

文章编号 1004-924X(2017)06-1464-08

## 星敏感器遮光罩出口杂光的辐照度测试

陈 贇, 郑循江, 刘宗明\*, 杜 宣  
(上海航天控制技术研究所, 上海 200233)

**摘要:**面向星敏感器在轨应用时杂光抑制的迫切需求,开展了星敏感器遮光罩出口杂光辐照度分布定量测试。基于微型光纤光谱仪、二维高精度位移台以及太阳模拟器搭建了可逐点扫描的杂光测试平台,并将辐射测量软件与运动控制软件进行有效整合,开发系统集成测试软件,完成遮光罩出口杂光辐照度分布的实时定量测量。针对获取的不同光照入射角下遮光罩出口处的测量计数值,根据测量时设定的积分时间及保存的暗背景数据以及光谱仪定标数据计算获得遮光罩出口处的杂光辐照度分布。数据处理结果表明:遮光罩在出口处的杂光辐照度约为  $10^2$  W/cm<sup>2</sup>,而且分布不均匀。基于误差分析理论构建了测量误差模型,误差计算结果为 4.87%,表明了测量方案的合理性和可行性。测量数据可为星敏感器系统方案设计、论证、测试、定型及应用提供重要的技术支持。

**关键词:**星敏感器;遮光罩;杂散光抑制;照度分布;数据处理;误差分析

**中图分类号:** TB96; V557.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1464

## Testing of stray light irradiance at exit of lens hood for star sensor

CHEN Yun, ZHENG Xun-jiang, LIU Zong-ming\*, DU Xuan

(Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 200335, China)

\* Corresponding author, E-mail: zongmingliu@163.com

**Abstract:** Facing the urgent requirement of stray light suppression for the star sensor in orbit, stray light irradiance at the exit of the lens hood of a star sensor was determined quantitatively. Based on micro fiber optic spectrometer, two-dimensional high-precision displacement table and solar simulator, a stray light test platform which scans point-by-point was established. With the effective integration of radiation measurement software and motion control software, system integration test software was developed. Therefore, real-time quantitative measurement on irradiance distribution of the stray light at the exit of the lens hood was completed. Regarding of the measured values at the exit of the lens hood under different incident angles of irradiance, the irradiance distribution of the stray light at the exit of the lens hood was calculated according to the integration time set, dark background data and calibration data of spectrograph applied in the measurement. The data processing result shows: the irradiance of the stray light at the exit of the lens hood is about  $10^2$  W/cm<sup>2</sup> and it is distributed unevenly. Based on the error analysis theory, a measurement error model is built with a calculated error of 4.87%, which shows the reasonableness and feasibility of the measurement scheme. The measurement data can provide important technical support for design, demonstration, testing, shaping and application of the star sensor.

收稿日期:2016-12-05;修订日期:2016-12-30.

基金项目:上海市人才计划资助项目

**Key words:** star sensor; lens hood; stray light suppression; irradiance distribution; data processing; error analysis

## 1 引 言

随着航天事业的发展,星敏传感器在空间飞行器姿态确定方面的应用得到了世界各国的广泛关注。星敏传感器是以天球坐标系为参照系,以恒星为探测目标的高精度姿态测量仪器。它将瞬间视场中的若干恒星成像于光电探测器上,并基于模板图像,通过图像处理得出飞行器在空间惯性坐标的瞬间姿态误差,完成飞行器在空间惯性坐标系的姿态测量,从而为卫星、深空探测器等各类航天器提供高精度的姿态信息<sup>[1]</sup>。

星敏传感器属于弱光光电探测器,在轨工作时容易受到太阳光、地气光、月光等背景杂散光的干扰。这些杂散光会降低像面的对比度和调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF),使得整个像面的清晰度变差、彩色失真以及饱和度下降、层次减少、能量分布变得不规律,从而在像面形成斑点,严重时目标信号会完全被杂散辐射噪声所淹没<sup>[1]</sup>。由于在设计或加工时没有考虑杂散光的影响,许多光学系统的性能指标达不到要求,如欧盟的 Meteosat-5/7 系列成像仪、美国的 GOES-I/M,后者还曾经因为杂散光的影响而被迫暂时关机<sup>[2]</sup>。我国自行研制的地球同步轨道自旋稳定气象卫星风云二号 FY-2,它获取的各通道原始图像质量与国外同类卫星相当,但其目前观测的图像中存在着明显的杂散光,这成为制约其数据量化应用的瓶颈<sup>[3]</sup>。我国发射的某卫星,其星载相机的设计达到了性能要求,但是由于其杂散光抑制措施不完善,导致杂光比目标高两个数量级,目标像被杂散噪声淹没,在采用遮光罩消除杂光后才勉强可以工作<sup>[4]</sup>。

遮光罩在抑制杂光方面具有非常重要的作用,是目前应用最普遍的杂光抑制方法,承担着星敏传感器的杂散光抑制任务。在遮光罩杂光抑制性能评估方面,以往针对点源透过率 (Point Spread Transmittance, PST)、杂光分布系数 (VGDI) 开

展的仿真与测试工作较多,但还不足以全面评定遮光罩的杂光抑制水平。为了全面评估遮光罩的杂光抑制性能以及考虑到星图仿真的迫切需求,本文开展了星敏传感器遮光罩出口杂光辐照度分布测试方法的研究。星敏传感器遮光罩出口杂光辐照度分布的均匀性作为评定遮光罩杂光抑制性能的一项重要指标,目前关于这一指标的实验测量还未见报道,因此需要设计合理的遮光罩杂光抑制性能实验测量方案及平台,获取可靠的实验测试数据,从而为星敏传感器系统方案设计、论证、测试、定型及应用提供理论基础和技术方法<sup>[5-13]</sup>。

## 2 测试方案

不同光照入射角下遮光罩出光口的辐照度分布测量拟采用逐点扫描的测量方法,测量平台主要由光纤光谱仪、二维位移台以及太阳模拟器等组成。如图 1 所示,太阳模拟器发射的平行光入射到遮光罩的入光口,在遮光罩的出光口利用光纤光谱仪的光纤探头测量辐照度,光纤光谱仪的光纤探头安置在二维位移台上,通过二维位移台的水平与垂直运动实现遮光罩出光口不同位置处的辐照度测量。同时,遮光罩和二维位移台放置在精密电控转台上,转台可以在水平面做圆周运动,以测量不同入射角度下遮光罩出光口的辐照度分布。

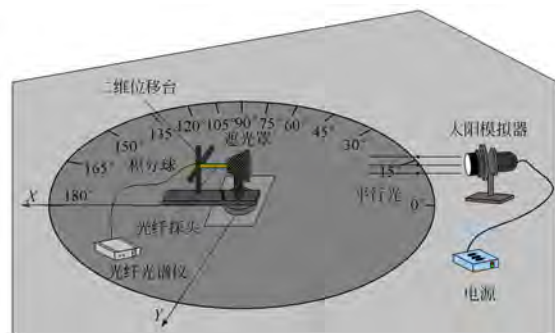


图 1 遮光罩出口杂光辐照度分布测量装置

Fig. 1 Measurement devices of stray light irradiance distribution at exit of hood

遮光罩出口杂光辐照度分布的均匀性是表征遮光罩杂光抑制能力的一个重要指标。该指标用于表征遮光罩的杂光抑制水平,并为遮光罩的产品定型提供可靠的实验数据。

### 3 测试设备

遮光罩出口辐照度分布测量设备主要包括照明系统、机械转角及位移系统、探测接收系统以及数据采集控制系统。

#### 3.1 照明系统

照明系统选用美国 Newport 公司最新生产的 Solar 3A 级太阳模拟器 94123A,实验过程中将太阳模拟器的能量调整为 1 个太阳常数,如图 2 所示。该太阳模拟器的光谱匹配度、辐照度均

匀性和时间稳定性均为 A 级,具体指标见表 1。太阳模拟器采用 1 600 W 短弧氙灯作为光源,出射光斑直径为 305 mm,光束准直度小于 $\pm 1^\circ$ 。



图 2 太阳模拟器

Fig. 2 Photo of solar simulator

表 1 太阳模拟器的性能指标

Tab. 1 Performance index of solar simulator

特性	Sol3A	IEC 6090-9 ED2	JIS	ASTM
		A 级	A 级	A 级
光谱匹配度	AAA 级	0.75%—1.25%	0.75%—1.25%	0.75%—1.25%
辐照度不均匀性	AAA 级	<2.0%	$\pm 2.0\%$	2.0%
时间不稳定性	AAA 级	<0.5%(短时间);<2.0%(长时间)	$\pm 1.0\%$	$\pm 2.0\%$

#### 3.2 机械转角及位移系统

##### 3.2.1 测量转角系统

测量转角系统由 MRS103 的精密电控转台和步进电机控制器组成。其中,精密电控转台如图 3 所示,其技术参数如表 2 所示。



图 3 精密电控转台

Fig. 3 Photo of precision electric control turntable

表 2 精密电控转台的技术参数

Tab. 2 Performance index of precision electric control turntable

技术参数	值
台面直径/mm	200
传动比	180 : 1
分辨率/ $^\circ$	0.002
重复定位精度/ $^\circ$	<0.004
最大速度/ $(^\circ \cdot s^{-1})$	25
步进电机	42

##### 3.2.2 测量位移系统

测量位移系统由精密型 ZH150-200H 电动二维组合位移台和 ZK200-Mpc08 运动控制器组成。其中,二维组合位移台如图 4 所示,其性能指标如表 3 所示。



图 4 二维组合位移台

Fig. 4 Photo of 2D combination displacement platform

表 3 二维组合位移台的性能指标

Tab. 3 Performance index of 2D combination displacement platform

技术参数	条件
有效行程/mm	200×200
驱动方式	高精度滚珠螺杆
导轨形式	高精度线性滑块导轨
限位开关	霍尔开关
单轴负载/kg	25
单轴速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	25
定位精度/ $\mu$ m	5

### 3.3 探测系统

探测系统选用 AvaSpec-2048×14 型高紫外灵敏度薄型背照式 CCD 光纤光谱仪,如图 5 所示。光谱仪包括光纤接头、准直镜、聚焦镜和衍射光栅,其测量波段为 200~1 160 nm。AvaSpec-2048×14 光谱仪的主要性能指标如表 4 所示。



图 5 AvaSpec-2048 光纤光谱仪

Fig. 5 Photo of AvaSpec-2048 optical fiber spectrometer

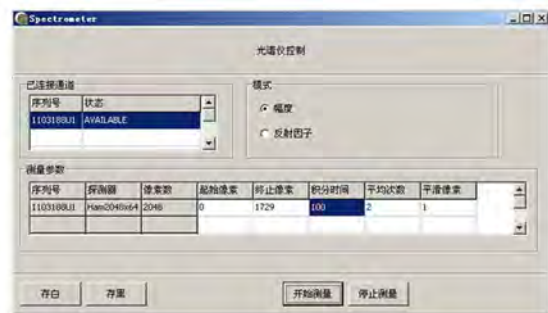
表 4 AvaSpec-2048×14 光谱仪的性能指标

Tab. 4 Performance index of AvaSpec-2048 optical fiber spectrometer

技术参数	条件
光学平台	对称式 Czerny-Turner 光路设计,75 mm 焦距
波长范围/nm	200-1160
分辨率/nm	2.4
杂散光	< 0.1%
灵敏度	16 000(16 位 AD 转换卡)
探测器	薄型背照式 CCD 面阵探测器,2048×14 个像素
信噪比	500 : 1
积分时间	2.24 ms~10 min

### 3.4 数据采集控制系统

为了提高数据采集的速度和精度,将光谱仪的辐射测量软件与旋转台及二维位移组合台的运动控制软件进行整合,通过软件集成实现计算机自动测量,数据采集与控制系统软件界面如图 6 所示。



(a) 光谱仪测量软件

(a) Measurement software of optical fiber spectrometer



(b) 位移台运动控制软件

(b) Motion control software of displacement platform

图 6 数据采集与控制系统软件界面

Fig. 6 Software interfaces of data acquisition and control system

## 4 实验结果

基于实验室搭建的测量平台对遮光罩的出口杂光的辐照度分布进行测量,遮光罩如图 7 所示。遮光罩出口杂光的辐照度分布测量实验如图 8 所示。由图 8 可知,当入射天顶角小于遮光罩保护角时,在遮光罩的出口处可以看到明亮的光斑;当入射天顶角大于遮光罩保护角时,遮光罩出口处的亮斑消失,充分验证了遮光罩保护角设计的合理性和重要性。



图 7 遮光罩实物图

Fig. 7 Physical map of lens hood



图 8 遮光罩出口辐照度分布实验测量图

Fig. 8 Experimental facilities for measuring irradiance distribution at exit of hood

在不同入射天顶角下对遮光罩出口的辐照度分布进行测量,每一入射天顶角下采集 10 000 个点的数据,建立一个遮光罩出口辐照度分布数据库。由于数据量庞大,本文仅列出保护角下的实验测量结果,即遮光罩在保护角下的光谱仪测量值,如表 5 所示。

表 5 入射天顶角为 30°遮光罩出口辐照度分布实验测量结果

Tab. 5 Measurement results of exit irradiance distribution of hood at 30° incident zenith angle

测量 波长 /nm	光谱仪数据采集结果				
	出口位 置坐标	出口位 置坐标	出口位 置坐标	出口位 置坐标	出口位 置坐标
	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm
	(20,20)	(19.6,20)	...	(-19.6,-20)	(-20,-20)
399.70	256.75	254.79	...	254.83	258.13
400.29	253.46	254.54	...	252.88	256.42
400.89	256.25	252.54	...	254.83	257.21
401.48	254.83	253.83	...	256.33	257.88
402.07	255.71	253.75	...	258.50	256.75
402.67	255.83	255.96	...	257.46	256.92
403.26	253.25	255.92	...	254.71	253.96
403.85	257.75	255.92	...	253.54	256.04
404.45	254.63	255.38	...	253.17	254.46
405.04	258.67	257.58	...	253.33	256.50
405.63	254.63	257.25	...	255.04	253.71
406.22	255.42	256.83	...	255.79	252.88
406.82	252.63	256.17	...	257.38	252.17
407.41	253.83	256.71	...	257.88	254.79
408.00	255.08	258.71	...	258.38	255.83
408.60	255.67	258.88	...	255.83	254.75
...	...	...	...	...	...
791.83	251.67	252.21	...	253.79	251.42
792.40	254.29	253.54	...	255.21	253.75
792.96	251.67	253.92	...	252.92	251.00
793.53	251.88	253.54	...	253.29	252.00
794.10	249.96	250.63	...	251.13	250.92
794.67	250.42	249.75	...	251.79	252.42
795.24	251.33	247.58	...	249.67	252.92
795.81	251.75	249.33	...	248.58	251.42
796.38	252.71	250.00	...	247.75	251.75
796.95	248.83	250.83	...	249.25	251.54
797.51	252.29	251.33	...	250.83	255.63
798.08	249.83	251.04	...	248.38	252.21
798.65	255.13	251.58	...	249.58	255.21
799.22	251.54	253.00	...	248.83	250.96
799.79	255.17	253.92	...	253.42	255.21
800.36	252.54	254.13	...	253.96	250.08

## 5 数据处理

### 5.1 处理方法

根据测量时设定的积分时间及保存的暗背景数据,利用实验测量获得的计数值及光谱仪定标

数据计算光谱辐照度,计算公式为:

$$E(\lambda) = \sigma \cdot \frac{S(i) - D(i)}{I(i)}, \quad (1)$$

式中:  $E(\lambda)$  为基于测量数据计算的光谱辐照度;  $\sigma$  为积分时间系数;  $S(i)$  为光谱仪实际测量的计数值;  $D(i)$  为测量前保存的暗背景数据;  $I(i)$  为光谱仪定标系数。

在可见光谱段 400~800 nm 对  $E(\lambda)$  做积分计算,得到测量点的辐照度值  $E$ ,即:

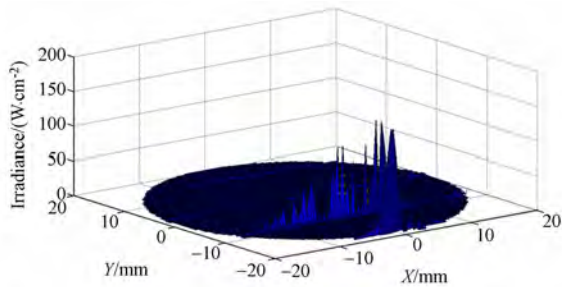
$$E = \int_{400}^{800} E(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

### 5.2 处理结果

#### 5.2.1 光谱数据

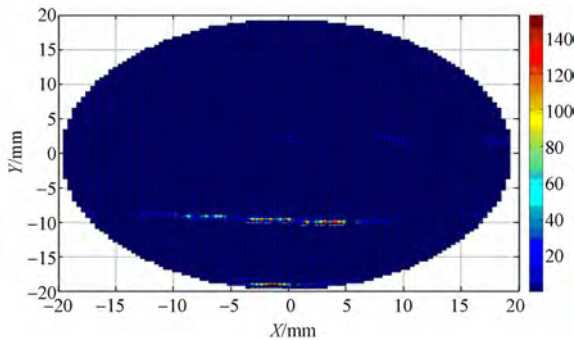
根据上述数据处理方法,基于光谱仪测量数据计算获得遮光罩在保护角下的出口辐射照度分布情况,如图 9 所示。其中,图 9(a) 是出口辐照度在三维空间的分布情况,  $X, Y$  轴代表遮光罩出口面任一点的位置,  $Z$  轴代表遮光罩的出口辐照度;图 9(b) 是辐照度分布在  $X-Y$  面的投影图;图 9(c) 是辐照度分布在  $X-Z$  面的投影图;图 9(d) 是辐照度分布在  $Y-Z$  面的投影图。

从遮光罩出口的辐照度分布测量数据的量级



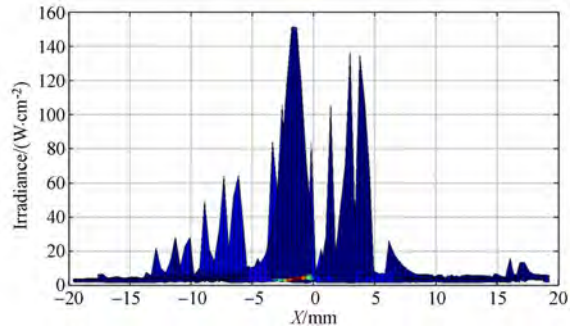
(a) 遮光罩出口的辐照度分布

(a) Irradiance distribution at exit of hood



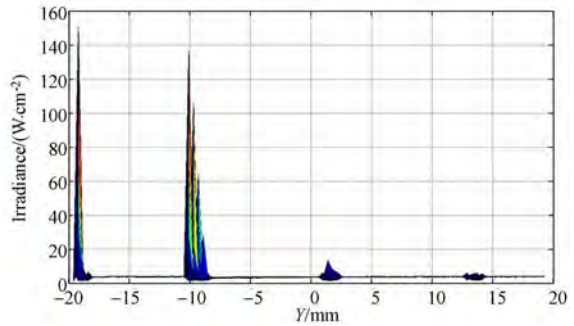
(b) 遮光罩出口辐照度分布在  $X-Y$  面的投影

(b)  $X-Y$  projection of irradiance distribution at exit of hood



(c) 遮光罩出口辐照度分布在  $X-Z$  面的投影

(c)  $X-Z$  projection of irradiance distribution at exit of hood



(d) 遮光罩出口辐照度分布在  $Y-Z$  面的投影

(d)  $Y-Z$  projection of irradiance distribution at exit of hood

图 9 入射天顶角 30° 时遮光罩出口的辐照度分布

Fig. 9 Irradiance distribution at exit of hood at 30° incident zenith angle

变化可知,当光照入射天顶角小于遮光罩保护角时,遮光罩出口的辐照度量级变化较大,约有两个量级的变化;当光照入射天顶角大于遮光罩保护角时,遮光罩出口的辐照度量级变化较小,均为同一数量级。另外,从遮光罩出口辐照度数据的分布情况可以看到,遮光罩在出口处的辐照度分布不均匀,且随着位置呈现周期性的变化趋势。

为了定量描述遮光罩出口的能量分布特征,进而科学评估遮光罩的杂光抑制性能,需要建立遮光罩出口能量分布数据的评定指标。结合遮光罩的杂光传输特性,本文采用能量集中度来表征遮光罩出口的杂光分布特性。

能量集中度表示在遮光罩出口处某一个确定大小的同心圆域  $S$  内的辐射通量占出口圆域  $S_0$  内总辐射通量的百分比。根据基本辐射理论,若遮光罩出口处的辐照度分布为  $E(x, y)$ ,则能量

集中度的定义式为:

$$\eta_k = \frac{\iint_S E(x, y) dx dy}{\iint_{S_0} E(x, y) dx dy} \quad (3)$$

若遮光罩出口半径为  $r_0$ , 选定的同心圆域半径为  $r$ , 根据能量集中度定义分析遮光罩出口的能量集中度与出口半径比  $r/r_0$  的关系, 如图 10 所示。从能量集中度的分析结果可以看到, 能量集中度呈抛物线的变化趋势, 由此表明能量分布变化相对稳定。

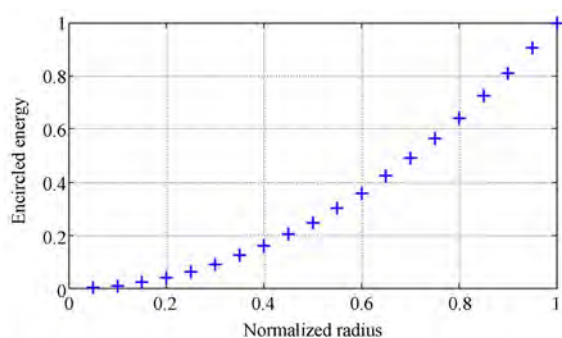


图 10 遮光罩出口能量集中度与出口半径比  $r/r_0$  的关系

Fig. 10 Relation between energy concentration at exit of hood and exit radius ratio  $r/r_0$

## 6 测量误差分析

本实验中的测量误差主要来源于测量设备、机械系统以及测量环境等, 具体可表示为:

$$\mu = \sqrt{\mu_{DE}^2 + \mu_{ME}^2 + \mu_{EN}^2}, \quad (4)$$

式中:  $\mu_{DE}$  为测量设备误差分量;  $\mu_{ME}$  为机械系统误差分量;  $\mu_{EN}$  为测量环境误差分量。

测量设备误差通常可表示为:

$$\mu_{DE}^2 = \mu_{ss}^2 + \mu_{de}^2, \quad (5)$$

式中:  $\mu_{ss}$  为光源准直性、稳定性与均匀性的合成误差, 本实验中为 2.4%;  $\mu_{de}^2$  为探测器准确性不稳定度, 其值为 2%。根据误差定义可知,  $\mu_{DE} = 3.12\%$ 。

机械系统误差通常可表示为:

$$\mu_{ME}^2 = \mu_{me}^2 + \mu_{dis}^2, \quad (6)$$

式中:  $\mu_{me}$  为三维转台的转角误差, 其值为 1%;  $\mu_{dis}$  为位移调节误差, 其值为 2%。根据误差定义得  $\mu_{ME} = 2.24\%$ 。

测量环境误差  $\mu_{EN}$  主要由背景环境中杂散光引起, 本实验中杂散光被控制在 3% 之内。

根据实验测量条件, 杂光定量测试的误差为:

$$\mu = \sqrt{\mu_{DE}^2 + \mu_{ME}^2 + \mu_{EN}^2} \approx 4.8\%.$$

即杂光定量测试误差小于 10%。

## 7 结 论

本文面向星敏感器系统方案设计、论证、测试、定型的实际应用需求, 开展了星敏感器遮光罩杂光抑制能力定量测试的研究。首先设计了逐点扫描的地面测量方案, 基于微型光纤光谱仪、二维高精度位移台以及太阳模拟器搭建了测试平台, 并将辐射测量软件与运动控制软件进行有效整合, 开发系统集成测试软件, 实时采集了遮光罩出口的能量分布数据。针对不同光照入射角下获取的遮光罩出口处的测量计数值, 根据测量时设定的积分时间及保存的暗背景数据以及光谱仪定标数据计算获得遮光罩出口处的辐照度分布。数据处理结果表明: 遮光罩在出口处的辐照度约为  $10^2 \text{ W/cm}^2$ , 且分布不均匀。最后, 基于误差分析理论构建了测量误差模型, 杂光测试的误差计算结果为 4.87%, 由此验证了测量方案的合理性和可行性。上述研究成果为下一代星敏感器产品的方案设计与优化提供了重要的理论依据和技术路径。

(in Chinese)

## 参考文献:

- [1] 岳涛, 李博, 陈晓丽, 等. 空间光学发展现状和未来发展[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 1-9.  
YUE T, LI B, CHEN X L, et al.. The current and future development of space optics[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 1-9.

- [2] 唐勇, 卢欣, 郝云彩. 星敏感器杂光抑制分析[J]. 航天控制, 2004, 22(3): 58-61.  
TANG Y, LU X, HAO Y C. Suppression and analysis of stray light in a star sensor[J]. *Aerospace Control*, 2004, 22(3): 58-61. (in Chinese)
- [3] PARK J O, JANG W K. 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.
- [4] 廖胜. 光学系统杂光抑制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
- LIAO SH. *Stray Light Suppression of the Optical System*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003. (in Chinese)
- [5] PFISTERER R N, ELLIS K S, POMPEA S M. The role of stray light modeling and analysis in telescope system engineering, performance assessment, and risk abatement [J]. *SPIE*, 2010, 7738: 773811.
- [6] 牛金星. 红外探测系统杂散辐射的分析与抑制技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2012.
- NIU J X. *Stray Radiation Analysis and Suppression of the Infrared Detection System*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [7] 安萌, 张健, 王啸虎, 等. 基于 STK 的星敏杂光抑制的仿真分析[J]. *战术导弹技术*, 2013(3): 59-66.
- AN M, ZHANG J, WANG X H, *et al.*. Simulation and analysis for the stray light suppressing based on STK[J]. *Tactical Missile Technology*, 2013(3): 59-66. (in Chinese)
- [8] FEST E. *Stray Light Analysis and Control*[M]. SPIE Press, 2013.
- [9] 伍雁雄, 张新, 张继真, 等. 星光折射自主导航星敏感器及光学系统设计研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0222001.
- WU Y X, ZHANG X, ZHANG J ZH, *et al.*. Research on the autonomous star sensor based on indirectly sensing horizon and its optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0222001. (in Chinese)
- [10] 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.
- LIN J CH, 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. (in Chinese)
- [11] PRAVDIVTSEV A V, AKRAM M N. Simulation and assessment of stray light effects in infrared cameras using non-sequential ray tracing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 306-311.
- [12] 高郭鹏. 双反射系统的杂散光抑制研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2009: 13.
- GAO G P. *Stray Light Suppression of Two-mirror System*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009: 13. (in Chinese)
- [13] 廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏感器反射式遮光罩设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 66-69.
- LIAO ZH B, FU R M, ZONG X Y. Design of specular baffle of star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 66-69. (in Chinese)

## 作者简介:



陈 贇 (1983—), 男, 江苏无锡人, 工程师, 2010 年于中国科学院光电研究院获得硕士学位, 主要从事高精度星敏感器技术方面的研究。E-mail: 47266135@qq.com

## 通讯作者:



刘宗明(1986—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 工程师, 2009 年于青岛大学获得学士学位, 2011 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要研究方向为机器视觉、嵌入式图像处理、光学测量敏感器设计与研制。E-mail: zongmingliu@163.com