

## LAMOST 高分辨率光谱仪杂散光分析

张天一<sup>1,2,3</sup>, 侯永辉<sup>1,2,3</sup>, 徐 腾<sup>1,2</sup>, 姜海娇<sup>1,2</sup>, 新其其格<sup>1,2,3</sup>, 朱永田<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

2. 中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了提高 LAMOST-HRS (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope-High Resolution Spectrograph) 光谱分辨率以及光谱仪效率, 并建立一套可在仪器概念设计阶段分析杂散光的方法, 开展了在不进行 BSDF 测量的前提下, 对系统杂散光建模、分析的研究。首先根据粗糙度测量数据计算关键参数, 构建 Harvey 散射模型。接着通过显微镜观察光学面, 由 MATLAB 进行图像处理获取最大颗粒直径, 构建颗粒污染散射模型。然后导入光谱仪镀膜、光学元件、机械结构。对机械结构进行简化以提高分析效率。最后预估杂散光背景, 分析杂散光路径与组成。结果表明, LAMOST-HRS 杂散光主要由光学面散射引起, 杂散辐射率为 2.55%, 信噪比为 16.01 dB, 达到设计指标要求。

**关键词:** 光学工程; 杂散辐射率; 杂散光分析; 散射; 表面粗糙度; 颗粒测量

**中图分类号:** P111.21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0117003

## Stray light analysis on LAMOST high-resolution spectrograph

Zhang Tianyi<sup>1,2,3</sup>, Hou Yonghui<sup>1,2,3</sup>, Xu Teng<sup>1,2</sup>, Jiang Haijiao<sup>1,2</sup>, Xin Qiqige<sup>1,2,3</sup>, Zhu Yongtian<sup>1,2,3</sup>

(1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of

Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve the spectral resolution and spectrograph efficiency of LAMOST-HRS (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope-High Resolution Spectrograph), and set up the methods to analyze stray light in the conceptual design stage, the modeling and analysis of stray light without measuring BSDF were studied. First, the Harvey scattering model was constructed by calculating the key parameters according to the roughness measurement data. Then the optical surface was observed by microscope, and the maximum partical diameter was obtained by MATLAB image processing, and the particle pollution scattering model was built. The the coatings, optical element and mechanical structure of the spectrograph were imported. The mechanical structure was simplified to improve the efficiency of the analysis. Finally, the background of the stray light was estimated, and the path and composition of the stray light were analyzed. The results show that the LAMOST-HRS stray light is mainly caused by the scattering of optical surface. The stray light accounts for 2.55% of the

收稿日期: 2018-08-23; 修订日期: 2018-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(11473049, 11473048, 11603056)

作者简介: 张天一(1989-), 男, 博士生, 主要从事光学设计与杂散光分析方面的研究。Email: tyzhang@niaot.ac.cn

导师简介: 侯永辉(1977-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学、光谱仪相关技术方面的研究。Email: yhou@niaot.ac.cn

total illumination of the CCD surface, and the signal-to-noise ratio is 16.01 dB, which meets the design requirements.

Key words: optical engineering; stray radiation rate; stray light analysis; scattering; surface roughness; particle measurement

## 0 引言

大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope, LAMOST, 也称为郭守敬望远镜)是我国自主创新研制的主动反射施密特望远镜,是目前世界上口径最大的大视场望远镜,同时也是光谱获取率最高的望远镜。LAMOST 科学委员会确立了以大规模银河系光谱巡天及多波段天体光谱认证为核心科学目标的巡天计划。截止 2017 年 6 月一期巡天结束时,共获得 900 余万条光谱,远超过国际其他巡天项目发布的光谱综合,为世界上最大的光谱样本集。LAMOST 一期巡天配备 16 台低分辨率光谱仪,进行大样本、低分辨率的光谱红移巡天观测。在完成一期巡天后,为开展对特殊天体的精细观测, LAMOST 将升级配备新的高分辨率光谱仪。LAMOST 高分辨率光谱仪应用了诸多国际先进技术,包括采用 4.5" 大芯径光线增大星光获取率、使用像切分器和拼接大光栅提高光谱分辨率等<sup>[1-5]</sup>。

LAMOST 长期规划的科学目标对终端仪器有着严格的性能要求,杂散光是评价光学系统的重要指标。对光谱仪器而言,杂散光是引起背景光谱的主要原因。如果背景光谱较强,将会降低成像对比度、信噪比,并且可能会在像面上产生光斑,导致像质下降,某些情况下甚至可能会造成系统失效。降低系统杂散光水平对于探测器性能的提升是十分重要的。文中以 LAMOST 高分辨率光谱仪(LAMOST-HRS)为背景,在不进行双向散射分布函数(Bidirectional Scattering Distribution Function, BSDF)测量的情况下以实际参数为依据建立分析模型,快速预估杂散光背景,确定杂散光来源。这种杂散光分析方法可以在概念设计阶段快速进行杂散光分析,预估杂散光背景,确定杂散光来源,为详细设计阶段进一步优化光机结构、提升整体工作效率提供关键支撑。

## 1 原理

杂散光可以定义为未遵循预定路径而到达焦面的光线。系统的非成像杂散光一般来源有两类:其一非成像光束在像平面产生的亮背景,主要为机械系统缝隙外光线以及视场外光线没有进行有效的遮挡而到达探测器上形成的。此类杂散光路径遵循菲涅尔折射定律和衍射公式,可以通过光线追迹的形式进行分析。其二是系统因散射产生的非定向杂散光,这部分杂散光的形成机制是表面的不绝对光滑。散射不遵循既定公式,只能用统计学的方法,通过散射理论模拟杂散光。在光谱仪器中,引起散射的因素主要为光学面加工时的残余粗糙度、表面颗粒污染、机械表面黑处理等因素。这些复杂的散射很难用一种形式来描述,因此将利用 BSDF 来描述光线经过散射表面的宏观行为<sup>[6]</sup>。其函数形式如下:

$$\text{BSDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) = \frac{dL_s(\theta_s, \phi_s)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (1)$$

式中:  $\theta_i$ 、 $\phi_i$  分别为入射光的入射角和方位角;  $\theta_s$ 、 $\phi_s$  分别为散射光的散射角和方位角;  $L$  为散射面源的辐射亮度;  $E$  为散射面元所受到的辐射照度。

用于表征表面产生的散射量的常用指标是全积分散射(Total Integrated Scatter, TIS),如公式(2)所示。它是入射通量与总散射通量之比,取值范围在 0~1 之间。除一些个例外, TIS 通常随着入射角的变化而变化。其值等于 BSDF 在整个半球上的积分<sup>[7-8]</sup>。

$$\text{TIS} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \text{BSDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) \cos(\theta_s) \sin(\theta_s) d\theta_s d\phi_s \quad (2)$$

辐照度扩散函数(Irradiance Spread Function, ISF)是指图像表面的每单位面积接收到的辐射功率。通过分析像面辐照度均匀性,可以得知系统的杂散光数量级。光学系统的另一个杂散光指标是杂散辐射率(Stray Radiation Ratio, SRR),它定义为到达像平面的杂散光能量与视场内到达像面的总辐射能量比值<sup>[9]</sup>。

## 2 模拟

### 2.1 LAMOST 高分辨率光谱仪

LAMOST 高分辨率光谱仪(LAMOST-HRS)将安置在焦面楼高分辨率光谱室,通过光纤连接望远镜,可实现高分辨率、高信噪比的星际参数和化学元素丰度测量。光谱仪系统可以划分成以下三个单元:一是定标灯单元,提供稳定的钍氦和平场灯源,并以匹配望远镜的焦比耦合进灯源光纤,与光谱仪相连。二是光谱仪缝前单元,包括二次变焦比系统、像切分器。郭守敬望远镜配有 4 000 根星源光纤,蜕化后的望远镜光纤焦比为  $F/4$ ,二次光束变焦比系统将提供满足像切分器和光谱仪不同的慢焦比转换要求。像切分器提供狭缝对天张角的切分功能,一分为二,同时进入光谱仪。三是光谱仪本体单元,包括本体光机系统、探测器单元、电控单元和隔温罩。LAMOST-HRS 的光机方案三维模型如图 1 所示,光学结构采用准白瞳设计方案,使用双拼接 R4 大光栅、组合横向色散器、7 片镜透射式相机、 $4k \times 4k$  像素 CCD 探测器。其主要技术指标如表 1 所示<sup>[10-12]</sup>。

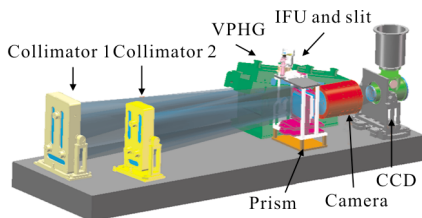


图 1 光谱仪本体单元的光机方案三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of optomechanical scheme of spectrograph body unit

表 1 LAMOST-HRS 主要技术指标

Tab.1 LAMOST-HRS main specifications

Item	Parameter
Spectral resolution	$R \geq 30\,000$
Wavelength coverage/nm	380 - 1100
Slit angle to sky	2.25"
Collimated beam diameter/mm	200
Relay ratio	0.7 <sup>x</sup>
Focal ratio of camera	F/2
Echelle grating groove density/lp · mm <sup>-1</sup>	41.6
Lateral dispersive grating groove density/lp · mm <sup>-1</sup>	500
Peak efficiency	>30%

### 2.2 杂散光分析光机模型

杂散光分析中的光学结构及参数可通过 Zemax 等光学优化软件导入。机械轮廓、材质可通过 SolidWorks 程序 IGES 或 STEP 文件导入。然而 SolidWorks 文件包含过多细节,例如机械结构的内部几何轮廓等,这些表面永远不会成为照明面与被照面,对杂散光分析结果不产生影响。但是进行光线追迹时,软件要计算光线与所有面的交界,复杂的结构意味着更复杂耗时的光线追迹交叉算法,这些结构会严重降低杂散光分析效率。所以在进行机械模型导入前,首先应进行模型简化。简化的思路为:在保证模型的整体性下,保留关键表面的尺寸和位置信息。对于 LAMOST 高分辨率光谱仪,主要简化内容为机械内部结构、连接与调节结构等,包括但不限于卸力座、辅助轴、限位座、螺钉、调节座、保护块等。简化后的机械模型如图 2 所示。根据测试,简化后追迹 10 000 条光线的情况下,追迹时间从 586 s 缩短为 165 s,时间降低 72%,CCD 面杂散光亮度变化为 0.15%。

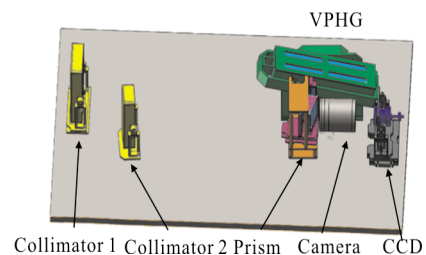


图 2 简化后的 LAMOST-HRS 示意图

Fig.2 Schematic diagram of simplified LAMOST-HRS

### 2.3 表面属性分配

#### 2.3.1 由光学面粗糙度引起的散射

光学面是在光学系统中参与成像的表面,虽然这些表面通常加工的非常光滑,但是无法做到绝对光滑,残余粗糙度将会使光线散射,造成杂散光。分析这部分散射,可将光学面描述为两个轮廓之和,即光学图形轮廓和表面粗糙度轮廓。光学轮廓决定其成像特性,一般可由圆锥方程与非球面项描述。粗糙度轮廓决定其散射光的大小和分布<sup>[13]</sup>。大多数表面粗糙度轮廓数据基于测量,获得该数据的常用方法是使用表面轮廓仪或白光干涉仪。

对于平滑的光学面由粗糙度引起的散射,可以通过哈维(Harvey-Shack)模型来描述<sup>[7]</sup>。哈维模型

是位移不变量,仅取决于散射光线和镜面光线之间的角度差值。其函数表达式如公式(3)所示。对应其函数图形如图3所示。哈维模型包括三个关键参数,其中  $b_0$  为图像峰值,  $L$  描述峰值的宽度,  $S$  描述了大散射角下的对数下降情况。 $\theta_{\text{scatter}}$ 、 $\theta_{\text{specular}}$  分别为入射光经过光学面的散射角、反射角,  $\beta$ 、 $\beta_0$  为与之对应的正弦值,  $r$  为光学面曲率半径。

$$\text{BSDF}(\beta, \beta_0) = b_0 \left[ 1 + \frac{(\beta - \beta_0)^2}{L^2} \right]^{s/2} \text{sr}^{-1} \quad (3)$$

$\beta \equiv \sin(\theta_{\text{scatter}})$   
 $\beta_0 \equiv \sin(\theta_{\text{specular}})$

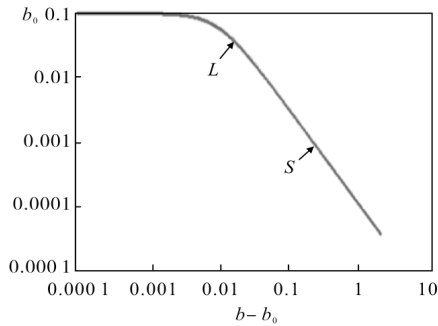


图3 Farvey-Shack 模型函数图形

Fig.3 function graph of Harvey-Shack model

三个关键参数可以与全积分散射公式(4)联立求解。对于表面粗糙度  $\sigma$  远小于波长  $\lambda$  的表面,其 TIS 可由公式(5)表示。将公式(5)代入公式(4)即可得公式(6)。其中  $\Delta n$  为待测光学面与介质的折射率变化量。 $\lambda$  为入射光波长,  $K$  为表面平均透射或反射效率。将  $L$ 、 $S$  设为典型值:  $L=0.01$ ,  $S=-1.5$ , 代入由粗糙度测量仪获取的表面粗糙度  $\sigma$ , 即可求解第三参数  $b_0$ 。表2为 LAMOST 高分辨率光谱仪的镜面哈维模型参数。

$$\text{TIS} = \begin{cases} \pi b_0 L^2 \log_e \left( 1 + \frac{1}{L^2} \right) & \text{for } S = -2 \\ 2\pi \frac{b_0}{L^S (S+2)} \left[ (1+L^2)^{\frac{S+2}{2}} - (L^2)^{\frac{S+2}{2}} \right] & \text{for } S \neq -2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{TIS} = \left( \frac{2\pi \Delta n \sigma}{\lambda} \right)^2 \cdot K \quad (5)$$

$$b_0 = \begin{cases} \left( \frac{2\pi \Delta n \sigma}{\lambda} \right)^2 \cdot K \cdot \frac{1}{\pi L^2 \log_e \left( 1 + \frac{1}{L^2} \right)} & \text{for } S = -2 \\ \left( \frac{2\pi \Delta n \sigma}{\lambda} \right)^2 \cdot K \frac{L^S (S+2)}{2\pi \left[ (1+L^2)^{\frac{S+2}{2}} - (L^2)^{\frac{S+2}{2}} \right]} & \text{for } S \neq -2 \end{cases} \quad (6)$$

表2 哈维模型参数计算与 TIS

Tab.2 Summary of Harvey scatter model coefficients and normal incidence TIS

Item	Media change	Relative refractive index	$b_0$	TIS
Folding mirror 1	Air - Air	2	0.040 9	0.050 6%
Collimator 1	Air - Air	2	0.040 9	0.050 6%
Echelle grating	Air - Air	2	0.040 9	0.050 6%
Folding mirror 2	Air - Air	2	0.040 9	0.050 6%
Lateral dispersive grating	F_Silica - Air	0.458 5	0.002 1	0.002 1%
Prism	Air	0.62	0.003 9	0.004 9%
	S-FPL53 - Air	0.438 8	0.002 0	0.002 5%
Camera	H-LAF1 - Air	0.693 6	0.005 0	0.006 2%
	ZF1 - Air	0.647 7	0.004 4	0.005 4%

### 2.3.2 由光学面颗粒污染引起的散射

在空气中暴露的表面都具有一定的颗粒污染物,例如灰尘。这将导致 BSDF 高于其表面粗糙度水平。因为颗粒形状的不确定性,无法进行正常光线追迹,可采用统计学方法。已有研究表明,可准确地将非球形尘埃颗粒模拟为球体<sup>[14]</sup>。对于光学面单个颗

粒污染物导致的散射(光线经过颗粒的散射光路结构如图4所示),可采用米氏散射理论(Mie Theory)建模,其数学模型为公式(7)、(8)。米氏散射理论认为由真空波长  $\lambda$  的光束的照射,具有复合折射率  $N$  和直径  $D$  的球形颗粒导致的散射的强度大小与尺寸因子  $x$  成比例,  $N_m$  是颗粒周围介质的折射率,  $\text{Re}(N)$

为颗粒复合折射率实部。假定光源为非偏振光,则单个颗粒的双向反射分布函数(BRDF)与双向投射分布函数 BTDF 可由公式(9)、(10)计算,其中  $I_s$  和  $I_p$  是  $s$  和  $p$  偏振光的强度, $D_i$  是第  $i$  个颗粒的直径, $f(D_i)$  为第  $i$  个颗粒直径的粒子密度。

$$x = \frac{\pi \operatorname{Re}(N) D}{\lambda} \quad (7)$$

$$m = \frac{N}{N_m} \quad (8)$$

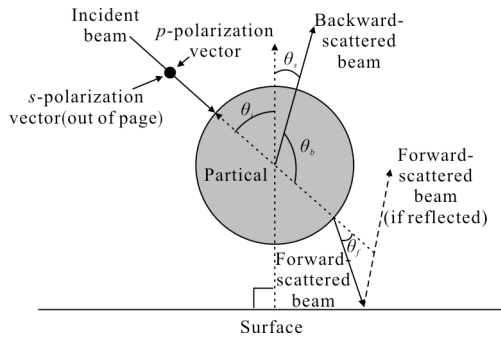


图4 光线经过颗粒的散射光路结构

Fig.4 Geometry for Mie scattering of a particle on an optical surface

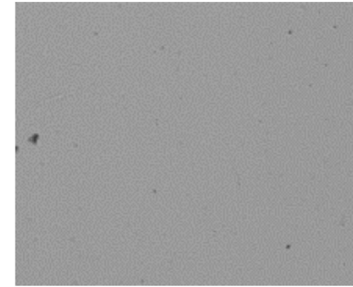
$$\operatorname{BRDF}(\theta_s) = \frac{1}{(2\pi/\lambda)^2 \cos\theta_s} \sum_{i=1}^N f(D_i) \cdot \left[ \frac{R I_s(D_i \cdot \theta_i) + R I_p(D_i \cdot \theta_i) + I_s(D_i \cdot \theta_b) + I_p(D_i \cdot \theta_b)}{2} \right] \quad (9)$$

$$\operatorname{BTDF}(\theta_s) = \frac{1}{(2\pi/\lambda)^2 \cos\theta_s} \sum_{i=1}^N f(D_i) \cdot \left[ \frac{T I_s(D_i \cdot \theta_i) + T I_p(D_i \cdot \theta_b)}{2} \right] \quad (10)$$

在利用米氏散射理论模拟了单个粒子散射之后,接下来需要关注粒子分布模型。目前模拟颗粒分布使用最广泛是 Institute of Environmental Sciences and Technology (IEST) 的 IEST-STD-CC1246D 模型<sup>[15]</sup>。其函数表达式如公式(11),其中  $N_p$  为每  $0.1 \text{ m}^2$  中直径大于  $D$  的粒子数目, $S$  为颗粒的分布斜率。该模型通过清洁度(CL)与表面最大颗粒直径  $D_{\max}$  预测表面的粒子分布,一旦 CL 与  $D_{\max}$  值确定即可以与米氏散射理论联立确定镜面颗粒散射的 BSDF。该标准适用于直径大于  $1 \mu\text{m}$  的颗粒散射。

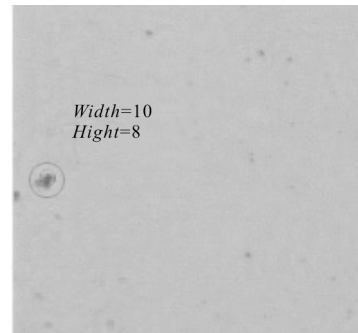
$$N_p(S, CL, D) = 10^{|\log_{10}^2(CL) - \log_{10}^2(D)|} \quad (11)$$

最大颗粒直径可通过 50 倍放大倍率显微镜连接图像摄取装置观测待测光学面,拍摄颗粒分布图像如图 5 (a) 所示,将图像摄取装置获得图像输入 MATLAB 后进行归一化,然后灰度反转得到灰度图像。对灰度图像进行画板扩展以确保边缘图像可以检测;加入微小随机扰动后寻找最大值坐标;以该坐标为中心划出方形区域,并更改该区域像素值为 0.5,此时最大值即为颗粒点,找到后标记并继续寻找,直到找出所需数量的颗粒坐标;与此同时,对归一化并灰度反转的图像进行二值化,如上所述进行画板扩展;以找到的颗粒坐标为中心划出正方形区域,该区域加和即为颗粒大小;横向加和取大于 0 的像素个数为纵向宽度,纵向加和取大于 0 的像素个数为横向宽度;最终找出所需数量的颗粒大小和两个方向宽度,将宽度乘以图像摄取装置单位像素直径即为颗粒两个方向宽度。处理结果如 5(b) 所示,算法流程如图 6 所示。最大颗粒直径为  $420 \mu\text{m}$ ,查表



(a) 显微镜获取的光学面

(a) Optical surface obtained by microscope



(b) MATLAB 识别的颗粒占 CCD 像素个数

(b) Number of particle account for CCD pixels recognized by MATLAB

图5 颗粒直径获取示意图

Fig.5 Schematic diagram of the particle diameter acquisition

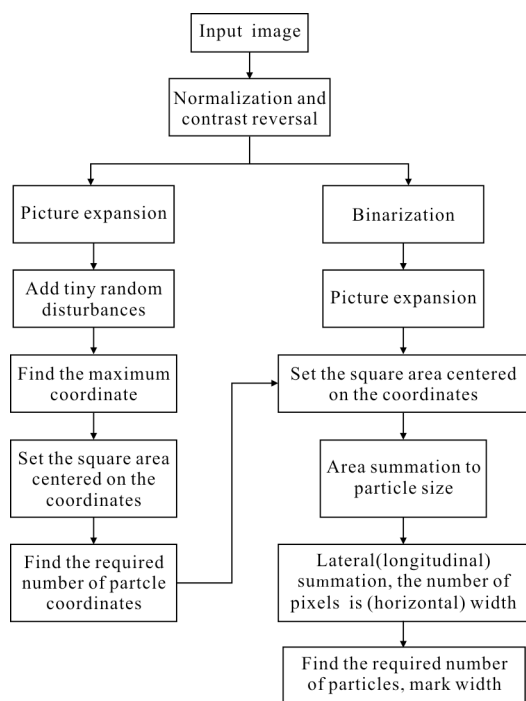


图 6 颗粒直径识别算法流程图

Fig.6 Algorithm flow chart of particle diameter recognition

确定 LAMOST -HRS 工作环境下 IEST -STD -CC1246D 模型斜率  $S$  为  $-0.926$ , CL 值约为  $400^{[16]}$ 。通过杂散光分析软件即可计算出光学面颗粒污染 BPDF, 函数图如图 7 所示, 图中不同颜色曲线代表不同入射角。

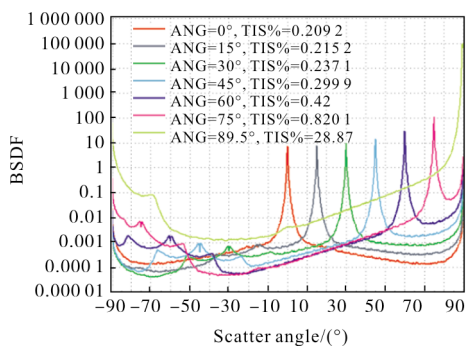


图 7 颗粒散射 BPDF 绘图: IEST-STD-1246D, CL400

Fig.7 BPDF scattering particles plot:  
IEST-STD-1246D, CL400

### 2.3.3 光学面镀膜与机械表面黑处理

LAMOST-HRS 光学面镀膜数据由 Macleod 膜系设计软件导入, 机械表面涂黑漆, 选用 Aeroglaze Z306 数据<sup>[17]</sup>, 其 BPDF 如图 8 所示, 在  $0^\circ$  入射时其 TIS 为 4%, TIS 随入射角增大而增加, 直至 18.04%。

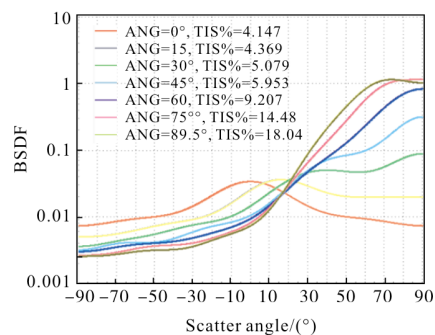


图 8 BPDF 绘图: Aeroglaze Z306

Fig.8 BPDF plot: Aeroglaze Z306

## 3 结果

在进行杂散光光线追迹前, 首先要识别关键面与照明面。如果一个物面既不是关键面也不是照明面, 可认为其对杂散光无贡献, 取消该物面追迹以提高杂散光分析效率。最终杂散光分析模型如图 9 所示。分析模型以狭缝为光源, 选取 150 个参考波长, 入射能量为 1, 不考虑衍射效率。在杂散光分析软件中进行高级光线追迹后, 获得 CCD 面辐照度对数图, 如图 10 所示。预估杂散光背景如表 3 所示, 可以看出对于 LAMOST-HRS, 在任何不同级次下, 杂散

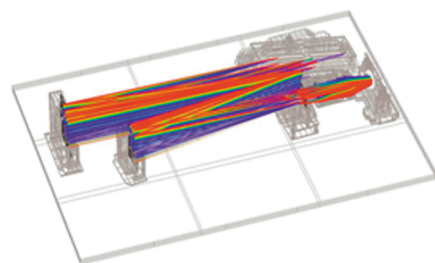


图 9 杂散光分析最终模型示意图

Fig.9 Final model schematic diagram of stray light analysis

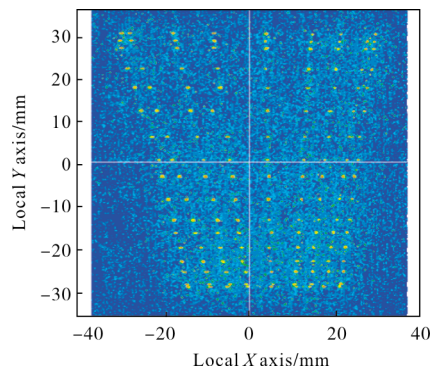


图 10 CCD 面辐照度扩散函数示意图

Fig.10 Irradiance spread function of CCD surface

光都由散射主导,鬼像能量微弱。各光学元件对杂散光贡献百分比如表 4 所示,7 镜透射式相机对 CCD 面杂散光贡献最大。LAMOST-HRS 最终杂散光分析报告如表 5 所示,在入射光线能量为 1 时,CCD

表 3 预估杂散光背景

Tab.3 Estimation of stray light background

Level	Ghost image		Scatter	
	1	2	1	2
Mechanical structure	0%	0%	0%	0.01%
Optical surface	0.07%	0.13%	2.49%	0.04%

表 4 LAMOST-HRS 杂散光组成

Tab.4 LAMOST-HRS stray light components

Item	Proportion of stray light
Collimator 1	6.24%
Collimator 2	4.17%
Folding mirror 1	5.43%
Folding mirror 2	4.34%
Echelle grating	6.84%
Prism	7.75%
Field mirror	13.32%
Camera lens 1	6.97%
Camera lens 2	8.42%
Camera lens 3	7.32%
Camera lens 4	7.75%
Camera lens 5	7.86%
Camera lens 6	7.71%
Camera lens 7	7.11%
Mechanical structure	0.48%

表 5 LAMOST-HRS 杂散光分析结果

Tab.5 LAMOST-HRS stray light analysis result

Item	Parameter
CCD surface total illumination	3.15E-01
Average illumination	5.75E-05
Standard deviation	1.06E-03
Stray light illuminance	0.79E-02
Signal to noise ratio	16.01
Stray radiation rate	2.55%

面总照度为 0.31,杂散光照度为 0.079,占 CCD 面总照度 2.55%,CCD 杂散光信噪比为 16.01 dB。

## 4 结论

文中基于 LAMOST-HRS 实际测量参数构建杂散光分析模型。应用显微镜连接图像摄取装置观察光学面,通过 MATLAB 图像处理的方式获取颗粒散射模型关键参数。通过测量光学面粗糙度数据计算光学面粗糙度引起的散射,最终实现了在不测量 BSDF 的情况下预估杂散光背景,分析了杂散光组成。分析结果表明,LAMOST-HRS 的杂散光主要由光学面散射主导,7 镜透射式相机对 CCD 面杂散光贡献最大。系统存在鬼像路径,但对杂散光贡献微弱。LAMOST-HRS 杂散辐射率为 2.55%,信噪比为 16.01 dB。

这种杂散光分析方法可以在概念设计阶段快速进行杂散光分析,为详细设计阶段进一步优化光机结构优化、提升整体工作效率提供关键支撑。

## 参考文献:

- [1] Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. LAMOST spectral survey -an overview [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(7): 723-734.
- [2] Zhao Y H, Chu Y Q, Li G P, et al. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12 (9): 257-260.
- [3] Cui Xiangqun, Su Dingqiang, Li Guoping, et al. Experiment system of LAMOST active optics [C]// SPIE, 2004, 5489: 974-985.
- [4] Su D Q, Cui X Q. Active optics in LAMOST[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2004, 4(1): 1-9.
- [5] Cui Xiangqun. Preparing first light of LAMOST [C]// SPIE, 2008, 7012: 788329.
- [6] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance [M]. Washington: Institute for Basic Standards National Bureau of Standards, 1977.
- [7] Guo Yongxiang, Li Yongqiang, Liao Zhibo, et al. Novel design of off-axis three reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 546-550. (in Chinese)

- 郭永祥, 李永强, 廖志波, 等. 新型离轴三反射光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 546-550.
- [8] Cao Zhirui, Fu Yuegang. Research on high performance light trap technology for PST test [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0117006. (in Chinese)  
曹智睿, 付跃刚. 点源透射比测试的高性能光陷阱技术研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0117006.
- [9] Malacara D. *Optical Shop Testing*[M]. 3rd ed. US: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [10] Zhu Y, Hu Z, Zhang Q, et al. A multipurpose fiber-fed VPHG spectrograph for LAMOST [C]//SPIE, 2008, 6269: 62690M.
- [11] Hou Y H, Wang L, Hu Z W, et al. The LAMOST low resolution spectrograph stability performance [C]//SPIE -International Society Optical Engineering, 2012, 8846: 884660.
- [12] Zhu Y T, Wu X H, Wang L, et al. High -resolution spectrograph with R4 echelle for LAMOST [C]//SPIE, International Society for Optics and Photonics, 2004, 5492: 401-410.
- [13] Fest E C. *Stray Light Analysis and Control* [M]. US: SPIE Press, 2013.
- [14] Wriedt T, Hergert W. *The Mie Theory* [M]. Berlin: Springer Press, 2007.
- [15] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. US: John Wiley & Sons Inc, 1983.
- [16] Xiao Jing, Zhang Bin, Yao Xiuwen, et al. Influence of contaminated mirror on the stray radiation performance of infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 402-407. (in Chinese)  
肖静, 张斌, 姚秀文, 等. 镜面污染对红外光学系统杂散辐射性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 402-407.
- [17] Borson E N, Swales A. *IEST -STD -CC1246D: Product cleanliness levels and contamination control program* [S]. Rolling Meadows: Institute for Environmental Science and Technology(IEST), 2002.