

## 星载大气主要温室气体监测仪杂光模拟分析

李双, 裘桢炜, 王相京

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 光学遥感中心,  
中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 杂散光分析是提高信噪比, 保证测量精度的关键手段之一。依据星载大气主要温室气体监测仪光学系统结构及其工作特点, 设计了仪器的外遮光罩和前置望远系统的遮光筒。建立仪器的三维实体模型, 利用 Tracepro 软件对仪器氧气通道(758~768 nm)的杂散光进行了分析, 给出系统杂散光点源透射比(PST, Point Source Transmittance)曲线, PST 在  $30^\circ$  离轴角小于  $5 \times 10^{-7}$ 。依据 PST 拟合曲线, 通过积分计算得到杂散光系数小于 4%。结果表明: 杂散光抑制措施效果明显, 杂散光水平达到了设计指标要求。

**关键词:** 空间外差光谱仪; 杂散光; 遮光罩; 点源透射比

**中图分类号:** O433.1; TN214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0616-04

## Stray light simulation and analysis of space-borne spatial heterodyne spectrometer for monitoring greenhouse gases

Li Shuang, Qiu Zhenwei, Wang Xiangjing

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Optical Remote Sensing Center, Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Stray light analysis in optical system is a key means to improve the signal to noise ratio and ensure the measurement accuracy. Based on the optical system structure and working mode of space-borne spatial heterodyne spectrometer for monitoring greenhouse gases, the outer and inner light shield was designed. With the Tracepro model, the stray light of oxygen channel (758–768 nm) in the system was simulated and evaluated, then (PST, Point Source Transmittance) of the system was calculated, PST values were less than  $5 \times 10^{-7}$  at the offaxial angle of  $30^\circ$ , and the stray light coefficient was less than 4%. The obtained PST value and the stray light coefficient shows that the light baffle and other mechanisms have suppressed the stray light effectively, and the stray light suppressing level of the system satisfied the requirement of design.

**Key words:** spatial heterodyne spectrometer; stray light; light baffle; PST

## 0 引言

大气中温室气体作为连接陆地、海洋碳交换的主要介质,对于理解全球碳循环及气候变化过程起着关键作用,因此温室气体的全球监测对于气候变化研究有重要意义<sup>[1]</sup>。传统的地基探测方法虽然具有精度高、可靠性强的优点,但是都是单点的测量,缺乏对区域和全球大范围实时探测的能力和统一的探测方法,因此发展卫星观测温室气体的方法和技术势在必行。

目前美国和欧洲等航天发达国家均开展了针对温室气体监测的星载高光谱技术的研究,多颗高光谱探测卫星进入运行轨道并开始发挥重要作用<sup>[2-3]</sup>。该课题组开展的星载大气主要温室气体监测仪的研究就是致力于发展国内大气温室气体监测的有效载荷,其采用空间外差光谱探测技术<sup>[4]</sup>,综合光栅及FTS技术的特点,同时具有干涉仪的高通量和光栅空间衍射特点,该仪器将为全球主要温室气体的监测提供有效的技术手段。

大气主要温室气体监测仪探测目标信号为温室气体的吸收线,为了精确反演温室气体的柱浓度,要求光谱分辨率极高,属超光谱级别,其探测信号通常很微弱,因此杂散光的抑制是保证此仪器测量精度与信噪比的关键因素之一。为保证星载大气主要温室气体监测仪的探测精度,文中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结构设计、内遮光筒挡光环设计和其他消杂光措施采用。建立了仪器的结构三维模型,利用 Tracepro 软件对系统中氧气通道的杂散光进行了模拟分析,计算了系统(PST,Point Source Transmittance),评价了系统的杂散光系数水平。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。

## 1 星载大气主要温室气体监测仪系统

大气主要温室气体监测仪采用空间外差光谱探测新技术获取  $O_2(0.76 \mu\text{m})$ 、 $CO_2(1.575 \mu\text{m}、2.05 \mu\text{m})$  和  $CH_4(1.65 \mu\text{m})$  波段大气高分辨率吸收光谱信息,反演大尺度范围上的大气主要温室气体浓度含量数据,从而为“源”与“汇”分析、污染减排和环境外交服务。仪器测量的光谱范围为  $759\sim 2\,058 \text{ nm}$ ,由 4 个光

谱通道( $759\sim 769 \text{ nm}$ 、 $1\,568\sim 1\,583 \text{ nm}$ 、 $1\,642\sim 1\,658 \text{ nm}$  和  $2\,043\sim 2\,058 \text{ nm}$ )组成,它采用空间外差干涉技术实现超光谱探测。仪器的望远镜视场为  $14.6 \text{ mrad}$ ,飞行高度为  $708 \text{ km}$ ,利用望远镜前端的二维指向镜实现沿轨和穿轨扫描测量。

仪器接收的入射光通过二维指向镜反射后进入格利高里离轴反射望远镜,光束直径被压缩后通过分色片组分为 4 个光谱通道,每个通道入射光分别通过由分束器、扩视场棱镜以及闪耀光栅组成的干涉主体进行干涉调制,完成干涉后分别被成像镜头成像至 CCD 或 InGaAS 探测器,经数据采集、干涉光谱数据预处理传输至输出。仪器的 4 个通道光路类似,杂散光分析方法一致,文中以其中的氧气通道为例进行杂散光分析。

## 2 系统遮光罩设计

### 2.1 外遮光罩设计

仪器的外遮光罩结构由指向镜二维扫描范围( $X$ 轴方向 $\pm 20^\circ$ , $Y$ 轴方向 $\pm 35^\circ$ )和仪器本体尺寸决定,其临界角分别为 $X$ 方向 $67^\circ$ 和 $Y$ 方向 $75^\circ$ ,因此外遮光罩只能遮挡一些大角度杂散光,图 1 给出了外遮光罩的结构图示意图。

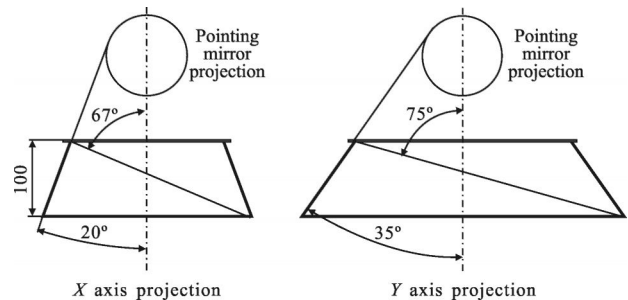


图 1 外遮光罩结构示意图

Fig.1 Design of outer light baffle

### 2.2 内遮光罩设计

该仪器的前置望远系统为格里高利结构,主要功能为实现光束口径的压缩以满足后续光路的需要,为了避免中心遮挡,采用离轴方式,指向镜处于系统的入瞳处。

系统内遮光罩主要是限制一定角度的杂散光直射到主镜上,使得到达主镜表面的杂散光至少经过一次散射衰减,据几何光学原理,完成内遮光罩挡光环设计。具体作图方法如图 2 所示,从遮光罩入口

下端向主镜上边沿 A 点作直线交光线边沿于一点 B,过 B 点作垂线交筒壁于 D 点,则 D 点处即为第一个挡光环的位置,BD 的高度即为第一个挡光环的高度,然后由主镜下端 C 点作过 B 直线,交筒壁于 E,连接 E 点与入口下端,交光线边缘于 F,过该点作垂线交筒壁于 G 点,则点 G 即为第二个挡光环的位置,其他挡光环位置以此类推。利用 AUTOCAD 软件可以精确地获取挡光环的位置与高度。挡光环的高度为 15 mm,挡光环的个数为 6 个,为了不使大离轴角的光经过刀口斜面散射进入系统内部,挡光刀片的角度为 60°,刀口朝外,遮光筒内壁喷涂消光黑漆。不仅如此,由于望远系统为格里高利形式,为了消除杂散光,在中间像面加视场光阑,在系统的出瞳处加里奥光阑,这样可以尽可能的减少杂光的传输。由于在系统为离轴使用,因此在子午和弧矢两个方向是非对称的,遮光筒也做成异性结构,尽可能的布置挡光结构以遮挡杂散光进入。

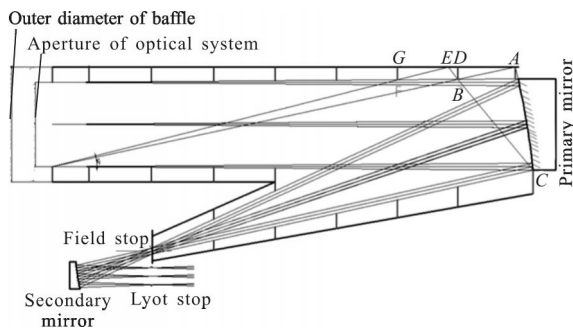


图 2 内遮光罩挡光环设计  
Fig.2 Design of inner light shield

2.3 其他消光设计

(1) 准直系统和成像系统结构紧凑,无法进行消杂光光阑的设置,但其皆有中间像面,因此在中间像

面设置视场光阑,最大限度降低杂光的传输。

(2) 提高透射光学元件增透膜的增透效率,透镜边缘涂覆高吸收的消光涂料,降低由透镜表面和边缘散射造成的杂散光。

(3) 结构内壁采用 AeroglazeZ306 黑色吸收涂层以降低镜筒内壁造成的杂散光,比如电机的表面,指向镜 U 型架表面,镜筒内壁等。

3 系统建模与分析

3.1 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 3 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)采用 ABg 形式,其中 A,B,g 是确定 BRDF 函数的 3 个参数。为简化起见,将模型的所有表面大致分为三类:透镜表面、反射镜表面和涂黑表面,通过实测以及参考文献[5-6]建立各表面的 ABg 参数见表 1。

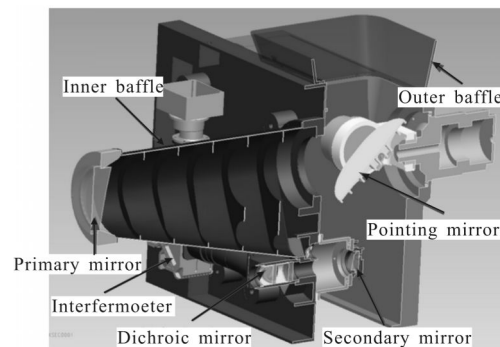


图 3 仪器三维模型  
Fig.3 3D model of the instrument

表 1 ABg 散射模型参数

Tab.1 Parameters of ABg scattering model

Item	Transmission	Reflectance	Absorption	Parameters of BRDF model		
				A	B	g
Surface of lens	0.98	0.01		1E-5	0.01	2
Surface of reflector		0.98	0.005	6.385E-6	0.0001	2.172
Surface of black painted		0.02	0.95	0.007	0.1	0
Surface of dichroic filter		0.98	0.005	6.385E-6	0.0001	2.172
				Parameters of BTDF model		
Surface of lens	0.98	0.01		1E-5	0.015	2

### 3.2 点源透射比 PST 曲线的计算

点源透射比 PST 在国际上已经普遍地被用于评价光机系统的消杂光特性<sup>[5]</sup>。它是表示系统本身对杂光抑制水平的一个指标,与杂光源的个数和杂光源的辐射强度无关。PST 的定义<sup>[6]</sup>:光学系统视场外离轴角度为  $\theta$  的点光源经过光学系统后在像面产生的辐照度与垂直于该点源的输入孔径上的辐照度的比值。显然,PST 越小则表示系统杂光抑制能力强,系统性能好。

根据 PST 的定义,用有效视场外点光源入射,分别在  $x, y$  两个方向上追迹,离轴角度分别设定为  $0.65^\circ, 1.15^\circ, 1.65^\circ, 4.65^\circ, 9.65^\circ, 14.65^\circ, 19.65^\circ, 29.65^\circ$ 。为了达到准确的仿真结果,最终确定追迹光线数目为 100 000 条,追迹阈值为  $1 \times 10^{-10}$ 。通过光线追迹确定像面处辐照度的平均值,根据定义来计算 PST 值。根据追迹结果计算出的不同入射角的 PST 值,绘制出 PST 曲线,如图 4 所示。从图中可以看出,曲线基本呈平滑下降的趋势,在离轴角小于  $5^\circ$  时,曲线衰减很快,在  $5^\circ$  附近达到  $10^{-4}$  量级。

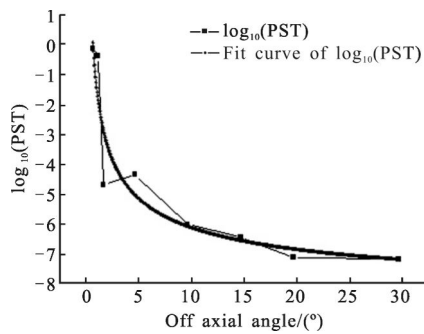


图 4 大气主要温室气体监测仪杂光分析 PST 曲线及其拟合

Fig.4 PST and fitting curve of the Greenhouse gas monitoring instrument stray light analysis

根据光线追迹得到的数据,用 Matlab 编程对测得的 PST 数据进行曲线拟合,采用的方法为最小二乘曲线拟合方法,得到的曲线拟合方程为:

$$\log_{10}(\text{PST}(\theta)) = 7.54 * \theta^{-0.4204} - 8.974 \quad (1)$$

依据杂光系数定义可得<sup>[7-8]</sup>:

$$V = \frac{E_d}{E} \frac{2\pi L \tau \int_{1^\circ}^{40^\circ} \text{PST}(\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta}{\frac{\pi \tau L}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2} = 8 \left(\frac{D}{f}\right)^2 \int_{1^\circ}^{40^\circ} \text{PST}(\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (2)$$

式中: $V$  为系统的杂光系数; $E_d$  为杂光积分照度; $E$  为中心视场像面照度; $f$  为系统焦距; $\theta$  为离轴角。在  $1^\circ \sim 40^\circ$  对 PST 进行积分,得到 PST 总的积分值为  $1.4187e-004$ ,根据公式(2)得到杂光系数  $V=2.82\%$ 。从模拟分析结果可以看出,系统的杂光系数达到了 GB9917-88 对于一级相机像面上杂光系数小于 3% 的要求,能够满足仪器指标要求。

### 4 结 论

根据仪器光学系统结构特点,针对杂散光抑制工程需要设计的相应的遮光筒和遮光罩。建立了系统三维实体模型,利用 tracepro 软件对模型进行了模拟分析,获取了系统的 PST 曲线,利用数据拟合给出了在离轴角  $1^\circ \sim 40^\circ$  范围内的杂光系数。分析结果表明离轴角大于  $20^\circ$  以后 PST 达到了  $10^{-6}$  的量级,在离轴角  $1^\circ \sim 40^\circ$  范围内的杂光系数达到了一级相机的要求。通过分析结果可以看出,通过遮光结构的设计以及其他消光措施的使用,杂散光的抑制效果明显,杂光水平满足仪器设计要求,这为仪器获取高精度的测量数据提供了保障。

### 参 考 文 献:

- [1] Hou Shanshan, Lei Liping, Guan Xianhua, et al. A general introduction to greenhouse gases observing satelliter(GOSAT) and its products [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(2): 269-275. (in Chinese)
- [2] Liu Yi, Lv Daren, Chen Hongbin, et al. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(2): 247-254. (in Chinese)
- [3] Zhen Yuquan. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 546-561. (in Chinese)
- [4] Harlander J. Spatial heterodyne spectroscopy interferometric performance at any wavelength with-out scanning [D]. Madison: University of Wisconsin, 1991.
- [5] Huang Qiang. Analysis of stray light in space optical system [J]. *Infrared*, 2006, 27(1): 26-33. (in Chinese)
- [6] Gary L P. Stray light calculation methods with optical raytrace software[C]//SPIE, 1997, 3780: 132-137.
- [7] Li Hui, Li Yingcai, Xue Mingqiu. The relationship between the method of black macula and PST [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25(10): 920-922. (in Chinese)
- [8] Li Yan. Optical design and stray light analysis of the high resolution hyper-spectral imager based on LASAS theory[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)