

# 外部杂散光对风云三号晨昏轨道气象卫星中 微光成像仪的影响

陈海龙<sup>1</sup>, 陈林<sup>2,3</sup>, 胡秀清<sup>2,3</sup>, 黄一帆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

<sup>3</sup>中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

**摘要** 在介绍风云三号 E 星(FY3E)晨昏轨道气象卫星和微光成像仪特点的基础上,利用 Satellite Tool Kit 仿真技术并根据 FY3E 轨道参数,针对 FY3E 所搭载的遥感器(微光成像仪)可能受到来自太阳和月球的外部杂散光的情况进行模拟分析,并设计了遮光方法来抑制外部杂散光。分析结果表明,2006-12-18 当天太阳矢量与遥感器底部窗口法向量的夹角最小,遥感器受太阳杂散光的影响最大。进一步分析了遥感器可能受月球杂散光的影响,发现只要满足太阳遮挡条件,月球就不会对遥感器产生杂散光。因此,设计遮光板时只要考虑太阳矢量与遥感器窗口法向量的夹角即可。目前的遥感器视场角为 55°,遮挡杂散光的效率较低。将遥感器视场角减小到 50°,同时减小遮光板尺寸,可以提高对杂散光的遮挡效率且不影响其应用。

**关键词** 大气光学;晨昏轨道;杂散光;Satellite Tool Kit 仿真;微光成像仪;风云三号

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.050101

## Effect of External Stray Light on Low-Light Imager Loaded in Fengyun-3 Day/Night Orbit Meteorological Satellite

Chen Hailong<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>2,3</sup>, Hu Xiuqing<sup>2,3</sup>, Huang Yifan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup> National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,  
China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** Based on the introduction of the characteristics of Fengyun-3 E star (FY3E) day/night orbit meteorological satellite and low-light imager and according to FY3E orbit parameters, the Satellite Tool Kit (STK) simulation technology is used to simulate and analyze the external stray light, which comes from the sun and the moon and enters into the remote sensor (low-light imager) loaded in FY3E. The method of light shield is proposed to suppress the stray light. The results indicate that the stray light has the greatest impact on the remote sensor on 2016-12-18 when the angle between the sun vector and the normal vector of remote sensor bottom window is minimal. The effect of stray light caused by the moon on remote sensor is further analyzed, and it can be avoided when the sun shade condition is satisfied. Therefore, when we design the shade, the angle between the sun vector and the normal vector of remote sensor bottom window is only needed to consider. At present, the field-of-view of

**收稿日期:** 2016-11-29; **收到修改稿日期:** 2016-12-29

**基金项目:** 公益性行业(气象)科研专项风云三号晨昏轨道卫星资料处理和应用关键技术研究(201506074)、国家高科技研究发展计划(2015AA123704)

**作者简介:** 陈海龙(1994—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计、自由曲面面型的构建与描述方面的研究。

E-mail: chlazz@163.com

**导师简介:** 陈林(1981—),男,博士,副研究员,主要从事卫星资料辐射定标、预处理和气候变化应用方面的研究。

E-mail: chenlin@cma.gov.cn(通信联系人)

the remote sensor is  $55^\circ$ , and the efficiency of shading stray light is low. To improve the shading efficiency of stray light and not affect application, the field-of-view of the remote sensor should be reduced to  $50^\circ$  and the size of the light shield should be decreased.

**Key words** atmospheric optics; day/night orbit; stray light; Satellite Tool Kit simulation; low-light imager; Fengyun-3

**OCIS codes** 010.0280; 220.4830; 350.6090

## 1 引言

杂散光是指到达光学系统成像面的非成像光线,不利于光学系统成像,会直接降低成像面的对比度和信噪比,而且很可能在成像面上产生光斑,导致成像质量下降,在某些特殊的情况下甚至会导致系统失效<sup>[1]</sup>。因此,非常有必要分析杂散光对光学系统的影响。

星载传感器的杂散光主要有两个来源:1) 太阳、月球等自然光源直接射入观测传感器窗口;2) 在传感器设计过程中,传感器内部的组件(如光学透镜、反射镜和挡板等)对入射光的散射和衍射。传感器内部本身产生的杂散光是由于光线在光学系统的透射表面经过多次反射造成的,特别是在复杂光学系统对高亮目标成像的过程中,这种现象尤为严重,需要结合仪器的光学设计和光学部件来进行仿真模拟或者实际测试。此外,视场外的云、海洋耀斑等也会在晨昏探测器中产生很强的杂散光<sup>[2]</sup>。

目前我国风云三号(FY3)系列气象卫星都是上午和下午轨道气象卫星<sup>[3]</sup>,缺少一颗晨昏轨道气象卫星。为了弥补这一缺陷和响应世界气象组织的需求<sup>[4]</sup>,国家卫星气象中心的研究人员提出在地方时清晨 6:30 设置风云三号 E 星(FY3E)晨昏轨道气象卫星,并将微光成像仪作为其中的一个重要载荷。在 FY3 上午/下午轨道气象卫星上并未特地针对杂散光进行传感器设计,但在风云三号 C 星/可见光红外扫描辐射计(FY3C/VIRR)仪器上发现了太阳对定标黑体的污染,导致出现中红外通道定标异常的现象<sup>[5-6]</sup>。晨昏轨道气象卫星运行在晨昏线,其受到太阳或月球等光源射入传感器观测窗口的杂散光的影响比较严重,因此需要分析外部杂散光对晨昏轨道气象卫星所搭载的传感器产生的可能影响。

本文利用 Satellite Tool Kit (STK)软件进行仿真,分析了晨昏轨道气象卫星可能受到的来自太阳和月球杂散光的影响,根据仿真分析结果来设计仪器外部遮光罩,并对晨昏轨道气象卫星所搭载的传感器(微光成像仪)的研制和改进提出了参考意见。

## 2 原理

图 1 描述了太阳光和月光等杂散光进入传感器的示意图,当太阳光矢量(或者月光矢量)与传感器底部窗口法向量(Nadir)的夹角小于  $90^\circ$  时,光线才有可能射入传感器<sup>[7]</sup>。

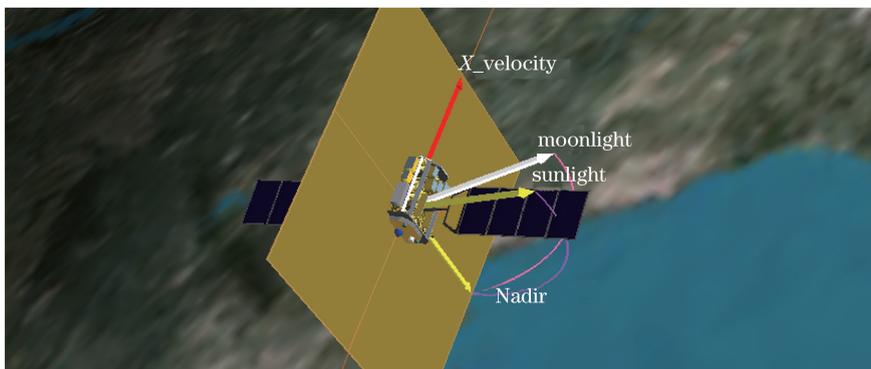


图 1 太阳光和月光进入传感器的示意图

Fig. 1 Diagram of sunlight and moonlight entering into remote sensor

对于风云三号晨昏轨道气象卫星,由于星上所搭载的微光成像仪安装在星体舱外,并且具有  $\pm 55^\circ$  的视场角(FOV)。因此,卫星在轨运行过程中,微光成像仪受到的光照角度也随之发生变化,太阳光(或月光)可能会直接进入视场而导致像面信噪比下降。这里讨论的杂散光主要是第一种类型的杂散光。

研究中所采用的模拟软件是 STK。STK 可以实现可视化分析,该软件用丰富的数据和图表格格式展现

分析结果,广泛应用于航天任务的模拟分析过程中。STK 的分析过程为:1) 创建新的场景,输入卫星的初始参数,包括轨道高度、降交点时间、轨道类型和起止时间<sup>[7-8]</sup>;2) 创建太阳矢量(或月球矢量)与遥感器底部窗口法向量的夹角;3) 创建新的图形输出和数据输出。

仿真系统实验的参考时间设置在 2006—2007 年之间。下面依据步骤 1)~3),并针对遥感器受到的光照角度的变化进行模拟分析。

分析遥感器受到太阳杂散光的影响。图 2 为 2006-01-01 至 2007-01-01 一整年中太阳矢量与遥感器底部窗口法向量(以下称 Sun-Nadir)的夹角变化情况。在这一整年中,Sun-Nadir 夹角的变化范围约为 $[56.8^\circ, 123.2^\circ]$ 。当 Sun-Nadir 夹角大于  $90^\circ$  时,太阳光背向遥感器窗口;相反,当 Sun-Nadir 夹角小于  $90^\circ$  时,太阳光会射向遥感器窗口。在 2006-12-18 左右,Sun-Nadir 夹角达到全年的极小值( $56.82^\circ$ )。此时,太阳光对遥感器产生杂散光影响的可能性和影响程度最大。

下面分析遥感器受到月球杂散光的影响情况。图 3 为 2006-01-01 至 2007-01-01 一整年中月球矢量与遥感器底部窗口法向量(以下称 Moon-Nadir)夹角的变化情况。可以看出,Moon-Nadir 夹角的变化趋势与 Sun-Nadir 夹角一致,在此基础上,叠加了一个有关月球绕地球公转的分量,形成了最终的变化图。Moon-Nadir 夹角的变化范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$ 。

月光对遥感器产生杂散光影响需要具备两个基本条件:1) 相对于遥感器,月球没有被地球遮挡,即月光可以直接照射到遥感器;2) 对月球而言,太阳没有被地球遮挡,即月球可以被太阳照亮。

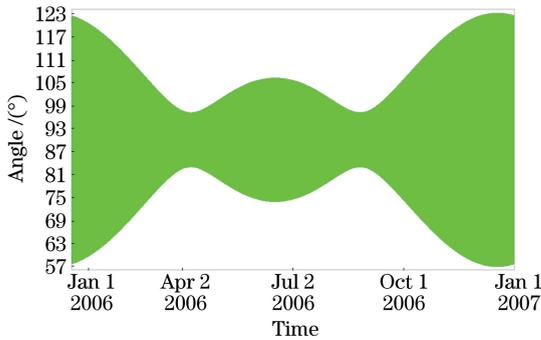


图 2 全年 Sun-Nadir 夹角的变化

Fig. 2 Variation of Sun-Nadir angle throughout the year

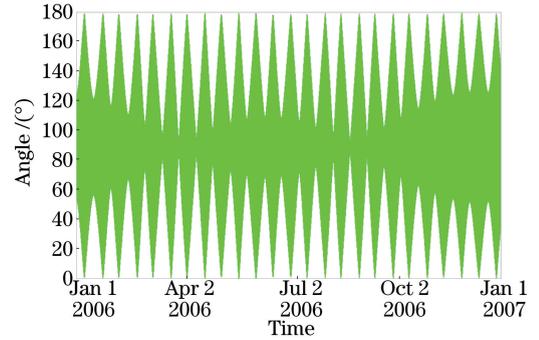


图 3 全年 Moon-Nadir 夹角的变化

Fig. 3 Variation of Moon-Nadir angle throughout the year

图 4 所示为相对于遥感器而言,月球刚好被地球遮挡的情况。根据地球半径、卫星轨道高度和月地距离等参数,求解得到此时的月光入射角为  $62.14^\circ$ 。只有满足月光入射角为  $62.14^\circ$  的条件,太阳光才会直接照射到遥感器上。因此,当 Moon-Nadir 夹角大于  $62.14^\circ$  时,即使月球被照亮也不会有月光对遥感器的观测产生影响;当 Moon-Nadir 夹角小于  $62.14^\circ$  时,如果同时满足月球被太阳照亮的条件,那么月球便可能对遥感器产生杂散光的影响。对于太阳来说,当 Sun-Nadir 夹角小于  $62.14^\circ$  时,太阳光不会直接对遥感器的观测造成影响。因此,只要满足太阳遮挡条件,月球便不会对遥感器产生杂散光。

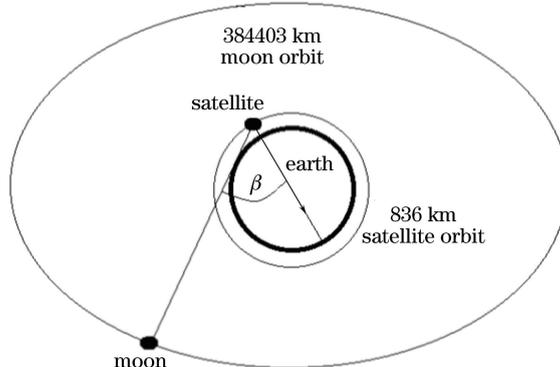


图 4 月球被地球遮挡的示意图

Fig. 4 Diagram of the moon covered by the earth

### 3 实验模拟与讨论

太阳光/月光对遥感器造成杂散光影响的最小角度为  $62.14^\circ$ 。相比于太阳光,月光的辐射强度要小得多。因此在抑制杂散光时,只要能足够抑制太阳光对遥感器的影响,则足以抑制比太阳光弱得多的月光的影响。

假定微光成像仪继承了传统的风云三号/中分辨率光谱成像仪(FY3/MERSI)的设计和仪器视场,即成像仪具有  $\pm 55^\circ$  的视场。晨昏轨道下太阳光的最小入射角为  $62.14^\circ$ ,在微光成像仪最大视场处,太阳光的入射角只有  $7.14^\circ$ ,这个角度接近直射角度。因此在进行光路设计时,应充分考虑杂散光的影响,设计合理的遮光罩,避免杂散光进入光路系统进而影响成像质量。

设遥感器的入瞳是圆形的,为了抑制外部杂散光的进入,在遥感器最前面安装一个圆筒状遮光筒,如图 5 所示。根据图中标注的参数,可以得到

$$L = D / \tan \beta, \quad (1)$$

式中  $L$  为遮光罩的长度; $D$  为入瞳直径; $\beta$  为光线的入射角,它不仅由模拟的最小入射角决定,同时还受实际筒长的限制,实际中遮光筒不可能比整个遥感器平台还要大。因此,选择  $\beta$  时要权衡利弊,既要有效遮挡杂散光,又要符合尺寸的限制要求。

根据上面的理论分析,对风云三号晨昏轨道气象卫星进行实际的遮光罩设计。首先将所有可能造成光直射进入遥感器的杂散光全部遮挡,如图 6 所示。通过计算,可以得到此时遮光罩的高度达 4.78 m。显然,这远超出了卫星平台对遥感器尺寸的限制,因此不能采取这种方案。

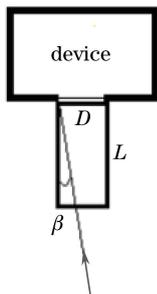


图 5 遮光罩设计示意图

Fig. 5 Schematic of shade design

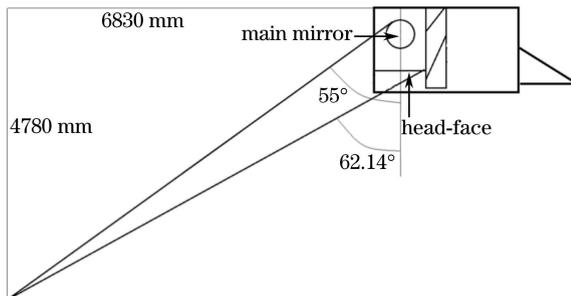


图 6 完全遮挡直射光进入遥感器入瞳

Fig. 6 All direct light are kept out of entrance pupil of remote sensor

考虑到遮光罩的高度和安装位置受卫星总体布局设计的影响,应允许部分杂散光进入,从而得到大小合适的遮光罩。根据模拟分析结果与卫星总体设计协调,确定遮光罩的高度为 710 mm 时较为合理,此时,既可以满足卫星的总体设计要求,又可以有效抑制大部分的杂散光。最终的设计结果如图 7 所示,可以看出入射角大于  $68.5^\circ$  的太阳光不能进入遥感器的入瞳,入射角大于  $62.14^\circ$  的太阳光不能进入遥感器的主镜。这种

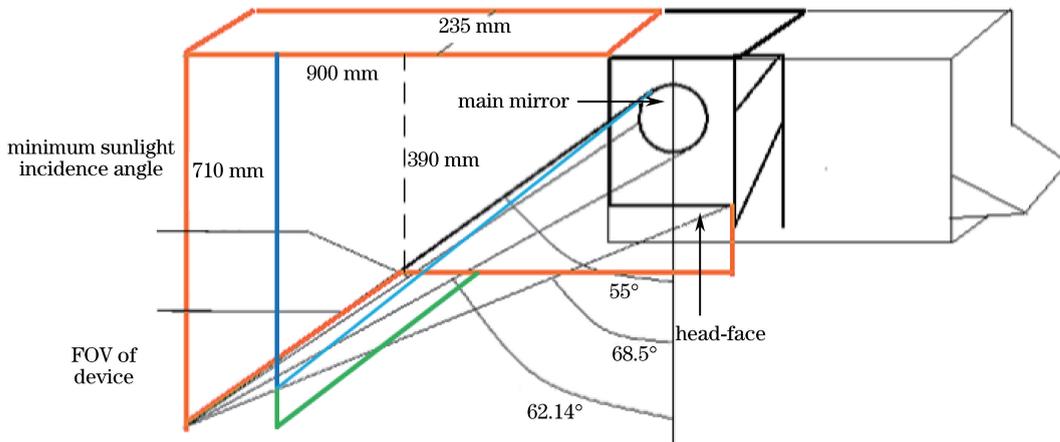


图 7 遮光罩高度为 710 mm 时的设计示意图

Fig. 7 Design diagram when height of shade is 710 mm

设计虽然在很大程度上抑制了杂散光,但是由于风云三号 E 星/中分辨率光谱成像仪(FY3E/MERSI)微光型继承了 FY3/MERSI 前期的设计结构,采用扫描镜机制来消除杂散光的设计不能完全达到设计要求。

在不影响遥感器应用的情况下,将遥感器的视场角降低到  $50^\circ$ ,可以进一步提高杂散光的抑制效率。此时,从图 7 中的蓝色轮廓可以看出,在保持遮光效果不变的情况下,遮光罩的横向尺寸减小了  $1/5$ ,纵向尺寸也有所减小。如果保持遮光罩的纵向尺寸不变,则进入遥感器的光就会更少,进一步提高了遮光效果,即采用了牺牲遥感器视场角来换取杂散光遮挡效率的方法,以达到仪器设计指标的平衡。

内部杂散光在微光成像仪内部发生散射,这些光线杂乱无章,能量在散射过程中衰减得也很迅速。采用增加拦光光阑和防漏光光阑等方法来抑制内部杂散光时,需要结合仪器制造方进一步进行实际的仿真和实验研究。特别是在上星之前,有必要对整机的杂散光进行测试,通过光源模拟系统、扫描系统和卫星转台的协调运动实现对星表的扫描照射,通过暗室系统实现载荷暗目标的模拟,从而可以测得光源照射下的杂散光抑制比<sup>[9-16]</sup>。

搭载在美国国家极轨运行环境卫星系统预备计划卫星上的基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)的改进型号可见光红外成像辐射(VIIRS)是一种典型的望远镜结构成像仪器<sup>[17-18]</sup>。虽然它也是下午轨道气象卫星,但是跟 MODIS 不同的是,VIIRS 设计有微光通道,其对杂散光抑制有更严格的要求,所以采用了望远镜结构形式来抑制杂散光。MODIS 光路中的第一个光学元件是扫描反射镜,用来产生轨道的扫描。VIIRS 对这种结构进行了改进,它利用一个无焦三反去像散的望远镜结构,整个望远镜组件为了产生轨道扫描而不断旋转。由于旋转望远镜组件的主镜被放在扫描口更深处的凹陷中,因此阻止了太阳光对主镜的直接冲击,相对于 MODIS 扫描镜来说,主镜受到更少的杂光污染。

## 4 结 论

介绍了晨昏轨道气象卫星的优势和应用需求,指出晨昏轨道气象卫星的关键技术问题之一是杂散光的抑制。通过软件模拟晨昏轨道,进行了杂散光分析,并提出了解决杂散光问题的方法,对于晨昏轨道气象卫星和微光仪器的发展有一定的借鉴作用。

通过对风云三号晨昏轨道气象卫星的模拟分析,得到了来自太阳和月球的杂散光对卫星微光成像系统的影响,包括影响的时间段和影响程度等。根据影响结果分析,并与卫星总体设计协调,设计了尺寸合理的遮光罩,该模拟方案能够较好地避免了由于太阳等引起的杂散光对遥感器的影响。

如果要彻底解决晨昏轨道气象卫星的杂散光问题,微光成像仪的设计由旋转扫描镜结构形式向望远镜结构形式发展可能是较好的解决方式。VIIRS 将扫描反射镜换成一个望远镜的设计具有诸多优势,有效抑制了外部杂散光对仪器工作的影响,这种设计结构也为下一代风云卫星仪器的设计提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Li Lin, Huang Yifan, Wang Yongtian. Modern optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015.  
李 林, 黄一帆, 王涌天. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [2] Kang Jian, Zhang Jie, Meng Junmin. Apolynomial fitting method of sun glitter image equalization[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(6): 36-40.  
康 健, 张 杰, 孟俊敏. 耀斑遥感图像均衡化的多项式拟合方法[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(6): 36-40.
- [3] Zhang Peng, Yang Lei, Gu Songyan, *et al.* Meteorological requirements for the early-morning-orbit satellite [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2015, 5(2): 6-12.  
张 鹏, 杨 磊, 谷松岩, 等. 晨昏轨道卫星的气象应用需求分析[J]. 气象科技进展, 2015, 5(2): 6-12.
- [4] World Meteorological Organization. Vision for the global observing system (GOS) [OL]. (2016-02-18) [2017-03-01]. <http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/gos-vision.html>.
- [5] Xu Hanlie, Hu Xiuqing, Xu Na, *et al.* Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1874-1879.  
徐寒列, 胡秀清, 徐 娜, 等. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的识别和修正[J]. 光学精密工程,

- 2015, 23(7): 1874-1879.
- [6] Niu Xinhua, Zhou Juguang, Chen Shuaishuai, *et al.* Simulation and suppression of solar on-orbit pollution of FY-3/MERSI onboard blackbody[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1822-1828.  
钮新华, 周巨广, 陈帅帅, 等. FY-3/中分辨率光谱成像仪星上黑体的在轨太阳污染模拟与抑制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1822-1828.
- [7] Ding Suquan, Zhang Bo, Liu Shiyong. Application of STK in analyzing shuttle mission simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.  
丁溯泉, 张波, 刘世勇. STK在航天任务仿真分析中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] Oliver Montenbruck, Eberhard Gill. Satellite orbits: Models, methods and applications[M]. Wang Jiasong, Zhu Kaijian, Hu Xiaogong, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.  
Oliver Montenbruck, Eberhard Gill. 卫星轨道: 模型、方法和应用[M]. 王家松, 祝开建, 胡小工, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [9] Li Xinyao, Chen Fuchun, Chen Guilin. Stray light suppression in FY-2 radiometer with shutter[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 134-138.  
李欣耀, 陈福春, 陈桂林. 风云二号辐射计百叶窗式遮光罩杂散光抑制研究[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 134-138.
- [10] Zhang Junqiang, Wu Qingwen, Yan Changxiang. Stray light measurement of space-borne high resolution imaging spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 39(3): 1319-1323.  
张军强, 吴清文, 颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光测量[J]. 光学精密工程, 2011, 39(3): 1319-1323.
- [11] Shu Xingxing, Liu Weilin. Suppression of stray light in visible light optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121101.  
舒星星, 刘卫林. 可见光光学系统杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121101.
- [12] Yuan Yukai. Stray light suppressing measure of optical system[J]. Journal of Atmosphere and Environmental Optics, 2007, 2(1): 6-10.  
原育凯. 光学系统杂散光的消除方法[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 6-10.
- [13] Yan Yadong, Chen Liangyi, Cang Yuping, *et al.* Stray light reduction analysis in single star simulator[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(9): 21-24.  
闫亚东, 陈良益, 仓玉萍, 等. 单星模拟器杂散光抑制分析[J]. 光电工程, 2007, 34(9): 21-24.
- [14] Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, Zhu Qihua. Stray light analysis for optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 300-304.  
岑兆丰, 李晓彤, 朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 300-304.
- [15] Shi Rongbao. Stray light analysis and measurement and baffle system design of microsatellite spaceborne remote sensing camera[D]. Jiangsu: Suzhou University, 2010.  
石荣宝. 微小卫星空间遥感相机的杂散光分析、测量和遮光系统设计[D]. 江苏: 苏州大学, 2010.
- [16] Zhang Kai, He Xin, Liu Qiang. Analysis and suppression of stray light in spaceborne visible light camera[J]. Infrared, 2014, 35(9): 10-14.  
张凯, 何欣, 刘强. 空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. 红外, 2014, 35(9): 10-14.
- [17] Mills S, Weiss S, Liang C K. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction[C]. SPIE, 2013, 8866: 88661P.
- [18] Miller S D, Straka W, Mills S P, *et al.* Illuminating the capabilities of the suomi national polar-orbiting partnership (NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) day/night band[J]. Remote Sensing, 2013, 5(12): 6717-6766.