray light reflected from anterior surface of cornea [J]. *Chinese J. Optics Applied Optics*, 2010, 3(3): 257-262. (in Chinese)
- [17] SUN C M, ZHAO W, ZHANG Z. Stray light analysis of large aperture optical telescope using TracePro [J]. *SPIE*, 2014, 9298: 92981F.
- [18] LIU F, YAN L, YANG Z J, *et al.*. Stray light analysis and test of low-light-level panoramic imaging system [J]. *SPIE*, 2014, 9282: 92822T.
- [19] HUANG Z, BAI J, TIAN X L, *et al.*. Stray light analysis and suppression of panoramic annular lens [J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10810-10820.

作者简介:



宋延嵩 (1983—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 主要从事光电成像跟踪与空间激光通信方面的研究。E-mail: songyansong2006@126.com



安岩 (1986—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要从事光学系统设计、杂散光抑制与分析、光谱仪系统设计等方面的研究。E-mail: anyan_7@126.com