

星载宽视场差分吸收成像光谱仪光学设计

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 研究星载宽视场差分吸收成像光谱仪已成为空间大气遥感领域的迫切需求,根据宽覆盖轻小型星载大气痕量气体差分吸收成像光谱仪的研究目标,采用偏轴两镜系统和中继系统匹配的结构型式设计出无遮拦宽视场望远系统,将宽视场望远系统和 Offner 光谱成像系统匹配,设计了一个视场 $60^\circ \times 0.24^\circ$ 、相对孔径 1/3、工作波段 280~450 nm 的星载宽视场差分吸收成像光谱仪光学系统,利用光学设计软件 Zemax-EE 进行了光线追迹和优化设计,光谱成像系统不同波长的点列图半径的均方根(RMS)值均小于 $5 \mu\text{m}$,光谱分辨率 0.692 nm,满足不大于 1 nm 的指标要求,差分吸收成像光谱仪全系统在空间方向各波长在特征频率处的光学传递函数均达到 0.67 以上,完全满足成像质量要求,适合空间大气遥感应用。

关键词 光学设计;成像光谱仪;望远系统;光谱成像系统;差分吸收

中图分类号 O433.1; TH744.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0122002

Optical Design of Space-Based Wide Field-of-View Differential Optical Absorption Imaging Spectrometer

Xue Qingsheng

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

Abstract Space-based atmospheric remote sensing urgently requires wide field-of-view differential optical absorption imaging spectrometer. The research objective is spaced-based atmospheric trace gas differential optical absorption imaging spectrometer with wide covering range and minor volume and mass. Based on the research objective, a wide field-of-view unabsured telescope is designed using an off-axis two-mirror system and a relay system. An optical system of space-based wide field-of-view differential optical absorption imaging spectrometer is designed using the wide field-of-view telescope and an Offner spectral imaging system. The field of view of hyperspectral imager is $60^\circ \times 0.24^\circ$, relative-aperture is 1/3, and working waveband is from 280 nm to 450 nm. Ray tracing and optimization are performed by Zemax-EE software. The root mean square (RMS) spot radius for different wavelengths are less than $5 \mu\text{m}$ for the Offner spectral imaging system. The spectral resolution is 0.692 nm, and the requirement of specification is no more than 1 nm. The modulation transfer function (MTF) for different wavelengths of imaging spectrometer is more than 0.67 at characteristic frequency in the spatial direction. The design results satisfy the requirements of imaging quality, and are suitable for the application of space-based remote sensing.

Key words optical design; imaging spectrometer; telescope system; spectral imaging system; differential optical absorption

OCIS codes 220.4830; 120.4820; 280.4788

1 引 言

SO_2 、 O_3 、 NO_2 和 HCHO 等大气痕量气体是重要大气污染物,对生态环境和人类的生产、生活造成较大危

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)、中科院长春光机所创新基金

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等方面的研究。E-mail: qshxue2006@163.com

害,定量监测大气SO₂等痕量气体含量对于大气环境质量评估和减灾防灾等具有重要意义^[1]。星载差分吸收成像光谱仪是进行大气SO₂等痕量气体监测的有效工具,在大气环境监测领域具有良好的应用前景,其原理是通过测量天底的紫外-可见散射光信息,然后利用差分吸收光谱(DOAS)算法从痕量气体的窄带特征吸收线中定量反演出SO₂等痕量气体的含量,同时还可以从宽带散射特征线中反演出气溶胶的分布和变化信息,从而为环境监测、气候预报和全球气候变化研究提供重要参数^[2-3]。

星载差分吸收成像光谱仪光学系统由望远系统和光谱成像系统组成,入射狭缝是二者连接的桥梁^[4]。望远系统把大气散射光聚焦成像在入射狭缝上,入射狭缝既是望远系统的像面,又是光谱成像系统的物面。光谱成像系统把入射狭缝进行色散,分波长成像在二维面阵探测器上,与狭缝长度方向平行的一维为空间维,表示同一波长不同目标的图像,与狭缝长度方向垂直的一维为光谱维,表示同一目标,不同波长的光谱像。宽覆盖是星载大气痕量气体监测一直追求的目标。因为,空间覆盖范围越大,仪器的回访周期就越小,时间分辨率就越高。国外典型的星载差分吸收成像光谱仪有美国航天局(NASA)研制的TOMS^[5]和欧空间局研制的GOME^[6]。为了获得宽覆盖,TOMS和GOME均采用扫描镜摆扫的工作方式,需要配备复杂的运动扫描机构,且空间分辨率较低,TOMS的空间分辨率为50 km×50 km,GOME空间分辨率为320 km×40 km。国内,中国科学院国家空间科学中心研制的FY-3臭氧总量探测仪(TOU)^[7],也采用扫描镜摆扫的工作方式,空间分辨率为50 km×50 km,这些星载差分吸收成像光谱仪在空间大气痕量气体监测中发挥了重要作用,但缺点是为获得宽覆盖均采用了复杂的运动扫描机构,体积和重量大,不利于轻量化。另外,空间分辨率较低,不利于污染源的精确定位。因此,空间大气痕量气体监测迫切需要无扫描机构的宽覆盖轻小型星载差分吸收成像光谱仪。

本文根据宽覆盖轻小型星载差分吸收成像光谱仪的研究目标,采用偏轴两镜系统和中继系统匹配的结构型式设计出无遮拦宽视场望远系统,将宽视场望远系统和Offner光谱成像系统匹配完成了用于空间大气遥感的星载宽视场差分吸收成像光谱仪光学系统设计,并对设计结果进行了分析。

2 应用要求及主要技术指标

根据宽覆盖高分辨率空间大气遥感的应用需求,星载宽视场差分吸收成像光谱仪主要对大气中的SO₂进行探测,因为它在大气中极易被氧化成硫酸和硫酸盐形成硫酸烟雾和酸雨,对生态环境造成较大的危害。如图1所示,SO₂的吸收带在280~330 nm波段。工作波段选择280~450 nm,除SO₂外,还可兼顾O₃、NO₂、HCHO等大气痕量气体进行探测。

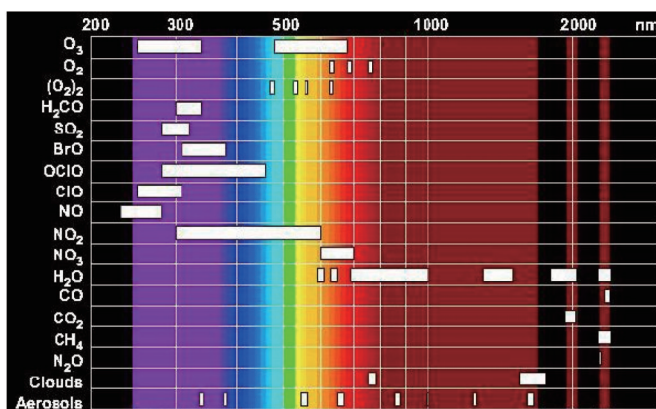


图1 不同痕量气体对应的吸收波段

Fig.1 Absorption waveband for different trace gases

仪器预计将来工作在轨道高度 $H=600$ km的卫星平台上,要求刈幅宽度 $L_{CW} \geq 690$ km,空间分辨率 $L_{CSB} \leq 13$ km,光谱分辨率 $\Delta\lambda \leq 1$ nm。探测器采用面阵CCD探测器,像元尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,像元数为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, $2 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$ 合并使用,光谱维2个像元合并,空间维20个合并,合并后的等效像元尺寸为 $26 \mu\text{m} \times 260 \mu\text{m}$ 。

根据刈幅宽度和轨道高度的要求,确定差分吸收成像光谱仪的视场(FOV, θ_{FOV})为

$$\theta_{FOV} \geq 2 \arctan\left(\frac{GW}{2H}\right) = 59.8^\circ, \quad (1)$$

留出一定余量,取视场 θ_{FOV} 为 60° 。

根据空间分辨率和轨道高度的要求,确定差分吸收成像光谱仪的系统焦距 f'_s 为

$$f'_s \geq \frac{aH}{L_{GSD}} = 12 \text{ mm}, \quad (2)$$

式中 $a=260 \mu\text{m}$ 为像元合并后空间维等效像元尺寸,这里,留出一定余量,取 $f'_s=12.5 \text{ mm}$,光谱成像系统的变倍比为1:1,则望远系统的焦距 $f'_t=12.5 \text{ mm}$ 。综合考虑天底大气散射信号强度和CCD探测器的性能参数,取系统的相对孔径为1:3,星载宽视场差分吸收成像光谱仪的主要技术指标总结如表1所示。

表1 成像光谱仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of imaging spectrometer optical system

Parameter	Value
Spectral range /nm	280 ~ 450
Instantaneous field of view /($^\circ$)	60×0.24
Focal length of telescope f'_t /mm	12.5
Focal length of system f'_s /mm	12.5
Diameter of entrance pupil /mm	4.2
Detector array size /pixel	1024×1024
Detector pixel size / μm	13×13 (2 \times 20 binning)
Spectral resolution /nm	≤ 1
Modulation transfer function	$\geq 0.5 @ 2 \text{ lp/mm}$

3 望远系统设计

望远系统用于将进入入瞳的光谱辐射成像到入射狭缝上,工作波段280~450 nm,包含紫外波段。视场角为 $60^\circ \times 0.24^\circ$,焦距 f'_t 为12.5 mm,相对孔径为1/3。从望远系统的技术要求可以看出,望远系统是一个宽视场、大相对孔径成像系统。目前,国内外成像光谱仪常用的望远系统主要有同轴两反卡塞格林系统^[8]和离轴三反热机械分析系统^[9]。同轴两反卡塞格林系统的视场角一般在 2° 以内,且存在中心遮拦。离轴三反热机械分析系统无遮拦,但视场角一般在 20° 以内。现有的望远系统结构不能满足本系统宽视场的要求。为满足宽视场望远系统的要求,提出了一种偏轴两镜系统与中继系统匹配的结构型式。偏轴两镜系统把宽视场目标成像在一次像面上,无遮拦,在一次像面处放置消杂光光阑,一次像面再经过中继系统成像在入射狭缝上,进一步缩小弥散斑的尺寸,提高成像质量。望远系统的焦距 f'_t 为12.5 mm,中继系统的变倍比取1/5,则偏轴两镜系统的焦距 $f'_o=62.5 \text{ mm}$ 。偏轴两镜系统的光学结构原理图如图2所示。

需要从轮廓尺寸合理的角度考虑分配两镜的光焦度,两镜的光焦度满足

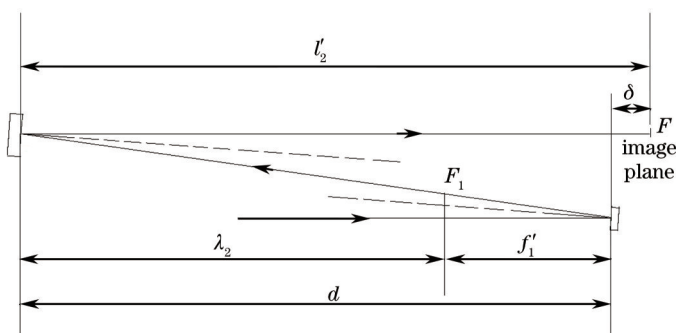


图2 偏轴两镜系统光学原理图

Fig.2 Schematic diagram of off-axis two-mirror system

$$\frac{1}{f'_o} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2}, \quad (3)$$

式中 f'_1 为主镜的焦距, f'_2 为次镜的焦距, d 为主镜和次镜之间的距离。主镜的焦距 f'_1 取 75 mm, 焦点 F 在主镜之后的引出量 δ 取 -140 mm, 次镜的放大倍率 β 为

$$\beta = \frac{f'_o}{f'_1} = 0.850687, \quad (4)$$

根据高斯光学, 次镜的放大倍率还可表示为

$$\beta = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{d+\delta}{d-f'_1}, \quad (5)$$

式中 l_2 和 l'_2 分别为次镜的物距和像距, 由(5)式可推导出主、次镜间距为

$$d = \frac{-\delta - \beta f'_1}{1 - \beta}, \quad (6)$$

把(4)式代入(6)式求得 $d=510.327$ mm。根据(3)式求解出次镜的焦距为

$$f'_2 = \frac{f'_o(f'_1 - d)}{f'_1 - f'_o} = 197.876 \text{ mm}. \quad (7)$$

图 3 为偏轴两镜系统的光学结构图, 图 3(a)为子午面内的视图, 图 3(b)为弧矢面内的视图, 图中在孔径光阑附近插入了消偏器^[10], 限于篇幅限制, 关于消偏器的设计将有另文论述, 这里不做详细论述。可以减小偏振响应对后续定标结果的影响。在保证无遮拦的条件下, 偏轴角尽可能小, 有利于减小像差, 这里, 主、次镜的偏轴角均为 4° 。图 4 为偏轴两镜系统在像面上的点列图分布, 点列图半径的均方根(RMS)值在 $89 \mu\text{m}$ 范围内。

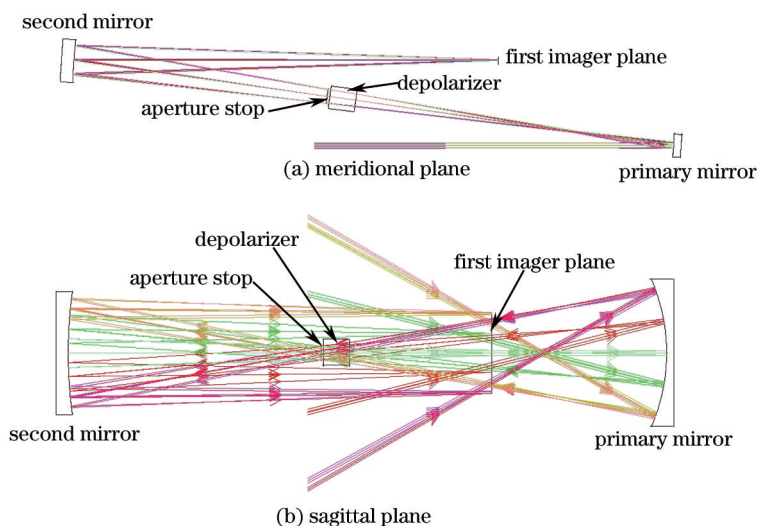


图 3 偏轴两镜系统光学结构图

Fig.3 Optical path of off-axis two-mirror system

中继系统的作用是把偏轴两镜系统的一次像面以一定的变倍比成像在入射狭缝上, 入射狭缝的尺寸为 $13 \text{ mm} \times 52 \mu\text{m}$, 中继系统的变倍比取 $1/5$ 。为了使整个望远系统的结构紧凑, 中继系统采用偏轴中继反射镜与校正透镜组组合的结构型式, 光路如图 5 所示, 由于工作波段包含紫外波段, 校正透镜组的材料采用在紫外波段具有高透射率的 F-Silica 和 CaF_2 , 二者都属于紫外透射系统的常用材料。为了尽可能减少紫外波段的能量损失, 要求尽量减少校正透镜组镜片的数量。校正透镜组采用 Cook 三片型结构。

将偏轴两镜系统与中继系统连接得到望远系统的光学结构如图 6 所示。图 7 为望远系统像面上的点列图分布, 点列图半径的 RMS 值在 $57 \mu\text{m}$ 范围内。图 8 为望远系统光学调制传递函数(MTF)曲线, 在特征频率 2 lp/mm 处, 光学调制传递函数大于 0.85, 成像质量满足要求。

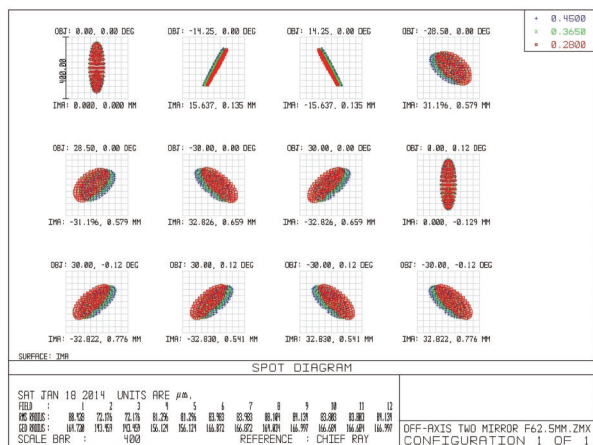


图 4 偏轴两镜系统点列图分布

Fig. 4 Spot diagram of off-axis two-mirror system

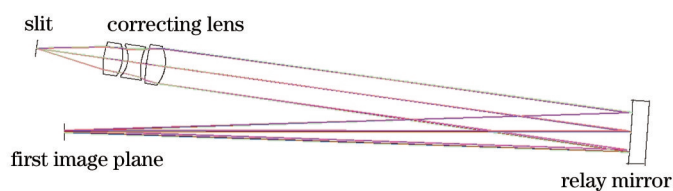


图 5 中继系统光学结构图

Fig. 5 Optical path of relay system

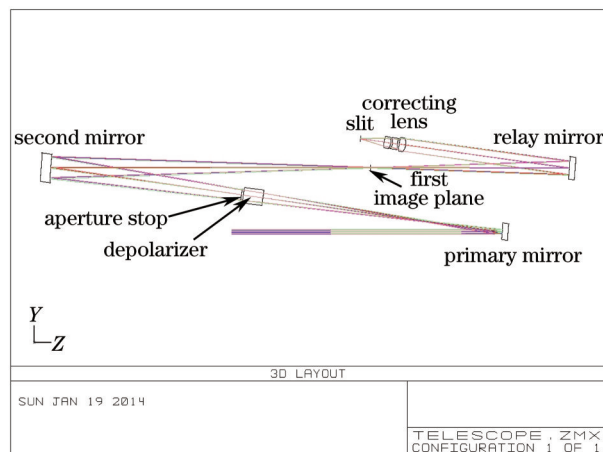


图 6 望远系统光学结构图

Fig.6 Optical structure of telescope system

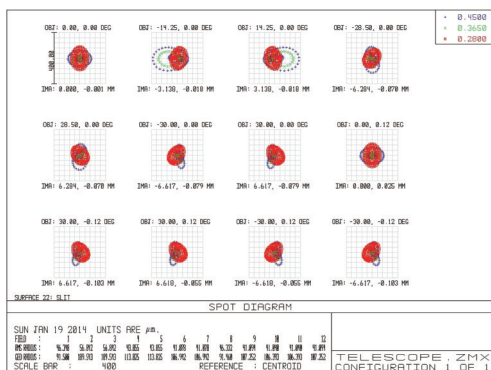


图 7 望远系统点列图分布

Fig.7 Spot diagram of telescope system

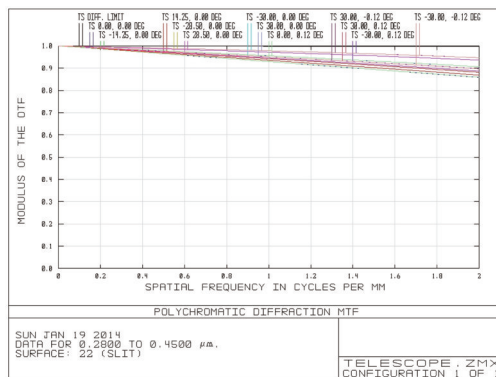


图 8 望远系统光学传递函数曲线

Fig.8 MTF curves of telescope system

4 光谱成像系统设计

宽视场差分吸收成像光谱仪的光谱分辨率完全由光谱成像系统的性能决定。光谱成像系统覆盖波段为 280 ~ 450 nm, 光谱分辨率不大于 1 nm, 光谱分辨率要求高。在结构型式选择上优先选择 Offner 光谱成像系统结构^[11], 它由两块球面反射镜和一块凸面光栅组成, 具有体积小、重量轻和色散均匀、成像质量高的特点。

Offner 光谱成像系统的光学结构如图 9 所示。凸面光栅刻线密度为 600 g/mm, 入射狭缝长度为 13 mm, 宽度为 52 μm。图 10 为点列图半径的 RMS 值随波长的变化关系曲线, 可以看出, 在整个工作波段内, 点列图半径的 RMS 值均小于 5 μm, 在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量。

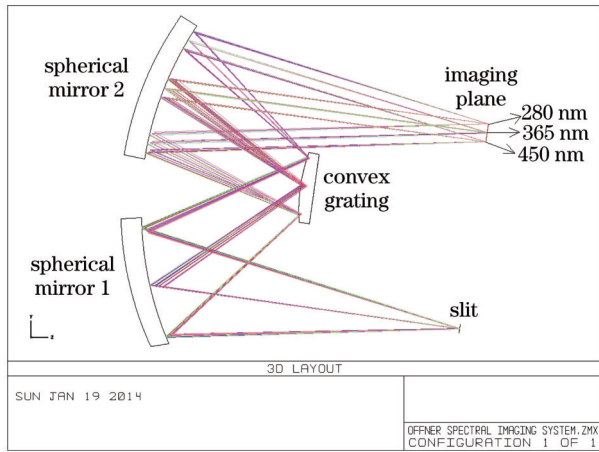


图 9 Offner 光谱成像系统光学结构图

Fig. 9 Optical structure of Offner spectral imaging system

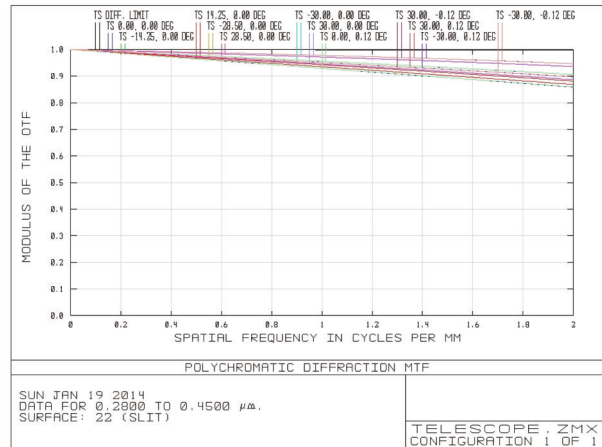


图 10 Offner 光谱成像系统点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线

Fig.10 RMS spot radius versus wavelength of Offner spectral imaging system

280~450 nm 波段在像面上的色散宽度为 13 mm, 则通道 1 的线色散率的倒数为

$$\frac{d\lambda}{dl} = 1.3077 \times 10^{-5}, \quad (8)$$

入射狭缝的几何宽度 w_s 为 0.052mm, 光谱成像系统的变倍比为 1:1, 狭缝像的理想几何宽度 w'_s 为 0.052 mm。由于实际的光谱成像系统存在衍射和像差, 因此, 入射狭缝上的一个物点在光谱成像系统像面上所成的像是一个弥散斑, 弥散斑在色散方向的宽度直接影响光谱成像系统的光谱分辨率。当系统存在像点弥散时, 单色光谱像为狭缝函数(SF)与点扩展函数(PSF)的卷积。SF可用矩形函数表示为

$$f_{SF} = \text{rect}\left(\frac{y}{w'_s}\right), \quad (9)$$

式中 w'_s 为狭缝像的理想几何宽度。考虑到像点弥散后, 单色光的 PSF 可以用高斯函数近似地表示为

$$f_{PSF} = \exp\left[-\pi\left(\frac{y^2}{D^2}\right)\right], \quad (10)$$

根据卷积定理可知, SF 和 PSF 卷积(*)的傅里叶变换等于其各自傅里叶变换后的乘积, 即

$$F(f_{SF} * f_{PSF}) = F(f_{SF}) \cdot F(f_{PSF}), \quad (11)$$

SF 的傅里叶变换为

$$F(f_{SF}) = w'_s \text{sinc}(w'_s u), \quad (12)$$

由于 sinc 函数和高斯函数具有一定的相似性, 在进行估算的时候, 用高斯函数来近似替代 sinc 函数, 即:

$$F(f_{SF}) = w'_s \text{sinc}(w'_s u) \cong C_1 \exp(-\pi w'^2_s u^2), \quad (13)$$

其中, C_1 为常数。PSF 的傅里叶变换为:

$$F(f_{PSF}) = C_2 \exp(-\pi D^2 u^2), \quad (14)$$

其中, C_1 为常数, D 为色散方向点列图直径的 RMS 值。把(13)式和(14)式代入(11)式得

$$F(f_{sf} * f_{psf}) = C_1 C_2 \exp[-\pi(w_s'^2 + D^2)u^2], \quad (15)$$

于是可以近似地得到单色光谱像的几何分布函数, 即仪器线型函数(ILS)的几何分布:

$$f_{ILS} = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}(f_{sf} * f_{psf})] = C_3 \exp\left[-\pi \frac{y^2}{(w_s'^2 + D^2)}\right], \quad (16)$$

其中, C_3 为常数, ILS 也为高斯函数, 其半峰全宽可表示为

$$w_e = \sqrt{w_s'^2 + D^2}, \quad (17)$$

$w_s' = 0.052$ mm, $D = 0.01$ mm 时, 则 $w_e = 0.053$ mm。则 280~450 nm 波段的光谱分辨率为

$$\Delta\lambda_1 = \frac{d\lambda}{dl} \times w_e = 0.692 \text{ nm}, \quad (18)$$

光谱分辨率满足不大于 1 nm 的指标要求。

5 成像光谱仪全系统设计

将优化设计的望远系统和光谱成像光学系统连接得到宽视场差分吸收成像光谱仪全系统的光学结构如图 11 所示, 光学尺寸为 563 mm×320 mm×140 mm, 质量约为 10 kg, 具有体积小、重量轻的特点。

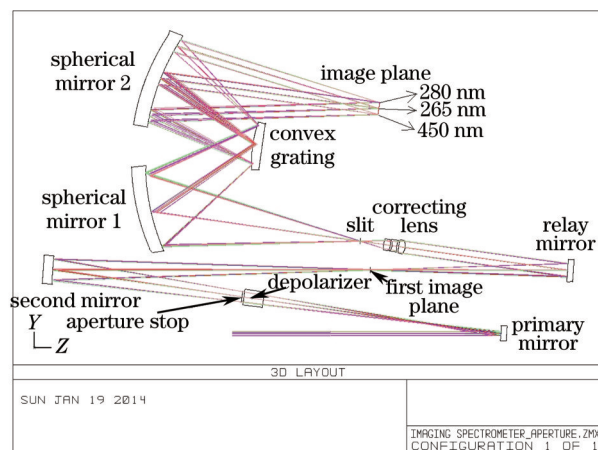


图 11 成像光谱仪全系统光学结构图

Fig. 11 Optical structure of imaging spectrometer system

差分吸收成像光谱仪的空间分辨率由成像光谱仪全系统的性能决定。在空间方向上, 等效像元尺寸为 0.26 mm, 对应的特征频率为 2 lp/mm, 差分吸收成像光谱仪全系统不同波长的光学传递函数曲线如图 12 所示, 在空间方向, 不同波长在特征频率处的光学传递函数均大于 0.67, 完全满足成像质量要求。

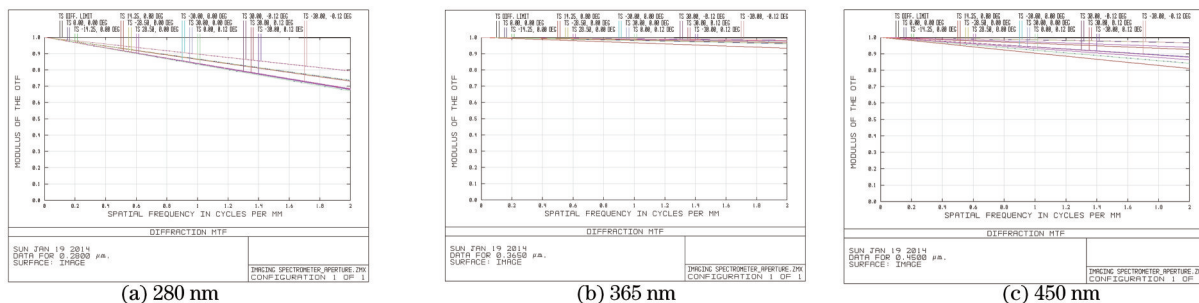


图 12 成像光谱仪全系统像不同波长的光学传递函数曲线

Fig. 12 MTF curves of imaging spectrometer system for different wavelengths

6 结 论

星载宽视场差分吸收成像光谱仪已成为空间大气遥感领域的迫切需求, 根据宽覆盖轻小型差分吸收成像

光谱仪的研究目标,采用偏轴两镜系统与中继系统组合的结构型式设计出无遮拦宽视场望远系统。将宽视场望远系统与 Offner 光谱成像系统匹配,设计了一个视场 $60^\circ \times 0.24^\circ$, 相对孔径 1/3, 工作波段 280~450 nm, 光谱分辨率优于 1 nm 的星载宽视场差分吸收成像光谱仪光学系统,用光学设计软件 Zemax-EE 行了优化设计,并对设计结果进行了分析,分析结果表明,光谱成像系统各波长点列图半径的 RMS 值均小于 $5 \mu\text{m}$,各波长在特征频率处的光学传递函数均达到 0.67 以上,完全满足成像质量要求,为下一步在空间大气遥感领域的应用奠定了技术基础。

参 考 文 献

- 1 Xue Qingsheng, Duan Minzheng. Development of limb imaging spectrometer for atmospheric trace gas sounding [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522001.
薛庆生, 段民征. 用于大气痕量气体探测的临边成像光谱仪 [J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522001.
- 2 Zheng Yuquan, Gao Zhiliang. Optical system design of CO₂ sounder [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2645-2653.
郑玉权, 高志良. CO₂探测仪光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2645-2653.
- 3 Zheng Yuquan. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. Chinese Optics, 2011, 4(6): 546-561.
郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状 [J]. 中国光学, 2011, 4(6): 546-561.
- 4 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Yu Xiangyang. Dyson spectral imaging system with large relative aperture and wide spectral region [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 2645-2653.
薛庆生, 王淑荣, 于向阳. 大相对孔径宽波段 Dyson 光谱成像系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2534-2542.
- 5 P Hongwoo, K Arlin, H Ernest, *et al.*. Radiometric calibration of second generation total ozone mapping spectrometer (TOMS) [C]. SPIE, 1996, 2820: 162-173.
- 6 A Hahne, A Lefebvre, J Callies, *et al.*. Global ozone monitoring experiment (GOME) on board of ERS-2 [C]. SPIE, 1992, 2820: 594-607.
- 7 Wang Yongmei, Wang Yingjian, Wang Weihe, *et al.*. FY-3 total ozone unit (TOU) [J]. Science Announce, 2009, 54(23): 3778-3783.
王咏梅, 王英鉴, 王维和, 等. FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪 [J]. 科学通报, 2009, 54(23): 3778-3783.
- 8 G Frank. Design of the aplanatic and anastigmatic two mirror four reflection system [C]. SPIE, 1997, 2871: 472-485.
- 9 Wu Congjun, Yan Changxiang, Liu Wei, *et al.*. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1222001.
吴从均, 颜昌翔, 刘 伟, 等. 方形孔径棱镜式成像光谱仪光学设计 [J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1222001.
- 10 Wang Rui, Wang Shurong, Li Futian, *et al.*. Research on the depolarizer performance of the space-borne grating spectrometer [J]. Optical Technique, 2009, 35(1): 89-92.
王 锐, 王淑荣, 李福田, 等. 星载光栅光谱仪消偏器性能研究 [J]. 光学技术, 2009, 35(1): 89-92.
- 11 Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2629-2637.
郑玉权, 王 慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2629-2637.

栏目编辑: 韩 峰