

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计

司福祺 江宇 江庆五 薛辉 周海金 刘文清

(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 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪通过获取地球大气或地表反射、散射的紫外/可见光辐射, 监测大气痕量气体的全球分布。为实现大视场、紫外/可见光宽波段探测、高光谱分辨率和小型化等研制目标, 设计了一种前置光学系统, 具体由前置望远镜和中继光学系统构成。其中, 前置望远镜通过两片偏轴球面镜实现在交轨方向 114° 视场的覆盖; 中继光学系统则通过中继反射镜、分色片及中继镜头将探测光谱 ($240\sim 710\text{ nm}$) 分为 4 个光谱通道, 并将各谱段的光分别导入各自光谱成像系统中进行探测。设计结果表明, 前置光学系统在大视场范围内、在探测的紫外/可见光宽波段内均能具有良好的成像结果, 为后续的光谱成像达到高光谱分辨率提供了保障。前置光学系统整体体积紧凑, 重量轻, 在无摆扫前提下, 满足大视场需求以及适应星载等平台的搭载需求。

关键词 光学设计; 大气痕量气体差分吸收光谱仪; 前置望远镜; 偏轴; 中继光学系统

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0322002

Design of Fore Optical System in Space-Borne Differential Optical Absorption Spectrometer for Atmospheric Trace Gas Monitoring

Si Fuqi Jiang Yu Jiang Qingwu Xue Hui Zhou Haijin Liu Wenqing

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

Abstract Space-borne differential optical absorption spectrometer is used for atmospheric trace gas distribution monitoring through acquiring high accuracy ultraviolet/visible (UV/VIS) radiation scattered or reflected by air or earth surface. To achieve the goals of large view angle, wide UV/VIS waveband detection, high spectral resolution and compact structure in space, a fore optical system is designed. It includes fore-optics telescope and relay optical system. To detect viewing field at 114° in cross-orbit direction, fore-optics telescope with two pieces of off-axis spherical mirrors is designed. Relay optical system consists of relay mirror, color-separation filters, and relay lens, which separates the incident light into four spectral channels covering $240\sim 710\text{ nm}$. Then we import each beam of light into corresponding spectral imaging channels respectively. The design result shows that the fore optical system works efficiently inside the field of view for both UV and VIS waveband, providing good imaging quality. That makes it possible to implement high spectral resolution of subsequent systems. The fore optical system has more compact structure and lighter weight comparing with other products. It can meet the requirement of spaceborne and airborne platforms without using a scan mirror.

Key words optical design; space-borne differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring; fore-optics telescope; off-axis; relay optical system

OCIS codes 120.4570; 120.6200; 220.4830

1 引言

目前我国在轨运行的观测卫星尚无法提供区域范围的影响全球变化的关键大气污染成份(如

NO_2 、 SO_2 、 BrO 和 HCHO 等)的信息, 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪天底推扫测量紫外/可见(UV/VIS)散射光信息, 既可以通过差分吸收光谱

收稿日期: 2012-09-24; **收到修改稿日期**: 2012-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(41275037)和公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201106045-1)资助课题。

作者简介: 司福祺(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事紫外和可见光谱遥感等方面的研究。

E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

(DOAS)算法从较窄的特征吸收线中定量反演出全球/区域痕量气体成分 NO_2 、 SO_2 和 O_3 等浓度,又可以从宽带散射特征线中提取出气溶胶的分布和变化信息。这种独特的全球覆盖、快速、多光谱和大信息量的特点在环境监测领域具有很大的应用潜力^[1]。

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪在太阳同步轨道进行天底观测,通过推扫获取高光谱、高空间分辨率的光谱信息。为实现一天内完成对地球的实时监测,即需要满足轨道覆盖 2600 km 跨度^[2],根据卫星所处的高度要求,系统需具有 114° 的交轨视场。星载大气痕量气体差分吸收光谱仪由两部分组成,前置光学系统和光谱成像系统。其中前置光学系统,是一种望远成像系统,实现将地物目标的一个条带成像在光谱成像系统的入射狭缝上^[3]。光谱成像系统采用的是 Offner 凸面光栅光谱成像系统^[4]。为了与 Offner 光谱成像系统光瞳相匹配,前置光学系统需具有像方远心的结构。为满足痕量气体反演对光谱分辨率、信噪比的要求,系统在宽波段范围内应具有较高的分辨率与较大的相对孔径。

前置光学系统是星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的关键部分,为了满足大视场角、高分辨和无偏振效应等技术要求。而针对此设计要求,目前常用的前置光学系统存在视场过小,整体光学系统体积偏大,后续成像光谱仪的排布不合理等状况,须对现有的前置光学系统进行改进。本文阐述了星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统的详细设

计,包括设计原则、详细设计参数确定以及成像质量分析,为星载光谱成像技术的前置光学系统研制提供了设计参考。

2 前置光学系统结构选择

针对所要测量的主要气体成分 NO_2 、 SO_2 、 O_3 及气溶胶载荷选取探测光谱范围为 240~710 nm,考虑这些气体的“窄带”特征吸收光谱结构^[5],选择光谱分辨率为 0.3~0.5 nm。为实现同时具有宽的光谱范围和较高的光谱分辨率,将光谱范围分为四段(通道):240~315 nm、311~403 nm、401~550 nm 和 545~710 nm,该光谱范围包括了上述主要污染气体的特征吸收谱带。

目前国内外常用的前置光学系统主要为离轴非球面三反射镜系统(TMA)、卡式折反射系统和短焦距折射式光学系统等。其中卡式系统技术比较成熟,由两个同轴非球面和折射场镜组成,但有中心遮拦,分辨力稍低,杂光较大,需要加外遮光罩;TMA系统是近些年发展的新型光学系统,由3块非球面反射镜组成,无中心遮拦,分辨率高,但加工和装调比较难;折射式系统主要用于推扫式机载高光谱成像仪^[6],但这样的系统不太适用于宽波段系统,尤其是所测波段包括紫外波段,受紫外玻璃材料限制,优先考虑反射式结构。反射系统不产生色差,孔径可以做得较大,易于轻量化,在抗热性方面有较强的优势,而且可以通过使用非球面来校正像差,可以使系统结构简单,像质优良^[7]。

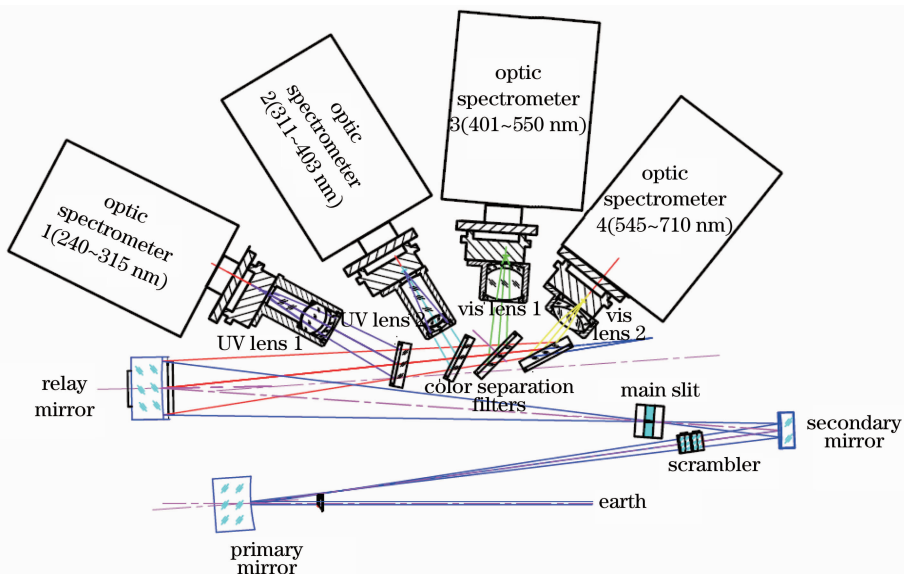


图 1 大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统

Fig. 1 Fore-optics construction of differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring

为实现大视场角、高分辨率和无偏振效应等技术要求,同时考虑适应空间结构的安排,后续成像光谱仪的位置摆放紧凑、合理等工程要求,星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的前置光学系统设计为两部分:前置望远镜和中继光学组件。其中前置望远镜使用偏轴两镜反射结构,即前置望远镜采用偏轴结构,中心视场主光线与镜面的对称轴有一个夹角的光学结构。镜面在偏轴状态往往要引起很大的像差,这时必须靠副镜加以矫正,以达到在一定视场内有足够的像质。在没有摆扫机构的前提下,可以实现交轨视场 $\pm 57^\circ$ 的大视场,沿轨方向 $\pm 0.25^\circ$ 。中继光学系统将前置望远镜所成像进行二次聚焦、使其缩小光斑、优化像质,同时起到转折光路,将入射光分光到相应的四路光谱仪作用。其光学结构示意图如图 1 所示。

3 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的前置光学系统分为两部分:前置望远镜和中继光学组件。根据总体的设计需求,前置光学系统要求在没有摆扫机构的前提下,实现交轨视场满足 $\pm 57^\circ$ 的大视场,沿轨方向 $\pm 0.25^\circ$,满足光谱探测范围 240~710 nm,同时满足仪器实现光谱分辨率 0.3~0.5 nm 的要求。由于本系统中的光谱成像系统采用了 Offner 凸面光栅光

谱成像系统,这里设计了中继光学组件将前置望远镜所成像进行二次聚焦,以方便后续成像光谱仪探测。通过中继反射镜、分色片及中继镜头将探测光谱分为 4 个光谱通道:240~315 nm、311~403 nm、401~550 nm、545~710 nm,将各谱段的光分别导入到各自光谱通道中进行探测。系统主要光学设计指标如下:光谱范围 240~315 nm、311~403 nm、401~550 nm、545~710 nm;视场角 $114^\circ(\text{交轨方向}) \times 0.5^\circ(\text{沿轨方向})$;系统视场光阑 $29 \times 0.3 \text{ mm}$;光谱仪入射狭缝 $12 \text{ mm}(\text{长度}) \times 60 \mu\text{m}(\text{宽度})$;前置光学系统工作 F 数 3.2。

3.1 前置望远镜设计

前置望远镜通过两片离轴球面镜来完成的,通过控制孔径光阑的位置校正像差,第二块离轴球面反射镜的放大比接近 1:1,主要用于校正像差和光路排布,系统的两片反射镜是长条形的。因为系统要求的空间分辨率非常高,达到了 $13 \text{ km} \times 48 \text{ km}$,所以前置望远镜的等效焦距非常短,设计值为 15 mm 左右,相应的 F 数也较大,设计为 9。

设计偏轴两镜系统^[8],首先是确定其轮廓尺寸。在偏轴两镜系统中,副镜已偏出入射光束,没有遮拦问题,因此系统的光焦度应该合理分配到主镜以及副镜上。因为像差是随相对口径增加,降低主、副镜的相对口径对于设计及加工都是十分重要的,偏轴系统的光路如图 2 所示。

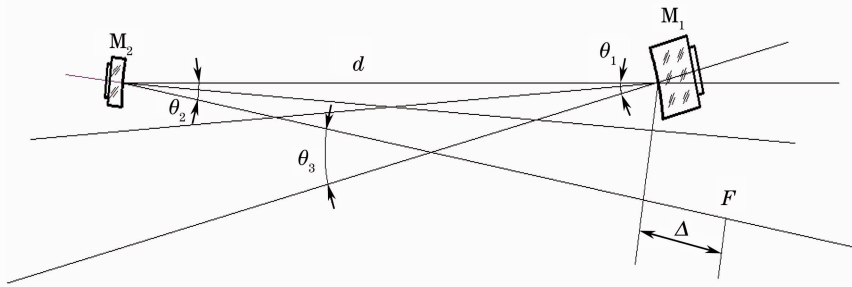


图 2 偏轴系统的光路安排简图

Fig. 2 Schematic diagram of off-axis system's light path

确定轮廓尺寸时,先将偏轴系统作为同轴系统来考虑,如果将主镜 M_1 及副镜 M_2 作为相隔 d 的两个正透镜来看待,必须满足光焦度方程:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2, \quad (1)$$

式中 φ 为系统的光焦度, φ_1 为主镜的光焦度, φ_2 为副镜的光焦度, d 为两镜间的距离,它们均取正值。轮廓尺寸可先按同轴两镜系统来确定,步骤如下:

1) 确定系统的通光口径及相对孔径;

2) 选择主镜的相对口径,也即确定其光焦度 φ_1 ;

3) 确定焦点的引出量 Δ ;

4) 算出 β 值,在此

$$\beta = -\varphi_1; \quad (2)$$

5) 算出 α 值:

$$\alpha = \frac{-f'_1 + \Delta}{f'_1(\beta - 1)}; \quad (3)$$

6) 计算副镜顶点曲率半径 R_2 及两镜间距离 d :

$$R_2 = \frac{\alpha\beta R_1}{\beta + 1}, \quad (4)$$

$$d = f'_1(1 - \alpha), \quad (5)$$

式中 α 为副镜距离第一焦点的距离, β 为副镜的放大倍数, f'_1 为系统中主镜的焦距。至此, 偏轴系统当作同轴系统考虑的轮廓尺寸可以完全确定, 显然, 镜面像差随 θ 角增大而急剧增大的, 因而要使其尽可能小。只要在使用视场范围内, 入射平行光束不被副镜所遮挡, 而从副镜反射的光束不被主镜遮挡, 通过几何关系可求出主镜及副镜的偏角 θ_1 及 θ_2 应满足的关系式为

$$\theta_1 \geq \arcsin\left[\frac{D_1(1 + \alpha)}{2d} + \omega\right], \quad (6)$$

$$\theta_2 \geq \arcsin\left(\frac{D_1}{2d}\right) + \arctan\left(\frac{D_1\Delta}{2fd}\right) + \omega, \quad (7)$$

式中 f 为系统的焦距, ω 为半视场, D_1 为主镜口径, 实际上还要考虑到镜框尺寸, 因此偏角要适当增大。

图 3 是前置望远镜的光路示意图, 光线在 $(114^\circ \times 0.5^\circ)$ 这一视场范围下入射到球面主镜上, 光线经球面主镜聚焦后发散, 经球面副镜聚焦到狭缝处, 在球面副镜的物方焦点上放置孔径光阑, 从而形成像方远心光路, 像方每一视场的主光线平行于狭缝, 相当于出瞳位于无限远, 便于中继光学系统与其连接。图 3 是前置望远镜穿轨方向的光路显示。边缘两条光束代表的是 $\pm 57^\circ$ 视场边缘光线, 其夹角范围内构成了 114° 的宽幅视场。两边缘间的光束经主镜、副镜聚焦到视场光阑处, 形成一长尺度的线光束。从图 4 中可以看出像方远心光路的各视场主光线平行照亮狭缝。

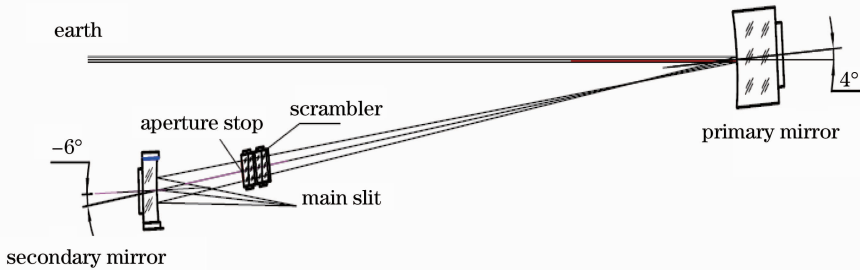


图 3 前置望远镜光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fore-optics telescope

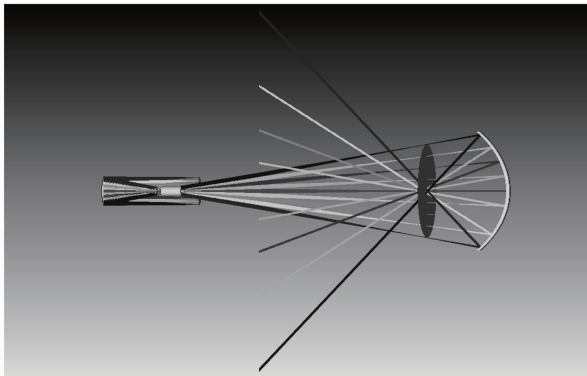


图 4 前置望远镜穿轨方向光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fore-optics telescope on cross track

图 5 给出了前置望远镜在狭缝处成像的点列图, 弥散斑的均方根(RMS)值在 $80 \mu\text{m}$ 以内。需要特别说明的是, 考虑到前置光学系统对于光偏振度的要求, 设计在望远镜孔径光阑前加入了退偏器, 这里采用的是双重巴比特结构的空同伪消偏器^[9], 限于篇幅, 退偏器的设计不作介绍。

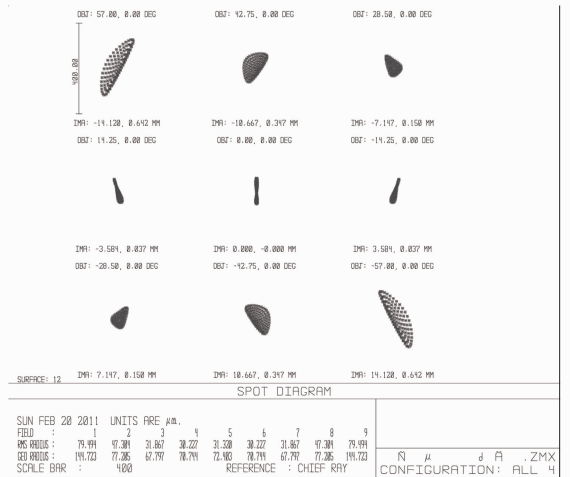


图 5 前置望远镜在主狭缝处弥散斑点列图

Fig. 5 Spot diagram of dispersed spot in main slit of fore-optics telescope

3.2 中继光学组件设计

中继光学组件设计目的是将前置望远镜在视场光阑即主狭缝位置成的像传递到光谱仪的入射狭缝上, 光谱仪的入射狭缝的尺寸设计为 $12 \text{ mm} \times 60 \mu\text{m}$ 。由于探测波段是 $240 \sim 710 \text{ nm}$, 覆盖了紫外/可见光

波段,根据探测器以及后续成像光谱系统的设计,这里将光谱探测波段分为4个通道。中继光学系统利用分色片将前置望远镜经中继反射镜所形成的光谱信息分成4个波段的测量通道,即紫外1通道(240~315 nm)、紫外2通道(311~403 nm)、可见光1通道(401~550 nm)、可见光2通道(545~710 nm)4组,光谱仪前的中继镜头按波段范围分别设计两组紫外镜头和两组可见光镜头。图6为具体的中继光学系统示意图,其中每个通道的分色片的镀膜指标要求尽可能高地提供本通道的光学效率。

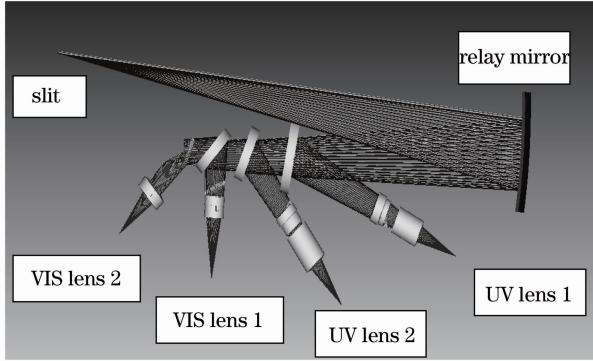


图6 中继光学系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of relay optical system

中继反射镜也是偏轴设计考虑,这里设计偏轴为 5° ,它起到了光路转折的作用,从而使得整个前置光学系统设计紧凑,整体体积小。紫外通道各用了三片透镜,镜头材料考虑二级光谱的校正^[10,11],主要采用了两种材料熔融石英和有特殊色散的光学材料氟化钙,都属于紫外镜片的常用材料,可见光通道各用了两片透镜来实现。尤其在紫外通道尽量避免复杂透射组镜片的使用,从而尽可能增强紫外光谱方面的信噪比。在分色片中保证一部分波段的光谱尽量全反射,另一部分波段光谱尽可能透过,这中间的波段存在交叠,并且随着光束在分色片的入射角变大,交叠区域也会变大,这就要求尽可能在通道波段的边缘地带避免产生影响反演痕量气体的波段区域。

中继镜头四通道的点列图均方根值如图7所示,从图中可以看到,前置望远镜和中继透射镜头组合在一起到光谱仪入射狭缝的像质。从图7中可以看出在入射狭缝的弥散斑均方根值在 $56\ \mu\text{m}$ 范围内,但其 y -RMS(光谱维方向)的值在 $10\ \mu\text{m}$ 以内,光谱维方向的值是高光谱分辨率的关键。光学系统成像质量的好坏目前常用调制传递函数(MTF)来表示,四通道光谱仪入射狭缝的MTF如图8所示。

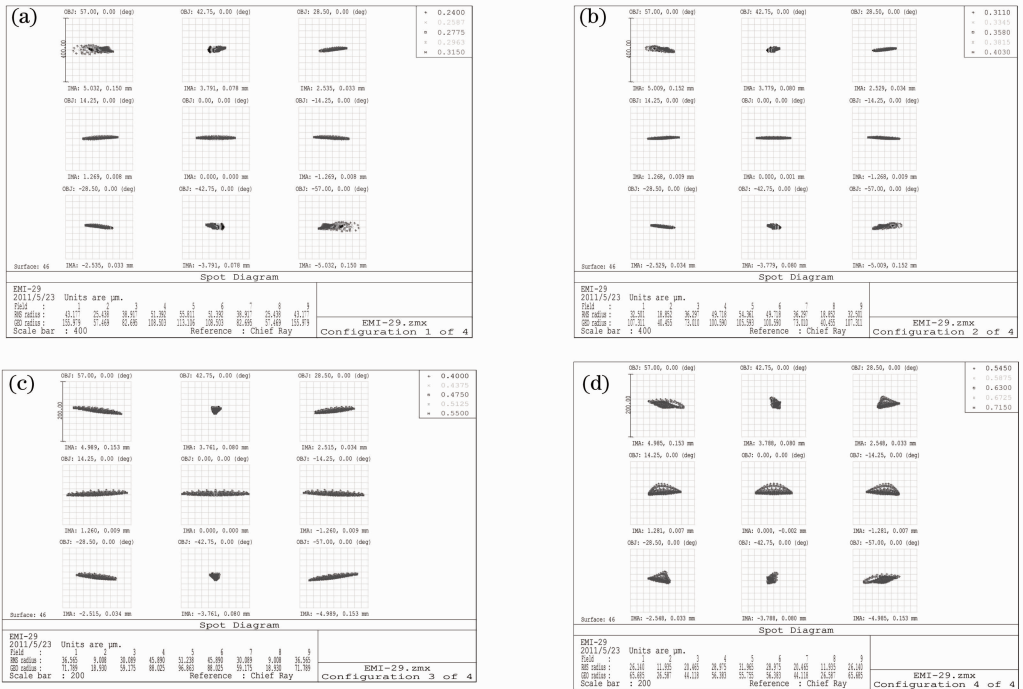


图7 中继镜头四通道成像点列图。(a)中继紫外通道1成像点列图;(b)中继紫外通道2成像点列图;(c)中继可见光通道1成像点列图;(d)中继可见光通道2成像点列图

Fig. 7 Image's spot diagram of relay lens in four channels. (a) Spot diagram of relay UV1 spectral band; (b) spot diagram of relay UV2 spectral band; (c) spot diagram of relay VIR1 spectral band; (d) spot diagram of relay VIR2 spectral band

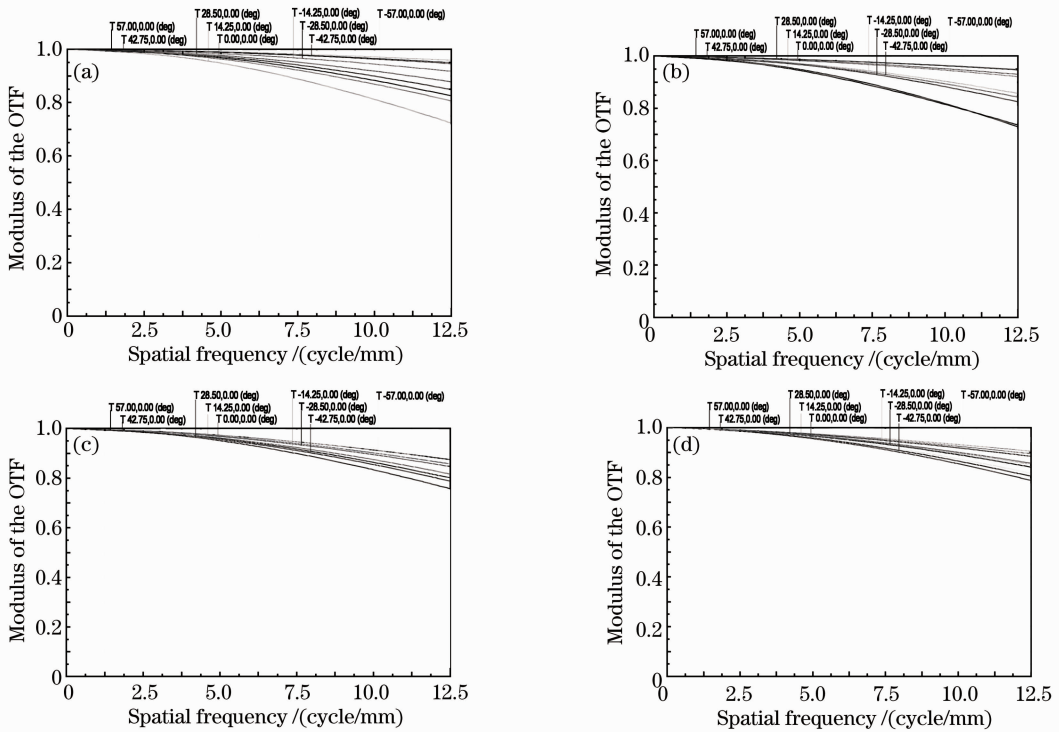


图 8 中继镜头四通道调制传递函数设计结果图。(a)紫外通道 1 调制传递函数图;(b)紫外通道 2 调制传递函数图;
(c)可见光通道 1 调制传递函数图;(d)可见光通道 2 调制传递函数图

Fig. 8 Design results on MTF of relay lens in four channels. (a) MTF of relay UV1 spectral band; (b) MTF of relay UV2 spectral band; (c) MTF of relay VIR1 spectral band; (d) MTF of relay VIR2 spectral band

在图中可以看出 t 方向的 MTF 曲线在指标要求的奈奎斯特频率 (12.5 lp/mm) 下, 全视场全波段 MTF 值可达到 0.7 以上, 满足指标要求, 即光谱维方向的像质较高。

前置光学系统从设计结果可以看出其辐射能量利用效率高。利用中继反射镜将光路转折, 利用分色片将探测波段分为 4 个通道, 简化后续中继镜头组设计, 波段从紫外到可见依次排布, 从而保证紫外波段信噪比的合理利用, 从而提高系统的探测分辨率, 保证测量的准确性。星载差分吸收光谱仪前置光学系统在大视场范围内, 在探测的紫外、可见宽波段内均能取得良好的成像结果, 为后续的光谱成像达到高光谱分辨率提供保证。

4 结 论

本文设计完成了大气痕量气体差分吸收光谱仪的前置光学系统, 成像质量完全达到设计指标。前置光学系统采用宽视场望远镜结合中继光学系统来完成, 宽视场望远镜采用两镜偏轴形成大视场成像。匹配以合理的结构设计, 并保证一定的加工工艺和装校质量, 系统可以实际应用于从 240~710 nm 光

谱区的光谱成像探测, 并为后续的光谱成像系统达到较高的光谱分辨率提供保证。通过 Zemax 光学设计软件进行模拟仿真, 结果显示, 光谱方向的 MTF 在设计波段范围内达到 0.7 以上, 满足成像质量要求。系统采用中继反射镜和四通道分色片、四通道中继镜头组的连接使得整体光学系统大为缩小, 整体的光学体积紧凑, 重量相对其他星载同类产品大为减轻, 且通过视场光阑和前置望远镜的匹配可满足大视场需求, 适应星载等平台的搭载需求。

参 考 文 献

- 1 P. F. Levelt, G. H. J. van den Oord, M. R. Dobber *et al.*. The ozone monitoring instrument. [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, **44**(5): 1093~1101
- 2 M. R. Dobber, R. J. Dirksen, P. F. Levelt *et al.*. Ozone monitoring instrument calibration [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, **44**(5): 1209~1238
- 3 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guangyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution space borne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 082201
- 4 薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0802201
- 5 Tong Yajun, Wu Gang, Zhou Quan *et al.*. Design method of Offner-type imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1148~1152
- 6 佟亚军, 吴刚, 周全等. Offner 成像光谱仪的设计方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1148~1152

- 5 U. Platt, J. Stutz. Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), Principles and Applications [M]. German: Springer, 2008. 625~630
- 6 Liu Guanghong, Wu Gang, Ling Qing *et al.*. Modelling of Offner imaging spectrometers and aberration analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0322001
刘光宏, 吴刚, 凌青等. Offner 成像光谱仪建模及像差分析 [J]. *光学学报*, 2011, **32**(3): 0322001
- 7 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirror [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2001, **9**(4): 315~318
常军, 翁志成, 姜会林等. 长焦距空间三反光学系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(4): 315~318
- 8 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004
- 9 James P. McGuire, Russell A. Chipman *et al.*. Analysis of spatial pseudodepolarizers in imaging systems [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(12): 1478~1484
- 10 Shi Guanghui. High resolution optical systems used to observation from the satellites to the earth and problems in design [J]. *Optics & Precision Engineering*, 1999, **7**(1): 16~24
史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. *光学精密工程*, 1999, **7**(1): 16~24
- 11 Liu Jianpeng, Tang Yi, Huang Gang. Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322007
刘健鹏, 唐义, 黄刚等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322007

栏目编辑: 韩峰