

星载多模式差分吸收高光谱成像仪光学设计

薛庆生

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 星载多模式差分吸收高光谱成像仪是一种新型空间大气探测仪器, 要求同时具有天底、临边和掩日等多模式探测功能, 主要用于二氧化硫、二氧化氮等大气痕量气体探测。提出了利用两个扫描镜切换不同探测模式、利用双光谱仪减小系统的光谱杂光, 利用分色片将工作波段分成 3 个通道实现多模式高光谱分辨率探测的新方法, 设计了一个多模式差分吸收高光谱成像仪光学系统, 瞬时视场为 $1.8^\circ \times 0.04^\circ$, 系统 F 数为 2, 工作波段为 250~500 nm, 分成 250~310 nm、300~410 nm 和 400~500 nm 3 个通道。利用 ZEMAX-EE 软件进行优化设计和分析, 其中 250~310 nm 通道, 光谱分辨率为 0.12 nm, 满足光谱分辨率不大于 0.4 nm 的指标要求; 300~410 nm 和 400~500 nm 通道, 光谱分辨率分别为 0.25 nm 和 0.23 nm, 满足光谱分辨率不大于 0.6 nm 的指标要求。多模式差分吸收高光谱成像仪在空间维方向的调制传递函数(MTF)在特征频率 0.25 lp/mm 处达到 0.98 以上, 能够满足空间多模式差分吸收高光谱大气探测的要求。

关键词 光学设计; 多模式; 差分吸收; 高光谱成像仪; 扫描镜

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0722001

Optical Design of Space-Based Multi-Model Differential Optical Absorption Hyperspectral Imager

Xue Qingsheng

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract Space-based multi-model differential optical absorption hyperspectral imager is a new type space atmospheric sounder. It requires the multi-model sounding functions including nadir, limb and sun occultation. It chiefly sounds the trace gases such as SO_2 , NO_2 and so on. A new method of multi-model sounding with high spectral resolution is proposed. The method uses two-scanning mirrors to switch differential sounding model, double-spectrometers to reduce the spectral stray light, and dichroic filter to divide working waveband into three channels. An optical system of multi-model differential optical absorption hyperspectral imager is designed. The instantaneous field of view is $1.8^\circ \times 0.04^\circ$. The F number of the system is 2. The working waveband is 250~500 nm, which is divided into three channels, the first one is 250~310 nm, the second one is 300~410 nm, and the last one is 400~500 nm. Optimization design and analysis are performed by ZEMAX-EE software. The spectral resolution is 0.12 nm in the waveband of 250~310 nm, which satisfies the requirement specification of no more than 0.4 nm. The spectral resolutions are 0.25 nm and 0.23 nm in the waveband of 300~410 nm and 400~500 nm, respectively, which satisfy the specification requirement of no more than 0.6 nm. The modulation transfer function (MTF) of multi-model differential optical absorption hyperspectral imager is more than 0.98 at characteristic frequency of 0.25 lp/mm in the spatial dimension. The design results satisfy the requirements of multi-model differential optical absorption hyperspectral atmospheric sounding.

Key words optical design; multi-model; differential optical absorption; hyperspectral imager; scanning mirror

OCIS codes 220.4830; 120.4820; 280.4788

收稿日期: 2016-01-22; **收到修改稿日期:** 2016-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(41575023, 41105014)、中科院长春光机所领域前沿创新项目

作者简介: 薛庆生(1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学系统设计、航天和航空遥感成像光谱技术及光谱辐射定标方面的研究。E-mail: qshxue2006@163.com

1 引 言

O_3 、 NO_2 、 SO_2 等大气痕量气体的差分吸收光谱探测是全球空气质量和气候探测的重要途径之一,差分吸收光谱探测的原理是通过测量大气散射的高光谱辐射信息,利用差分吸收光谱(DOAS)算法反演出大气痕量气体 O_3 、 NO_2 、 SO_2 等的分布信息^[1]。根据观测路径的不同,大气痕量气体的差分吸收光谱探测分为天底探测模式、临边探测模式和掩日探测模式,3种探测模式各有特点。天底探测模式易于获得较宽的空间覆盖,对于大气成分的柱总量的反演有优势;临边和掩日探测模式易于获得较高的垂直分辨率,对大气成分垂直廓线的反演有优势^[2-3]。多种探测模式综合应用可实现单一模式的优势互补,达到最优化的探测目的^[4-5]。因此,将天底、临边和掩日探测模式同时应用的多模式差分吸收光谱探测成为国际大气探测领域发展的前沿和热点课题之一。

目前,国内外现有的差分吸收光谱探测仪多为单一模式的探测仪器,典型的天底视场探测仪器有:1978年美国研制的太阳后向散射紫外探测仪(SBUV)^[6]和2004年欧空局研制的臭氧监测仪(OMI)^[7],典型的临边视场探测仪器有美国研制的臭氧临边探测仪(SOLSE)^[8]和临边臭氧反演试验仪(LORE)^[9],但这些差分吸收光谱探测仪的探测模式单一,不能满足多模式综合应用的需求。

为满足多模式差分吸收光谱大气探测的需求,本文提出了利用两个扫描镜切换不同探测模式,利用双光谱仪减小系统的光谱杂光,利用分色片分成3个通道实现多模式高光谱分辨率探测的新方法,设计了一个宽波段、高光谱分辨率、多模式差分吸收光谱成像仪光学系统,利用ZEMAX-EE软件进行光学系统的优化设计,并对设计结果进行了分析与评价。

2 应用要求及主要技术指标

根据多模式差分吸收光谱探测的应用需求,探测的大气痕量气体主要为 O_3 、 SO_2 和 NO_2 等,如图1所示,这些痕量气体的吸收带主要集中在紫外及可见光波段。因此,探测波段选择250~500 nm,其中,在250~310 nm波段,要求光谱分辨率不大于0.4 nm;在300~500 nm波段,要求光谱分辨率不大于0.6 nm,因而要求具有天底、临边和掩日多模式探测能力。图2为3种探测模式的示意图,天底探测模式下,要求幅宽1000 km,空间分辨率34 km(沿轨)×60 km(穿轨);临边观测模式下,要求临边高度方向的观测范围为0~100 km,分辨率3 km,临边方位方向的观测范围为前向临边1000 km。选择在工作波段具有高量子效率的紫外增强型面阵CMOS探测,像元数1024 pixel(光谱维)×256 pixel(空间维),像元尺寸22 μm ×22 μm 。根据上述要求和探测器的选型,计算分析确定差分吸收光谱成像仪光学系统相关技术指标见表1。

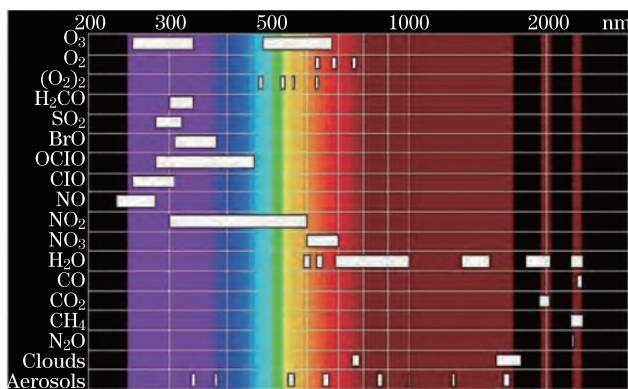


图1 痕量气体的特征吸收带

Fig. 1 Characteristic absorption band for trace gases

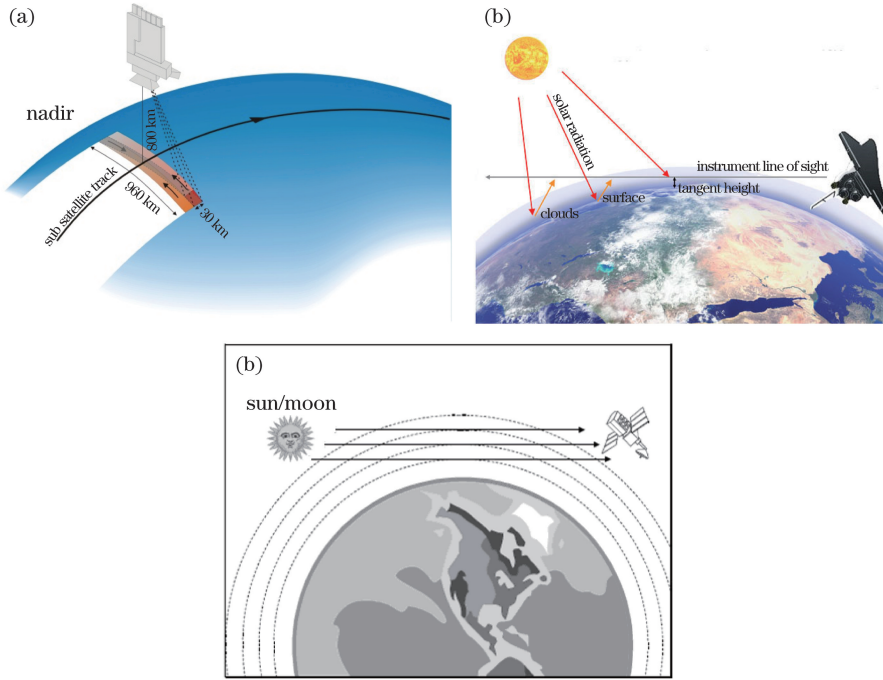


图 2 3 种观测模式示意图。(a)天底探测模式;(b)临边探测模式;(c)掩日探测模式

Fig. 2 Schematic map of three observing models. (a) Nadir observing model; (b) limb observing model; (c) sun occultation observing model

表 1 高光谱成像仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of hyperspectral imager optical system

Parameters	Value
Spectral range /nm	250~500
Instantaneous field of view /[(°)×(°)]	1.8×0.04
Focal length of the telescope f'_t /mm	240.269
Focal length of the system f'_s /mm	62
F number	2
Detector array size /(pixel×pixel)	1024×256
Pixel size /(μm × μm)	22×22
Spectral resolution	≤ 0.4 nm (250~310 nm) ≤ 0.6 nm (300~500 nm)

3 设计方案选择

多模式差分吸收高光谱成像仪利用两个扫描镜来实现不同模式的切换。预计卫星轨道高度 $H = 836$ km, 仪器到临边观测点的距离 $L = 3370.89$ km, 如图 3 所示, 天底观测模式利用俯仰扫描镜摆扫实现, 俯仰扫描镜转角范围为 $-16^\circ \sim +16^\circ$, 覆盖 $-522 \sim +522$ km, 满足天底幅宽 1000 km 的指标要求。

沿轨方向的空间分辨率由沿轨方向的瞬时视场和轨道高度决定, 即:

$$R_{\text{GSDY}} = 2H \times \tan \omega = 26.3 \text{ km}, \quad (1)$$

式中, $2\omega = 1.8^\circ$, 优于沿轨方向空间分辨率 34 km 的指标要求。

穿轨方向的空间分辨率由跨轨方向的瞬时视场、轨道高度和积分时间决定, 瞬时视场为 0.04° , 对应的瞬时空间分辨率为 0.6 km。天底探测模式, 跨轨方向扫描的角度范围为 $-32^\circ \sim +32^\circ$, 扫描时间为 3 s, 积分时间为 0.185 s。因此, 跨轨方向的空间分辨率为

$$R_{\text{GSDK}} = H \times \tan[0.185 \times (32 \times 2)/3] = 58 \text{ km}, \quad (2)$$

优于跨轨方向空间分辨率 60 km 的指标要求。

如图 4 所示, 临边观测模式利用俯仰扫描镜和方位扫描镜协同实现, 方位扫描镜临边方位方向的转角范

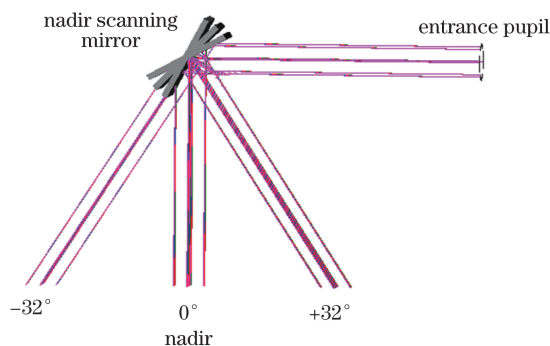


图 3 俯仰扫描镜扫描示意图

Fig. 3 Schematic map of elevation mirror

围为 $-4.5^{\circ}\sim+4.5^{\circ}$,覆盖 $-533\sim+533$ km,满足临边方位方向覆盖 1000 km 的指标要求。俯仰扫描镜在临边高度方向扫描范围为 $-0.45^{\circ}\sim+0.45^{\circ}$,对应 $-53\sim+53$ km,满足临边方位方向覆盖 $0\sim100$ km 的指标要求。临边观测模式,临边高度方向的垂直分辨率为

$$R_{\text{GSDL}} = 2L \times \tan(0.04/2) = 2.35 \text{ km}, \quad (3)$$

优于临边高度方向垂直分辨率 3 km 的指标要求。

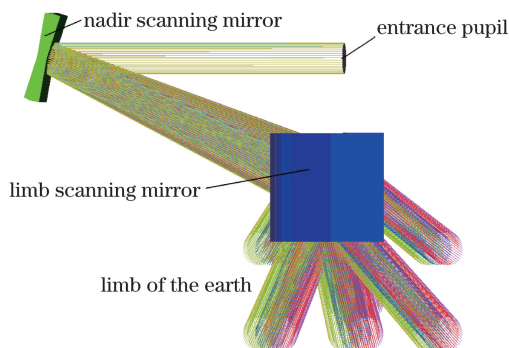


图 4 方位扫描镜扫描示意图

Fig. 4 Schematic map of azimuth scanning mirror

在轨运行期间,在日出、日落时分,方位扫描镜沿临边切线方向指向太阳,测量太阳的大气吸收光谱。多模式差分吸收高光谱成像仪由俯仰扫描镜、方位扫描镜、望远镜和光谱仪组成,望远镜把经扫描镜引入的目标场景聚焦成像在入射狭缝上,然后经过光谱仪分光谱成像在面阵探测器上,实现高光成像探测。

4 望远镜设计

望远镜的作用是把经扫描镜引入的目标场景成像在入射狭缝上。望远镜的工作波段为 $250\sim500$ nm, F 数为 7.75,视场大小为 $1.8^{\circ}\times 0.04^{\circ}$ 。望远镜的视场不大,但含有信号很弱的紫外波段,从无色差和提高能量利用率的角度考虑,望远镜采用单块离轴抛物镜结构,光学结构如图 5 所示。图 6 为望远镜视场在入射狭缝上的点列图分布,点列图半径的均方根(RMS)值小于 $15 \mu\text{m}$,满足成像质量要求。

5 光谱仪系统设计

多模式差分吸收高光谱成像仪光谱分辨率高、波段宽,为了满足覆盖波段和光谱分辨率要求,提出利用分色片分成 $250\sim310$ nm、 $300\sim410$ nm 和 $400\sim500$ nm 3 个通道同时探测。为了降低系统的光谱杂光,提出了采用双光谱仪串联色散的光学设计方案,第一个光谱仪采用棱镜色散,第二个光谱仪采用光栅色散,整个光谱仪系统的放大倍率为 0.258,光学结构如图 7 所示。入射狭缝尺寸为 $7.6 \text{ mm}\times 0.17 \text{ mm}$ 。通道 1 光栅刻线密度为 3100 g/mm ,通道 2 和通道 3 光栅刻线密度均为 1800 g/mm 。

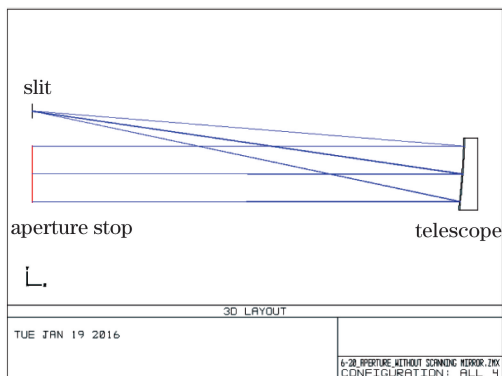


图 5 望远镜光学结构图

Fig. 5 Optical layout of telescope

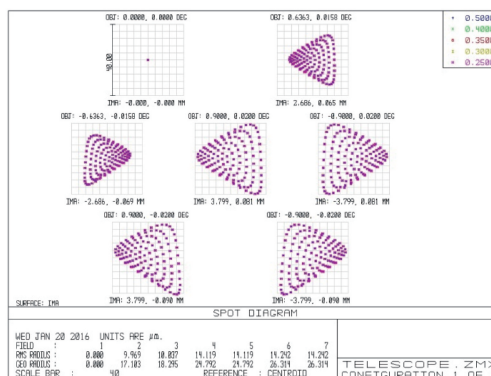


图 6 入射狭缝上的点列图分布

Fig. 6 Spot diagram on the entrance slit

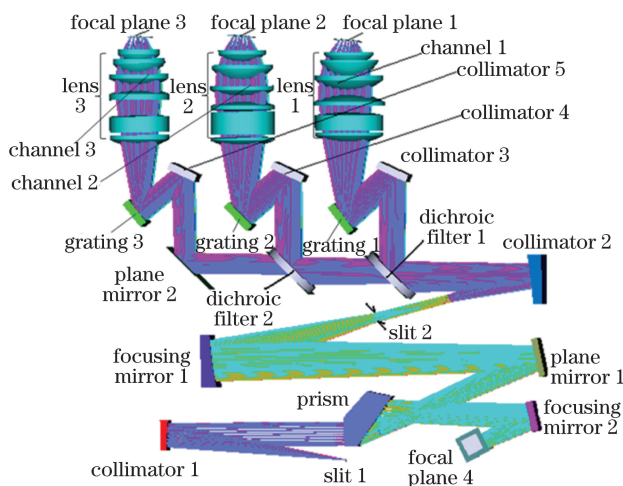


图 7 光谱仪光学结构图

Fig. 7 Optical layout of the spectrometer

由于第一个光谱仪采用棱镜作为色散元件,无光谱级次重叠的问题,250~500 nm 波段的光谱在第一个光谱仪的像面上展开,控制第一个光谱仪的出射狭缝(也是第二光谱仪的入射狭缝)宽度与 250~500 nm 谱段展开宽度相同,使 250~500 nm 波段外的光不能进入第二个光谱仪,从而有效减小了系统的工作波段外的光谱杂光。第二个光谱仪采用平面光栅作为色散元件,工作波段 250~500 nm 的二级谱对应的波段为 125~250 nm,三级谱对应的波段为 83.33~126.6 nm,因此,工作波段的二级谱、三级谱及更高级谱都不能进入第二个光谱仪,从而可以消除由于级次重叠带来的光谱杂光。第二个光栅光谱仪利用分色片分成 3 个通道,只有相应波段的光进入通道进行色散,因此,可以进一步降低光谱杂光。光谱仪内部消光黑漆,降低内壁散射引起的光谱杂光。利用杂光分析工具 Light Tools 建立分析模型,对差分吸收高光谱成像仪的光谱杂光进行了分析,结果表明,采用上述消杂光措施后,光谱杂光达到 10^{-5} 量级,满足应用要求。

为了降低系统的偏振响应对定标精度的影响,光谱仪系统增加了偏振测量通道,通过在轨偏振测量进行偏振修正。如图 7 所示,经色散棱镜色散后光路分成两路,一路进入 3 个测量通道,另一路进入偏振测量通道。如图 8 所示,三个测量通道不同视场沿着色散方向的 RMS 半径均小于 $10 \mu\text{m}$,且对波长变化不大,这表明在全波段内成像质量良好。

通道 1(250~310 nm)、通道 2(300~410 nm)和通道 3(400~500 nm)在像面上的线色散宽度分别为

$$d_{l_1} = 21.825 \text{ mm}, \quad (4)$$

$$d_{l_2} = 19.5937 \text{ mm}, \quad (5)$$

$$d_{l_3} = 19.1898 \text{ mm}, \quad (6)$$

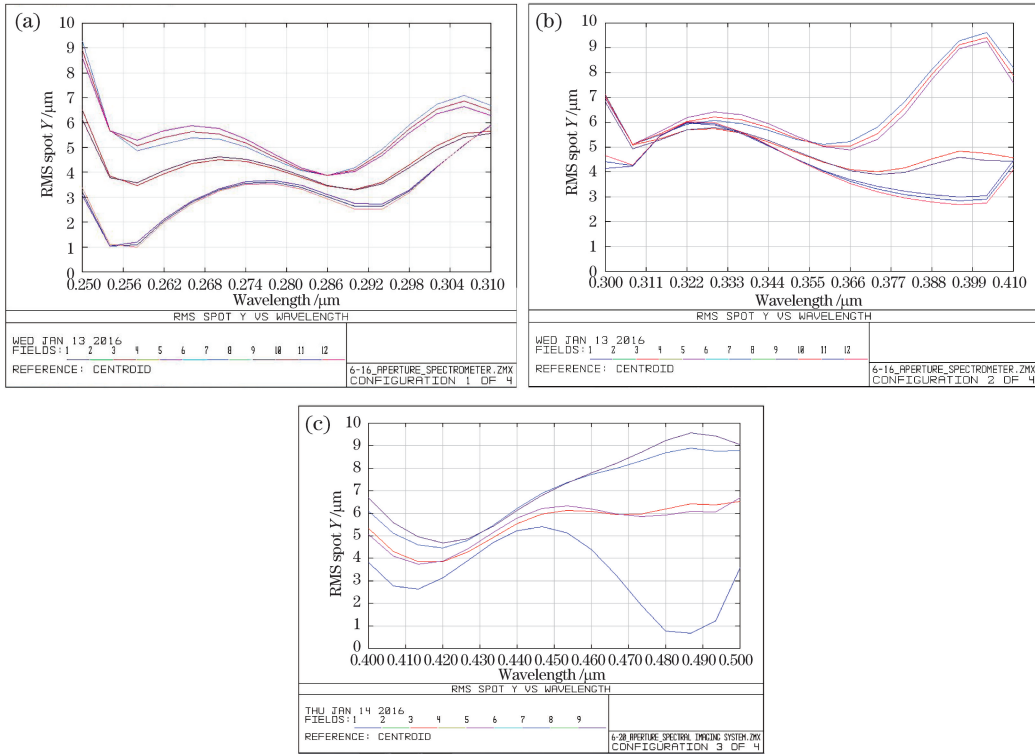


图 8 点列图均方根半径随波长的变化关系。(a)通道 1: 250~310 nm;(b)通道 2: 300~410 nm;(c)通道 3: 400~500 nm
 Fig. 8 RMS spot radius versus wavelength. (a) Channel 1: 250~310 nm;
 (b) channel 2: 300~410 nm; (c) channel 3: 400~500 nm

3 个通道的线色散率分别为

$$d\lambda_1/dl_1 = 2.749 \text{ nm/mm}, \quad (7)$$

$$d\lambda_2/dl_2 = 5.614 \text{ nm/mm}, \quad (8)$$

$$d\lambda_3/dl_3 = 5.211 \text{ nm/mm}, \quad (9)$$

三个通道的光谱分辨率主要由线色散率、狭缝像的宽度 W_s 、点列图在色散方向上的 RMS 直径 W_D 决定, 可表示为

$$R_{\text{FWHM}} = \left(\frac{d\lambda}{dl} \right) \cdot \sqrt{W_s^2 + W_D^2}, \quad (10)$$

式中, $W_s = 0.04 \text{ mm}$, $W_D \approx 0.02 \text{ mm}$, 把(4)~(6)式代入(10)式得到通道 1、2、3 的光谱分辨率分别为 0.12、0.25、0.23 nm, 满足技术指标要求。

6 全系统设计

多模式差分吸收高光谱成像仪全系统由方位扫描镜、俯仰扫描镜、望远镜和光谱仪匹配组合而成, 整体光学结构如图 9 所示。多模式差分吸收高光谱成像仪采用推扫的工作方式, 空间维 91 个像元合并使用, 合并后的等效像元尺寸为 2 mm, 与其相应的特征频率为 0.25 lp/mm, 如图 10 所示, 不同波长的光学调制传递函数(MTF)在特征频率处均大于 0.98, 成像质量良好, 满足应用要求。

多模式差分吸收高光谱成像仪的第一个光谱仪采用棱镜色散, 在轨由于环境温度的变化和真空大气环境的变化会引起一定量的谱线漂移。在轨采用主动热控方案, 光机主体温度控制在 $(18 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, 光机一体化分析表明, 采用热控方案后, 由于温度变化引起的谱线漂移较小, 在 0.2 个像素以内。分析表明, 由于真空和大气环境引起的谱线漂移约为 3 个像素, 可以在地面模拟在轨道真空环境, 进行真空光谱定标, 事先标定出谱线漂移量, 作为在轨修正的参考。多模式差分吸收高光谱成像仪在轨采用汞灯作为光谱定标光源, 进行光谱定标, 修正由于环境变化引起的谱线漂移。采取上述措施可以使光谱精度在 $\Delta\lambda/10$ 范围内, 其中, $\Delta\lambda$ 为谱线的半峰全宽(FWHM), 可以满足应用要求。

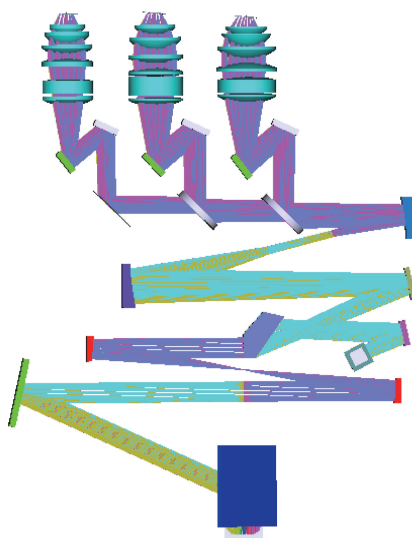


图 9 高光谱成像仪的光学结构图

Fig. 9 Optical layout of the hyperspectral imager

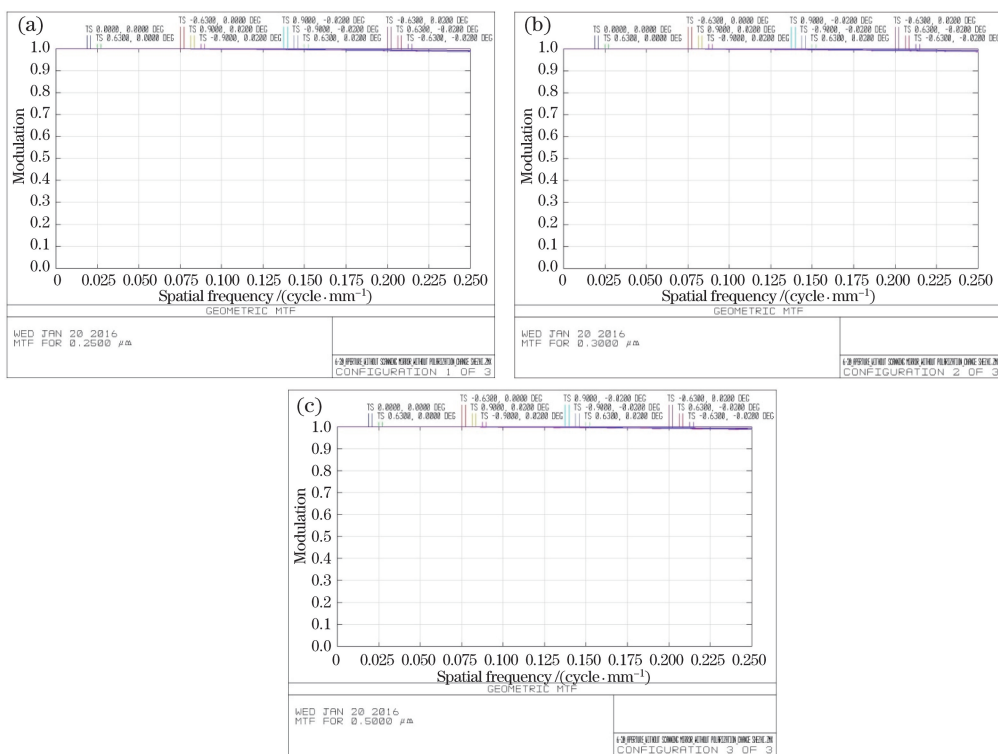


图 10 全系统不同波长的光学传递函数。(a)250 nm;(b) 300 nm;(c) 500 nm

Fig. 10 MTF of the hyperspectral imager for different wavelengths. (a) 250 nm; (b) 300 nm; (c) 500 nm

7 结 论

为满足多模式差分吸收高光谱大气探测的需求,提出了利用两个扫描镜切换不同探测模式,利用双光谱仪减小系统的光谱杂光以及利用分色片分成 3 个通道实现多模式高光谱分辨率探测的新方法。采用方位扫描镜、俯仰扫描镜、望远镜和双光谱仪组合的光学结构,设计了一个 F 数为 2、瞬时视场为 $1.8^{\circ} \times 0.04^{\circ}$ 的多模式差分吸收高光谱成像仪光学系统,且具有天底、临边和掩日探测功能。设计结果表明,在 250~310 nm 波段,光谱分辨率优于 0.4 nm;在 300~500 nm 波段,光谱分辨率优于 0.6 nm,光学传递函数在特征频率 0.25 lp/mm 处达到 0.98 以上,满足成质量要求,为下一步多模式差分吸收高光谱成像仪的研制和未来空间

应用奠定了技术基础。

参 考 文 献

- 1 Xue Qingsheng. Optical design of spaced-based wide field-of-view differential optical absorption imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122002.
薛庆生. 星载宽视场差分吸收成像光谱仪光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122002.
- 2 Xue Qingsheng. Optical design of spaced-based broadband limb ozone profile sounder[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 022002.
薛庆生. 星载宽波段临边臭氧廓线探测器光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 022002.
- 3 Xue Qingsheng. Optical design of space-based scanning tomographic limb imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0422001.
薛庆生. 星载扫描层析临边成像光谱仪光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0422001.
- 4 Didier F Rault, Robert Spurr. The OMPS limb profiler instrument: two-dimensional retrieval algorithm [C]. SPIE, 2010, 7827: 78270P.
- 5 Yu Xiangyang. Opto-mechanical structure of imager with two field of views and multiple channels [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10): 2870-2876.
于向阳. 双视场多通道成像仪的光机结构[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(10): 2870-2876.
- 6 Heath D F, Krueger A J, Roeder H A, *et al.* The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for nimbus G[J]. Optical Engineering, 1975, 14(4): 323-331.
- 7 Vries J D, Oord Gijsbertus H J van den, Hilsenrath E, *et al.* Ozone monitoring instrument(OMI) [C]. SPIE, 2002, 4480: 315-325.
- 8 Richard D Mcpeters, Scott J Janz, Ernest H, *et al.* The retrieval of O₃ profiles from limb scatter measurements: results from the shuttle ozone limb sounding experiment[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(17): 2597-2600.
- 9 David E Flittner, Scott J Janz, Ernest Hilsenrath, *et al.* Stray light characterization of the limb ozone retrieval experiment [C]. SPIE, 2004, 5526: 220-227.