

文章编号 1004-924X(2012)11-2331-07

## 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制

周海金<sup>1,2</sup>, 刘文清<sup>2\*</sup>, 司福祺<sup>2</sup>, 江宇<sup>2</sup>, 薛辉<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**考虑杂散光对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪测量精度的影响,设计了遮光罩和其他消杂光结构来抑制杂散光,并对杂散光进行了分析。利用 TracePro 软件分析了系统紫外通道 1(240~315 nm)的杂散光水平,确定了杂散光传输的一次、二次散射路径。根据杂散光传输路径,计算了杂散光评价指标点源透射比(PST)曲线,结果显示杂散光抑制措施效果明显,PST 小于  $3 \times 10^{-5}$ ,中心视场杂散光照射度水平为  $5.472 \times 10^{-4}$ ,最终杂散光水平达到了设计指标要求。采用截止滤光片法测量了系统的杂散光水平,结果表明:中心视场杂散光比值为  $8.167 \times 10^{-4}$ ,和仿真结果接近,验证了仿真过程的准确性,说明设计的消杂光机构能够满足抑制系统杂散光的要求。

**关键词:**星载光谱仪;差分吸收光谱仪;大气痕量气体监测;杂散光;点源透射比;散射路径;遮光罩

中图分类号:TH774.12;TP73 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20122011.2331

## Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas

ZHOU Hai-jin<sup>1,2</sup>, LIU Wen-qing<sup>2\*</sup>, SI Fu-qi<sup>2</sup>, JIANG Yu<sup>2</sup>, XUE Hui<sup>2</sup>

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of  
Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

\* Corresponding author, E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

**Abstract:** In consideration of the effect of stray light on the measurement accuracy of a space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gases, several stray light removing mechanisms including a light shield and other baffles were developed to suppress the stray light, and the properties of the stray light were analyzed. With TracePro model, the stray light removing of UV channel 1(240–315 nm) in the system was evaluated, then the first and second order scattering paths were determined by simulation analysis. On the basis of stray light paths, the stray light removing for revised system was analyzed, and Point Source Transmittance(PST) was calculated. The obtained PST value shows that the light shield and other mechanisms have suppressed the

收稿日期:2012-04-18;修订日期:2012-06-13.

基金项目:公益性行业(气象)科研专项经费资助项目(No. GYHY201106045-1)

stray light effectively, PST values are less than  $3 \times 10^{-5}$ , and stray radiation ratio in a central field is  $5.472 \times 10^{-4}$ . Furthermore, the final stray light suppressing level of the system satisfies the requirement of design index. Moreover, the edge filter method is used to measure the stray light level, and the results indicate that the stray light in the central field is  $8.167 \times 10^{-4}$ , which is close to the simulation results and proves the simulation result to be credible.

**Key words:** space-borne spectrometer; differential optical absorption spectrometer; atmospheric trace gas monitoring; stray light; Point Source Transmittance (PST); scattering path; light shield

## 1 引言

近年来,随着全球环境问题的日益加重,各国已经认识到解决环境问题的必要性和重要性。卫星遥感技术以其独特的全球覆盖、快速、多光谱、大信息量的特点在环境监测领域占有无可比拟的优势<sup>[1]</sup>。目前,国外已经有多颗成像光谱仪在轨运行,用于地球大气遥感,如 SCIAMACHY、OMI 等。国内虽然也有多颗卫星载荷,但它们尚不具备探测大气层各种痕量气体的能力。为了解决这个问题,本课题组开展了星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的研发,通过探测地球大气或地球表面反射、散射的紫外/可见光辐射来解析痕量污染气体成分  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  等的分布和变化,为全球关键大气成份和各种痕量污染组分的监测提供关键技术。

该类光谱遥感仪器的探测目标是微弱光谱信号,杂散光是影响光谱测量精度的重要因素之一,也是多通道光谱仪中形成光谱背景的主要原因。杂散光的存在影响了光谱仪的系统噪声,干扰了差分吸收光谱算法,降低了检测灵敏度和信噪比,甚至会湮没微弱的光谱信号<sup>[2-3]</sup>。因此,在轨运行的 OMI 等国外光谱遥感仪器,在研制阶段都针对杂散光的仿真、测量和抑制开展了大量工作。如果杂散光抑制措施不理想,极有可能造成一些低浓度气体的信息湮没在噪声中。因此,有必要通过分析系统的杂散光求得达到像平面上的杂散光量级,分析出系统各部分对像平面杂散光贡献的大小,从而提出有针对性的改进建议和相应的抑制手段,以便改善系统的抗杂散光性能,减少杂散辐射对成像的影响<sup>[4-5]</sup>。

为保证星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的精度,本文针对工程需要对系统进行了消杂光设

计,设计内容包括内外遮光罩和其他消杂光结构。文中详细地分析了系统的杂散光,得到了杂散光的传输路径,评价了系统的杂散光水平。仿真结果表明抑制效果显著,系统杂散光水平满足设计指标要求。最后,采用截止滤光片法测量了系统的杂散光水平,其结果和仿真结果接近,验证了仿真方法的实用性。

## 2 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪系统

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪通过探测地球大气或地球表面反射、散射的紫外/可见光辐射来解析痕量污染气体成分  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  等的分布和变化。仪器的光谱为 240~710 nm,有 4 个光谱通道(240~315 nm、311~405 nm、400~550 nm、545~710 nm),采用光栅分光。望远镜视场为  $114^\circ \times 0.5^\circ$ ,飞行高度为 708 km,地面范围交轨 2 600 km,沿轨 13 km,在太阳同步轨道进行天地观测、面阵推扫,结合卫星一天变换 14 个轨道,可以实现一日全球覆盖监测。

仪器前置望远镜系统无摆扫机构,采用两片偏轴球面镜设计,形成  $114^\circ$  大视场。光线在  $114^\circ \times 0.5^\circ$  视场下入射到球面主镜上,经球面主镜聚焦后发散再经球面次镜聚焦到狭缝处,中继反射镜将经狭缝后形成的发散光束变成汇聚光束,通过分色片分光形成 4 通道,分别进入相应的 Offner 结构光谱仪。Offner 结构光谱仪由入射狭缝、凹面反射镜、凸面光栅、面阵 CCD 等组成。凸面光栅采用全息原刻光栅,提高了衍射效率。4 个通道的光路类似,杂散光分析方法一致,其中紫外通道 1(240~315 nm)由于光强弱,杂散光问题最为严重,因此文中仅详细介绍了紫外通道 1 的杂散光。

### 3 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪消杂光设计

由于光学系统视场是条形视场( $114^\circ \times 0.5^\circ$ ),工作范围宽(240~710 nm),反射面较多,为同时满足高成像质量和低杂散光水平,对系统光机结构设计提出了苛刻要求。在满足成像质量的基础上,具体的消杂光设计如下:

#### 3.1 遮光罩设计

遮光罩的基本任务是在不遮挡视场内光线的前提下,尽可能地阻拦视场外的杂光进入光学系统<sup>[6]</sup>。由于系统的视场为一条形视场,Y方向视场非常大,所以普通的筒状结构不能满足杂散光抑制的要求,因此将遮光罩设计成盒状结构形式,并在内壁放置挡光环进一步抑制杂散光。由于光学系统的入瞳和箱体外壁距离 46 mm,因此需要在箱体内部放置内遮光罩,使进入光学系统内的视场外光线至少经过二次散射。内遮光罩设计如图 1 所示。

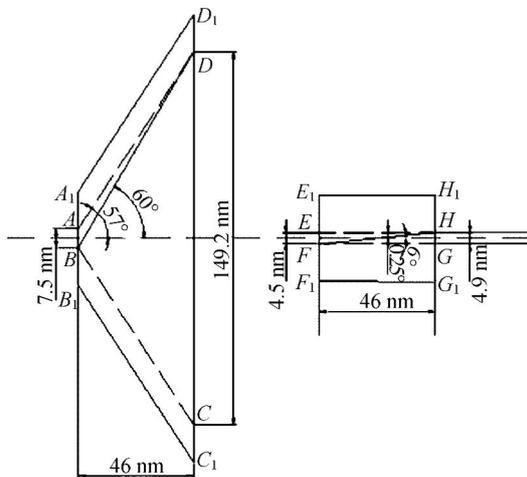


图 1 内遮光罩设计

Fig. 1 Design of inner light shield

遮光罩外壁和内壁均为锥形。平面 Y-Z,外壁为  $A_1B_1C_1D_1$ ,内壁为 ABCD。平面 X-Z,外壁为  $E_1F_1G_1H_1$ ,内壁为 EFGH。平面 Y-Z 取内壁锥形锥角为  $57^\circ$ ,遮光罩内径  $CD=149.2$  mm,该方向遮光罩临界入射角为  $60^\circ$ 。X-Z 平面取内壁锥形锥角为  $0.25^\circ$ ,遮光罩内径  $GH=4.9$  mm,该方向遮光罩临界入射角为  $6^\circ$ 。在 Y-Z 平面遮光

罩内壁安装了挡光片,设计的挡光环高度为 15 mm,挡光片数目为 10。为了不使大离轴角度辐射源经刀口斜面散射而进入系统内部,挡光片刀口角度为  $60^\circ$ ,同时刀口角度向外<sup>[7]</sup>。X-Z 平面遮光罩内壁发黑。

为进一步限制杂散光进入系统内部,在箱体外部设计外遮光罩。为满足结构稳定性的要求, $114^\circ$ 视场方向未设计遮挡。设计原则是避免  $0.5^\circ$ 视场方向外的太阳光进入箱体。由于外遮光罩设计未考虑  $114^\circ$ 视场方向,同时内遮光罩长度较短,对该方向杂散光限制能力弱,可预见该方向上非成像光会直接进入箱体内部,造成严重的杂散光问题,为此杂散光分析重点考虑该方向。

#### 3.2 其他消杂光设计

(1)仪器分为 4 个通道,尽可能避免高级次衍射造成的杂散光影响。特别是紫外通道 1,该波段的太阳辐射弱,如果长波进入该通道会造成较强的杂散光,从而湮没测量信号。

(2)箱体内部放置消杂光挡板,在保证光路的同时,将箱体分离为多块区域。

(3)主镜前添加入瞳光阑板,其目的是遮挡箱体入光孔到主镜的非成像光传输,左侧的小孔为入瞳孔,位置和孔径光阑共轭,右侧条形孔保证不遮挡主镜到次镜的反射光。

(4)主镜、次镜、中继反射镜加遮光压板。通过计算主镜、次镜、中继反射镜上的光成像面积,非成像区域设计遮光压板。

(5)在次镜后的一次像面位置设置视场光阑,采用狭缝设计,在改善成像质量的同时,减少由次镜到中继反射镜的杂散光传输。

(6)为了减小杂光在系统内部的散射,内壁采用 Aeroglaze Z306 黑色吸收涂层。

## 4 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光分析

#### 4.1 系统建模

在杂散光分析软件 Tracepro 中建立系统的三维实体模型,如图 2 所示。设置不同表面的散射属性,双向散射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)采用  $AB_g$  形式,其中 A, B, g 是确定 BRDF 函数的 3 个参数。根据材料属性,所有的光学表面分为 4 类:反射表

面、分光表面、透镜表面、发黑表面。根据文献资料建立反射表面、分光表面、透镜表面、Aeroglaze Z306 材料发黑涂层面各表面的 ABg 模型,如表 1 所示<sup>[8-10]</sup>。凸面光栅表面设置为光栅,衍射级次考虑 0 级、±1 级、+2 级。

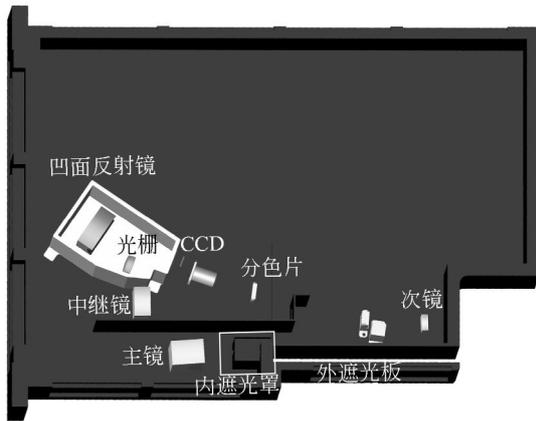


图 2 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪紫外通道实体模型

Fig. 2 Model of UV channel of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas

表 1 表面 BRDF 模型参数

Tab. 1 BRDF parameters of each surface

| 类型             | 透过率    | 反射率       | 吸收率 | BRDF 模型参数 |       |   |
|----------------|--------|-----------|-----|-----------|-------|---|
|                |        |           |     | A         | B     | g |
| 反射表面           | —      | 94.87%    | 5%  | $10^{-4}$ | 0.015 | 2 |
| 分色表面<br>(工作波段) | —      | 94.87%    | 5%  | $10^{-4}$ | 0.015 | 2 |
| 发黑表面           | —      | $10^{-5}$ | 90% | 0.064     | 1     | 0 |
| 透镜表面           | 97.97% | 1%        | 1%  | $10^{-5}$ | 0.015 | 2 |

## 4.2 散射光传输路径确定

杂散光分析研究中有两类重要的散射表面,即关键表面和光源直接照射表面,它们的相关组合构成了杂散光的传输路径。关键表面是指从探测器上某处能看到的任何表面,包括从反射镜和镜头中能看到的任何表面的像面。光源直接照射表面是指从杂散光源直接或者通过反射或者镜面和镜头散射后间接接收光能的表面<sup>[11]</sup>。

### 4.2.1 反向光线追迹确定关键面

通常采用像面设置面光源,反向追迹分析杂

散光传输的关键表面。由于光谱仪中光栅的存在,反向光源定义在光谱仪狭缝上,发光角度为  $30^\circ$ ,光线为 10 000 条,阈值为  $1 \times 10^{-9}$ ,发射特性为 lambertian 发射场型,发出的光线完全覆盖透镜。查看系统的所有表面有无光能量入射,并进一步检查入射光线是通过反射、透射还是散射到达表面上的,其中反射、透射照射的表面属于关键表面。对于光谱仪内部的关键表面,通过将凸面光栅设置为反射镜,在 CCD 上定义光源反向追迹来确定。

### 4.2.2 前向追迹确定光源直接照射面

从杂散光源方向入射光线,前向追迹确定光源直接照射表面。用有效视场外点光源追迹,光线数为 5 000 条,阈值为  $1 \times 10^{-9}$ ,在  $\pm 58^\circ \sim \pm 80^\circ$  选择 12 个光源离轴角。光源以每一个离轴角入射后都可以确定相应的光源直接照射表面。

## 4.3 散射路径

任何表面同时属于关键表面和光源直接照射表面,就存在从杂散光源经过关键表面到达像面的一级杂散光传输路径。如果从光源直接照射表面能够看到某个关键表面,那么就存在一个二级路径,从光源射出的光被直接照射表面散射到关键表面上,然后从关键表面散射到探测器上。对光学系统而言,一级杂散光传输路径对像面杂散光的贡献最大,应越少越好<sup>[12-13]</sup>。

确定关键表面和光源直接照射表面后,发现由于遮光罩、消杂光挡板和其他消杂光机构的设计,系统的一级散射路径和二级散射路径较少。

## 4.4 系统点源透射比 PST 曲线计算

点源透射比(PST)已经普遍地被用于评价光机系统的消杂光特性,它是表示系统本身对杂光抑制水平的一个指标,与杂光源的个数和辐射强度无关,由下式定义<sup>[5]</sup>:

$$PST(\varphi) = \frac{P_d(\varphi)}{P_d(0)}. \quad (1)$$

式中:  $P_d(\varphi)$  是从离轴为  $\varphi$  的点源落在探测器上的辐射通量;  $P_d(0)$  是从位于轴上的同一点源落在探测器上的辐射通量。PST 越小,表示系统杂光抑制能力越强,系统性能越好。在实际应用中,如果已知系统的 PST,当点杂光源在入射孔径上的照度已知时,可以方便地计算出探测器上的杂光辐照度。对于扩展光源,则可以对 PST 积分求得扩展杂光源在探测器上的辐照度。

系统的交轨视场为  $114^\circ$ 。根据 PST 的定义,用有效视场外无限处点光源入射,光线离轴角分别设置为  $\pm 58^\circ, \pm 60^\circ, \pm 65^\circ, \pm 70^\circ, \pm 75^\circ, \pm 80^\circ$ 。为达到准确的仿真结果,比较了不同光线追迹数目的计算结果,当结果不随追迹光线条数增加变化时,确定合理的追迹条数并设置参数。最终确定的追迹光线数量为 80 000 条,追迹阈值为  $1 \times 10^{-11}$ 。通过蒙特卡罗光线追迹,确定 CCD 像面上辐照度的平均值,根据式(1)计算离轴角度的 PST 值。图 3、图 4 分别为中心视场点光源、离轴角为  $58^\circ$  点光源入射时 CCD 像面上的辐照度图。各个角度的 PST 值如图 5 所示。

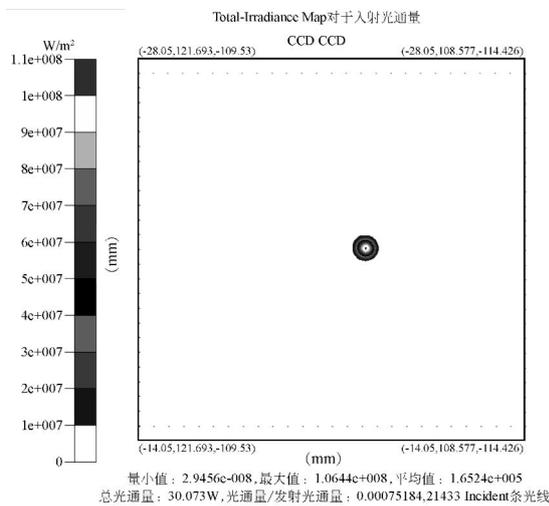


图 3 中心视场点光源入射时 CCD 像面照度图  
Fig. 3 Maps of CCD with point light source incident from central field

对 PST 曲线做二次多项式拟合,结果如下式:

$$PST(\theta) = \begin{cases} 10^{-3} [2.44141 - 0.19976(\theta - 58) + 0.0047(\theta - 58)^2], & 58^\circ \leq \theta \leq 80^\circ \\ 10^{-3} [3.53883 + 0.23745(\theta + 58) + 0.00346(\theta + 58)^2], & -80^\circ \leq \theta \leq -58^\circ \end{cases} \quad (2)$$

对 PST 曲线沿离轴角度积分,计算出视场外杂散光在像面照度同中心视场像面照度的比值为:

$$v = \int_{58^\circ}^{80^\circ} PST(\theta) + \int_{-80^\circ}^{-58^\circ} PST(\theta) = 5.472 \times 10^{-4} \quad (3)$$

可以看出,系统 PST 值最大不超过  $3.5 \times 10^{-5}$ ,离轴角大于  $65^\circ$  后 PST 值达到  $10^{-6}$  量级, PST 曲线呈现平稳下降的趋势。中心视场的杂散光水平也较低,杂散光照度比值为  $5.472 \times 10^{-4}$ 。

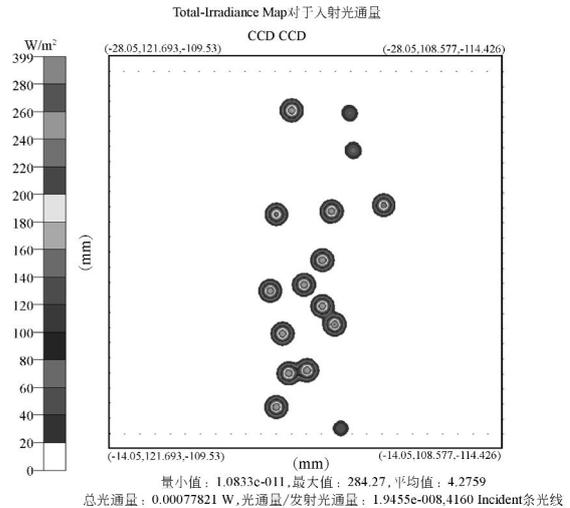


图 4 离轴角为  $58^\circ$  点光源入射时 CCD 像面照度图  
Fig. 4 Maps of CCD with point light source incident from off-axis angle  $58^\circ$

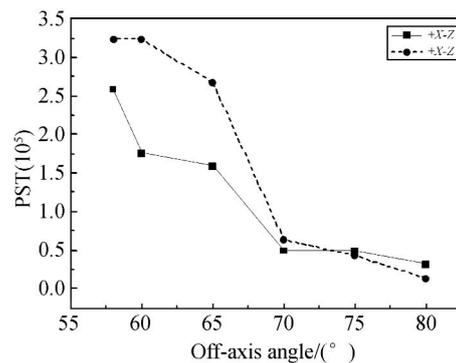


图 5 不同离轴角度的 PST 值曲线  
Fig. 5 PST values of different off-axis angles

这说明杂散光抑制措施效果明显,最终达到了设计指标要求。

## 5 杂散光测量

关于杂散光测量的报道已有许多,如截止滤光片法、透过率法、光谱法、级数透过率法、卷积算法、矩阵修正法、谱杂散光系数法、氧气吸收光谱及参数拟合法等,这些方法被应用于光谱仪和其他仪

器的杂散光测量<sup>[14]</sup>。星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光的测量采用了截止滤光片法<sup>[3]</sup>。

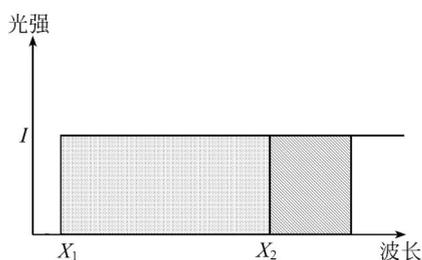


图 6 截止滤光片法检测杂散光

Fig. 6 Stray light measurement using edge filter method

截止滤光片法示意图如图 6 所示,采用两块高通滤光片  $F_1, F_2$  来测量波长  $X_1 \sim X_2$  的杂散光水平。 $F_1$  的作用是截止波长小于  $X_1$  的光辐射,测量得到光谱  $S_1(\lambda)$ 。 $F_2$  的作用是截止波长小于  $X_2$  ( $X_1 < X_2$ ) 的光辐射,测量得到光谱  $S_2(\lambda)$ 。光谱  $S_1(\lambda)$  中  $X_1 \sim X_2$  波段的光强度为总光强  $\varphi_1$ ; 光谱  $S_2$  中  $X_1 \sim X_2$  波长内的光强为杂散光  $\varphi_s$ 。得到杂散光比值<sup>[3]</sup>为:

$$\eta = \frac{\varphi_s}{\varphi_1} = \frac{\text{杂散光}}{\text{总光强}}, \quad (4)$$

式中:  $\varphi_s$  代表杂散光强度值,  $\varphi_1$  代表总光强值,  $\eta$  代表杂散光比值。

对于紫外通道 1,  $F_1$  滤光片的截止波长为 260 nm,  $F_2$  滤光片的截止波长为 300 nm。采用截止滤光片法,多次测量求平均值。在 277.5 nm 波长处,扣除暗背景总光强值为 45 306,杂散光强度值为 37,中心视场杂散光比值为  $8.167 \times 10^{-4}$ ,达到了杂散光的设计要求。该测试结果和仿真计算值接近,说明仿真结果是可信的。

## 6 结 论

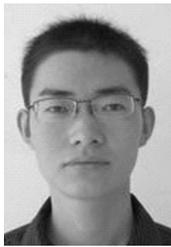
为保证星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的精度,本文针对系统杂散光抑制的工程需要设计了消杂光结构,重点介绍了遮光罩的设计。通过仿真分析量化了系统最终的杂散光水平,确定了杂散光传输路径和点源透射比 PST 曲线。计算显示离轴角大于  $65^\circ$  后 PST 值达到  $10^{-6}$  量级, PST 曲线呈现平稳下降的趋势,视场外杂散光在像面照度同中心视场像面照度的比值为  $5.472 \times 10^{-4}$ 。仿真结果表明,采用的杂散光抑制方案效果显著,杂散光水平达到了设计指标要求。最后采用截止滤光片法对系统杂散光水平进行了实际测量,得到中心视场杂散光比值为  $8.167 \times 10^{-4}$ ,和仿真计算结果接近,验证了仿真结果的准确性,进一步说明了设计的消杂光机构能够满足系统的杂散光抑制要求。

## 参考文献:

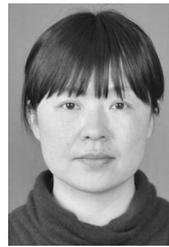
- [1] PITERNEL F L, GIJSBERTU H J, MRCEL R D, et al. The ozone monitoring instrument [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, 44(5): 1093-1101.
- [2] 张军强,吴清文,颜昌翔.星载成像光谱仪杂散光测量与修正[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 552-560. ZHANG J Q, WU Q W, YAN CH X. Measurement and correction of stray light of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 552-560. (in Chinese)
- [3] PLATT U, PERNER D. *Differential optical absorption spectroscopy (DOAS), principles and applications* [M]. German: Springer, 2008: 625-630.
- [4] 钟兴,贾继强.空间相机消杂光设计及仿真[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 621-625. ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of space-borne camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 621-625. (in Chinese)
- [5] PETERSON G L. Stray light calculation methods with optical ray trace software [J]. *SPIE*, 1999, 3780: 132-137.
- [6] STAUNDER J L. *Stray light comparison of off-axis and on-axis telescopes* [D]. USA: Utha State University, 2000.
- [7] 邹刚毅,樊学武.离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 605-609. ZOU G Y, FAN X W. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 605-609. (in Chinese)
- [8] Lambda Research Corporation. *Tracepro User Manual* [M]. Littleton: Lambda Research Corporation, 2005.
- [9] BAUMER S. SLIOS-a contribution to standard pro-

- cedures in stray light measurements [J]. *SPIE*, 1999, 3739: 414-421.
- [10] HARVEY J E, KOTHA A. Scattering effects from residual optical fabrication errors [J]. *SPIE*, 1995, 2576: 155-174.
- [11] Lambda Research Corporation. EO-1 stray light analysis report No. 3 [R]. *Lambda Research Corporation*, 1998:5-7.
- [12] 李婷,杨建峰,阮萍,等. 月基光学天文望远镜(LOT)的杂散光分析[J]. *光子学报*, 2007, 36: 136-141.  
LI T, YANG J F, RUAN P, *et al.*. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36: 136-141. (in Chinese)
- [13] 张红鑫,卢振武,夏利东,等. 白光日冕仪光系统的杂散光抑制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2371-2376.  
ZHANG H X, LU ZH W, XIA L D, *et al.*. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2371-2376. (in Chinese)
- [14] 张军强,吴清文,颜昌翔. 星载超光谱成像仪杂散光及其测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10):2861-2865.  
ZHANG J Q, WU Q W, YAN CH X. Stray light of space-borne hyperspectral imager and its measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10):2861-2865. (in Chinese)

## 作者简介:



周海金(1986-),男,山东聊城人,博士研究生,2008年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学系统设计和杂散光问题的研究。E-mail: hjzhou@aiofm. ac. cn



薛辉(1978-),女,辽宁昌图人,副研究员,2000年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事光学仪器结构设计的研发工作。E-mail: xuehui@aiofm. ac. cn



司福祺(1977-),男,安徽蚌埠人,博士,研究员,2000年于安徽大学获得学士学位,2003年,2006年于中科院安徽光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事光信息处理、痕量气体光学与光谱学监测方法等研究。E-mail: sifuqi@aiofm. ac. cn



## 导师简介:

刘文清(1954-),男,安徽蚌埠人,博士,研究员,博士生导师,1978年于中国科学技术大学获学士学位,1989年于中科院安徽光机所获得硕士学位,1995年于希腊克里特大学获得博士学位,主要从事环境光学特性、有害痕量气体光学与光谱学监测方法、新型环境监测技术的研究。E-mail: wqliu@aiofm. ac. cn



江宇(1976-),男,江苏扬州人,工程师,2005年于中科院安徽光机所获得硕士学位,主要从事环境光学仪器研发,包括光学系统的设计、加工、检测等方面的研究。E-mail: yjiang@aiofm. ac. cn