

doi: 10.3788/gzxb20124106.0631

星载宽波段大气痕量气体临边探测仪光学设计

薛庆生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:为满足大气痕量气体临边探测的迫切需求,克服传统 Czerny-Turner 光谱仪由于像散大导致空间分辨率低的缺点,设计了一种可以在宽波段内同时校正像散的改进型 Czerny-Turner 光谱仪,光谱范围为 $0.3\sim 0.7\ \mu\text{m}$,全视场角为 2.4° ,焦距为 120 mm,相对孔径为 1:6.将离轴抛物面镜与改进型 Czerny-Turner 光谱仪匹配设计了一个临边探测仪光学系统并运用光学设计软件 ZEMAX 对临边探测仪光学系统进行了光线追迹和优化并对设计结果进行了分析,结果表明该系统的像散得到充分校正,光学系统在各个谱段的光学传递函数均达到 0.69 以上,完全满足设计指标要求,也证明了所提出的在宽波段内同时像散校正方法是可行的.

关键词:光学设计;成像光谱仪;车尔尼-特纳;像散校正;空间分辨率

中图分类号:O433.1; TN216

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)06-0631-7

0 引言

大气污染是全球环境变化的焦点^[1],传统监测大气污染技术已经难以满足科学研究和国家决策的需求.基于卫星平台的大气痕量气体探测可以得到高频次、大尺度、长时间污染物时空分布特征和变化趋势,进而研究大气化学变化对全球气候和生物地球化学循环的影响.基于卫星平台进行大气痕量气体探测已成为监测大气环境的重要手段^[2],天底、临边、掩星(掩日/月)三种探测方式.天底探测方式的垂直分辨率不能满足大气上下层相互作用及全球变化过程研究;掩星探测方式具有很高的垂直分辨率和观测准确度,但是,由于其只在卫星所在位置的日出和日落时段进行探测,故其空间覆盖率极低.作为一种新的探测方式,临边探测方式的垂直分辨率高,并且空间覆盖率也很高,因此受到人们的青睐,已成为国际上基于卫星平台大气痕量气体探测领域研究的热点和前沿^[3].

欧美等发达国家均开始了星载大气痕量气体临边探测仪的研究.星载大气痕量气体临边探测仪采用最多的是成像光谱仪^[4-5],目前国际上具有代表性的大气痕量气体临边探测仪有瑞典研制的 OSIRIS^[6]和美国研制的 OMPS/LP^[7].OSIRIS 光学系统采用非球面光栅作为色散元件,色散均匀、光谱分辨率高,可以对大气中的臭氧、NO₂ 和气溶胶进

行探测;OMPS/LP 光学系统采用色散棱镜作为色散元件,光谱分辨率低,并且由于色散不均匀,光谱分辨率随波长变化很大,重点测量大气的臭氧,测量其他痕量气体受到光谱分辨率的限制.在国内,用于大气痕量气体的临边高光谱成像仪处于起步阶段.

临边探测仪光学系统由望远镜和光谱仪两部分组成.光谱仪是仪器的核心和关键,它决定仪器的光谱分辨率,空间分辨率也与其密切相关^[8].光谱仪根据色散元件不同可以分为光栅光谱仪和棱镜光谱仪等.光栅光谱仪与棱镜光谱仪相比具有光谱分辨率高、色散均匀等优点.光栅光谱仪又可以分为凹面光栅光谱仪、凸面光栅光谱仪和平面光栅光谱仪.凹面光栅光谱仪因为像差较大而通常采用非球面光栅或变线距光栅.凸面光栅光谱仪通常采用 Offner 结构^[9],具有较强的像差校正能力.非球面凹面光栅和凸面光栅比平面光栅加工困难.平面光栅容易加工,而且通用性好.因此,本文采用平面光栅光谱仪.传统的平面光栅光谱仪有 Littrow 光谱仪、Ebert-Fastie 光谱仪和 Czerny-Turner 光谱仪等^[10],其中应用最多的是 Czerny-Turner 光谱仪.传统的 Czerny-Turner 光谱仪由于光线对球面准直镜和成像镜的离轴入射,存在很大的像散,空间分辨率很低,不能满足临边探测仪的要求.

为克服传统的 Czerny-Turner 光谱仪由于像散大而空间分辨率低的缺点,本文设计一种可以在宽

基金项目:国家自然科学基金(No. 41105014)资助

作者简介:薛庆生(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光学设计和成像光谱技术. Email: qshxue2006@163.com

收稿日期:2011-12-20; **修回日期:**2012-02-06

波段内同时校正像散的改进型 Czerny-Turner 光谱仪,详细分析了在宽波段内象散同时校正原理,将离轴抛物面望远镜与改进型 Czerny-Turner 光谱仪匹配,给出了一个星载宽波段大气痕量气体临边探测仪全系统实例,并利用光学设计软件 ZEMAX 对设计结果进行了分析和评价。

1 应用要求及主要技术指标

图 1 为各种大气痕量气体对应的探测波段,从图中可以看出,在紫外-可见波段,对 O₃、H₂CO、SO₂、BrO、NO₂ 等大气痕量气体有明显的探测优势. 仪器工作波段为 300~700 nm,要探测的临边高度 0~90 km 的大气,空间分辨率 1 km,光谱分辨率 1 nm. 探测器像元尺寸 25×25 μm²,像元数 1 024×1 024,2×2 合并使用,合并后等效的像元尺寸为 50×50 μm²,等效像元数为 512×512. 根据以上要求确定成像光谱仪光学系统的主要技术指标如表 1.

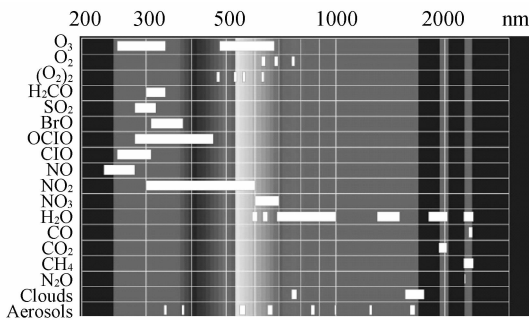


图 1 大气痕量气体对应的探测段
Fig. 1 Sounding wavelength band for atmospheric trace gas

表 1 临边探测仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of limb sounder optical system

Spectral range/μm	0.3~0.7
Vertical field of view/(°)	2.4
Horizontal field of view/(°)	0.024
Entrance pupil diameter of telescope/mm	20
Focal length of telescope/mm	120
Focal length of system/mm	120
Slit dimensions/μm ²	5 000×50
Equivalent detector pixel size/μm ²	50×50

2 宽波段内像散同时校正原理

传统的 Czerny-Turner 光谱仪(如图 2)由两个由两个球面反射镜和一个平面光栅组成,由于光线对球面反射镜的离轴入射,导致在子午和弧矢方向的焦长不同,因而存在很大的像散. 对于离轴入射的球面反射镜,弧矢焦距 f_s 和子午焦长 f_t 可以分别表示为

$$f_s = r/2\cos\alpha \tag{1}$$

$$f_t = (r/2)\cos\alpha \tag{2}$$

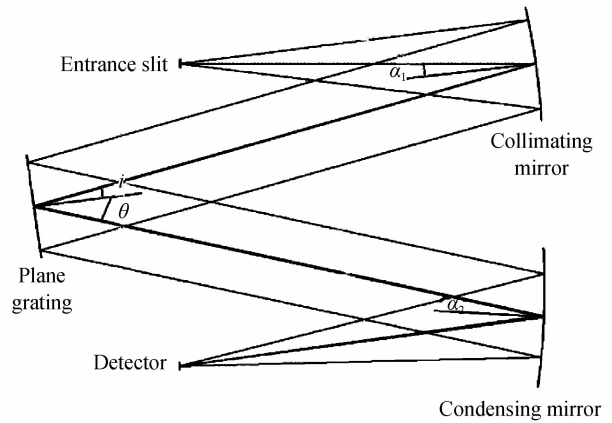


图 2 传统的车尔尼-特纳结构光学原理
Fig. 2 Optical setup of classical Czerny-Turner configuration
式中,α 为主光线对球面反射镜的离轴入射角,r 为球面反射镜的半径. 因此,Czerny-Turner 光谱仪子午焦点和弧矢焦点的距离为

$$\delta f' = (r_1/2)\sin\alpha_1\tan\alpha_1 + (r_2/2)\sin\alpha_2\tan\alpha_2 \tag{3}$$

式中,r₁ 和 r₂ 分别为准直镜和成像镜的曲率半径,α₁ 和 α₂ 分别为主光线对准直镜和成像镜的离轴入射角.

本文提出在探测器和成像镜之间插入一个楔形柱面透镜来校正像散. 如图 3(a)所示,在子午面内,楔

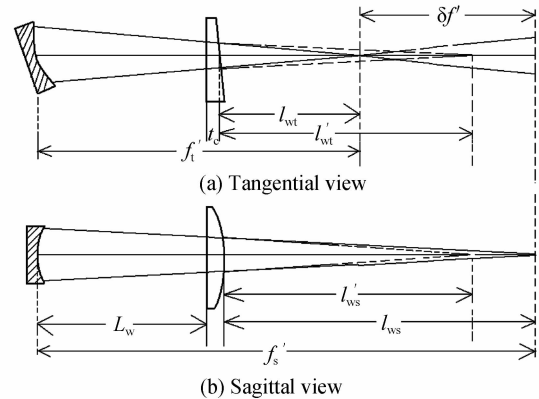


图 3 像散校正原理
Fig. 3 Schematic diagram of astigmatism correction

形柱面镜为一个光楔,由它引起的子午焦长的变化为 l_{wt} - l'_{wt} = [(n-1)/n] · t 式中,l_{wt} 和 l'_{wt} 分别为子午物距和子午像距. n 和 t 分别为楔形柱面透镜的折射率和中心厚度. 如图 3(b)所示在弧矢面内,楔形柱面透镜的成像公式为

$$1/l'_{ws} - 1/l_{ws} = 1/f'_{ws} \tag{5}$$

式中,l_{ws} 和 l'_{ws} 分别为弧矢物距和弧矢像距,f'_{ws} 为楔形柱面透镜的焦距.

如图 3 所示,要校正像散,就要满足

$$\delta f' = l_{wt} - l'_{wt} + l_{ws} - l'_{ws} \tag{6}$$

把式(4)和(5)代入式(6)得

$$\delta f' = [(n-1)/n]t + l_{ws}^2 / (f'_{ws} + l_{ws}) \tag{7}$$

如图 4 所示,由于波长不同,光栅的衍射角不同,则不同波长的主光线对成像镜的离轴入射角 α_2 随波

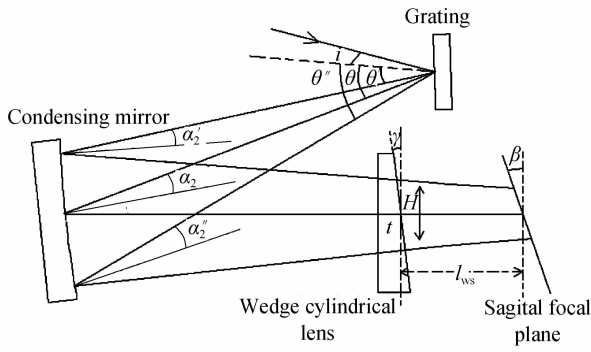


图 4 宽波段像散同时校正原理
Fig. 4 Schematic diagram of astigmatism correction for broadband spectral simultaneity

长变化. H 为中心波长的主光线与其他波长的主光线在子午面内的距离. 根据式(3), 由于 α_2 随波长变化, 则 $\delta f'$ 也随波长变化, 因此要实现宽波段内像散同时校正, 则要满足

$$\frac{d(\delta f')}{d\lambda} = \frac{d(\delta f')}{d\alpha_2} \cdot \frac{d\alpha_2}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{d\lambda} = 0 \quad (8)$$

文献[11]已经证明^[11], 当光栅到聚焦镜的距离 L_{gf} 为

$$L_{gf} = r_2 \cos \alpha_2 \quad (9)$$

时, 不同波长的主光线对成像镜的入射角近似相同, 即

$$\frac{d\alpha_2}{d\theta} = 0 \quad (10)$$

式(7)两边对波长 λ 求微分得

$$\frac{d(\delta f')}{d(\alpha_2/2)} \cdot \frac{d(\alpha_2/2)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{t}{n^2} \cdot \frac{dn}{d\lambda} + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{dt}{d\lambda} - \frac{2f'_{ws}l_{ws} + l_{ws}^2}{(f'_{ws} + l_{ws})^2} \cdot \frac{dl_{ws}}{dH} \cdot \frac{dH}{d\lambda} \quad (11)$$

微分 $dt/d\lambda$ 可以表示为

$$\frac{dt}{d\lambda} = \frac{dt}{dH} \cdot \frac{dH}{d\lambda} \quad (12)$$

由图 4 所示的几何关系可知

$$\left. \frac{dt}{dH} \right|_{H=0} = \tan \gamma \quad (13)$$

$$\left. \frac{dl_{ws}}{dH} \right|_{H=0} = \tan(\beta - \gamma) \quad (14)$$

$$\left. \frac{dH}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_c} = \frac{r_2}{2d_0 \cos \theta} \quad (15)$$

式中, β, γ 分别为焦平面相对主光线的倾角和楔形柱面透镜的楔角, d_0 为光栅刻线间距, λ_c 为中心波长. 把式(9) 和式(12)~(15)代入式(10)得

$$\frac{t}{n^2} \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)_{\lambda=\lambda_c} + \frac{n-1}{n} \tan \gamma - \frac{2f'_{ws}l_{ws} + l_{ws}^2}{(f'_{ws} + l_{ws})^2} \cdot$$

$$\tan(\beta - \gamma) = 0 \quad (16)$$

式(16)即为宽波段像散校正条件.

3 光谱仪设计

3.1 设计程序的编制

根据宽波段像散校正原理, 本文对传统的 Czerny-Turner 光谱仪进行了改进, 利用楔形柱面透镜来实现宽波段像散同时校正. 设计时需考虑彗差的校正, 彗差的校正可根据 Shafer 方程^[10]

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \left(\frac{\cos \theta}{\cos i} \right)^3 \quad (17)$$

首先式(17)选择准直镜和成像镜的离轴角 α_1 和 α_2 及曲率半径 r_1 和 r_2 ; 再选择中心厚度 t , 折射率 n 及弧矢物距 l_{ws} , 根据式(7)计算出楔形柱面透镜的焦距 f'_{ws} ; 然后根据式(9)计算出光栅到聚焦镜的距离 L_{gf} ; 最后选择焦平面的倾角 β , 根据式(16)计算出楔角 γ , 从而获得了全部结构参量. 利用 MATLAB 软件编制了改进型 Czerny-Turner 光谱仪初始结构快速计算程序, 程序框图如图 5.

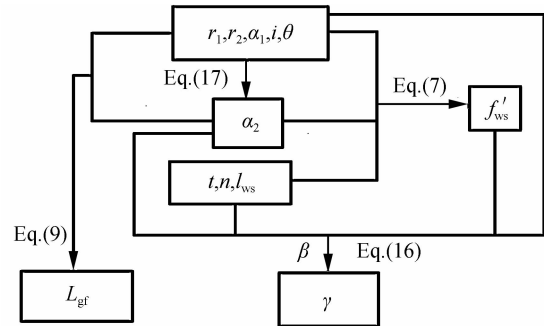


图 5 初始结构计算程序
Fig. 5 The program block diagram for calculating the initial structural parameters

3.2 改进型 Czerny-Turner 光谱仪设计

选择改进型 Czerny-Turner 光谱仪作为宽波段临边临边探测仪的光谱仪结构, 为实现光瞳匹配, 光谱仪设计成物方远心. 选择光栅的刻线密度为 300 g/mm, 由于工作波段包含紫外波段, 楔形柱面透镜的材料选择熔石英, 它在中心波长 500 nm 处的折射率 n 为 1.462. 取聚焦镜的离轴角 α_2 为 7° , 中心波长主光线对光栅基底法线的入射角 i 为 5° , 根据上节中自己编制的 MATLAB 程序, 计算出改进型 Czerny-Turner 光谱仪的初始结构参量, 然后再利用 ZEMAX 光学设计软件进行光线追迹和优化设计.

图 6 为优化设计的改进型 Czerny-Turner 光谱仪的光学结构图.

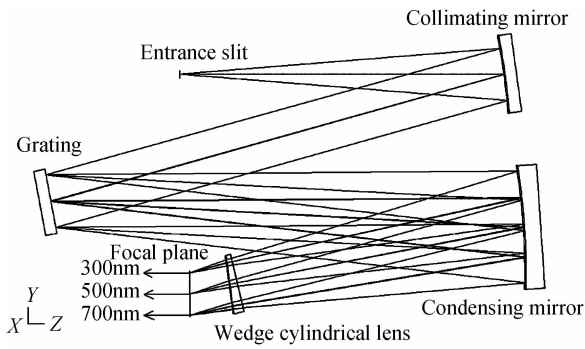


图 6 改进型 Czerny-Turner 光谱仪光学结构
Fig. 6 Optical construction for modified Czerny-Turner spectrometer

为了比较,图 7(a)给出了传统的 Czerny-Turner 光谱仪焦面上的点列图分布.从图 7(a)可以看出,入射狭缝上的一点在像面上扩展成一个大小近似为 $60\ \mu\text{m}$ (狭缝宽度方向) $\times 1\ \text{mm}$ (狭缝高度方向)的弥

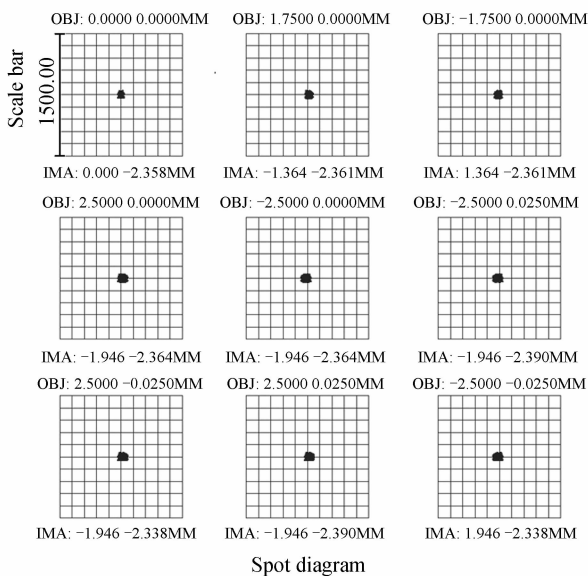
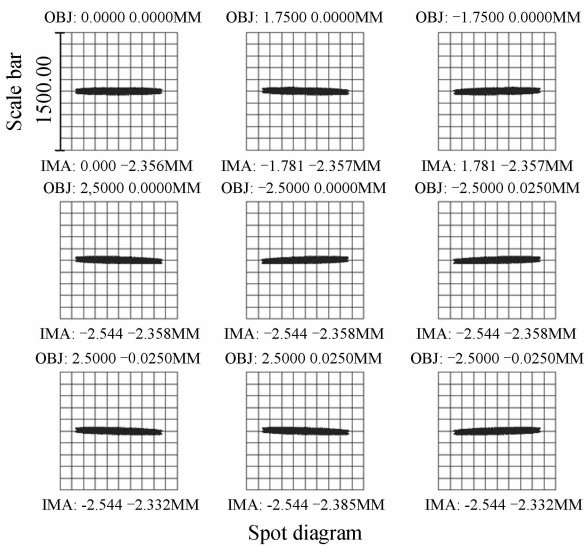


图 7 像面上点列图分布
Fig. 7 Spot diagrams at the image plane

散斑,即存在严重的像散.图 7(b)给出了改进型 Czerny-Turner 光谱仪焦面上的点列图分布.从图 7(b)可以看出,采用楔形柱面透镜校正像散后,入射狭缝上的一点在像面上形成一个大小约为 $60\ \mu\text{m}$ 的圆形弥散斑的,即像散得到充分校正.

图 8(a)给出了改进型 Czerny-Turner 光谱仪在狭缝高度方向上点列图均方根 (root Mean Square, RMS) 值半径随波长的变化关系曲线.为了作为比较,图 8(b)给出了传统的 Czerny-Turner 光谱仪在狭缝高度方向上点列图 RMS 值半径随波长的变化关系曲线.从图 8(a)可以看出,采用楔形柱面透镜校正像散后,在 $300\sim 700\ \text{nm}$ 整个宽的工作波段内,点列图 RMS 半径小于 $19\ \mu\text{m}$,这说明实现了在宽波段像散同时校正.如图 8(b)所示,在不采用楔形柱面透镜的传统的 Czerny-Turner 光谱仪中,点列图 RMS 半径大于 $240\ \mu\text{m}$,即存在很大的像散,严重影响狭缝高度方向的空间分辨率.图 9(a)~(c)为改进型 Czerny-Turner

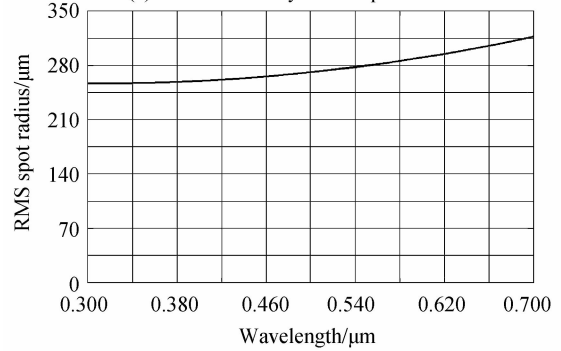
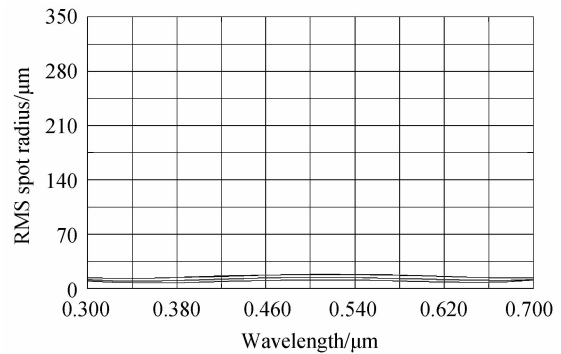
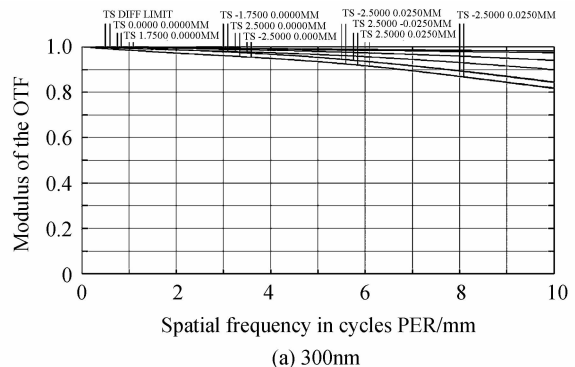


图 8 点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线
Fig. 8 RMS spot radius versus wavelength



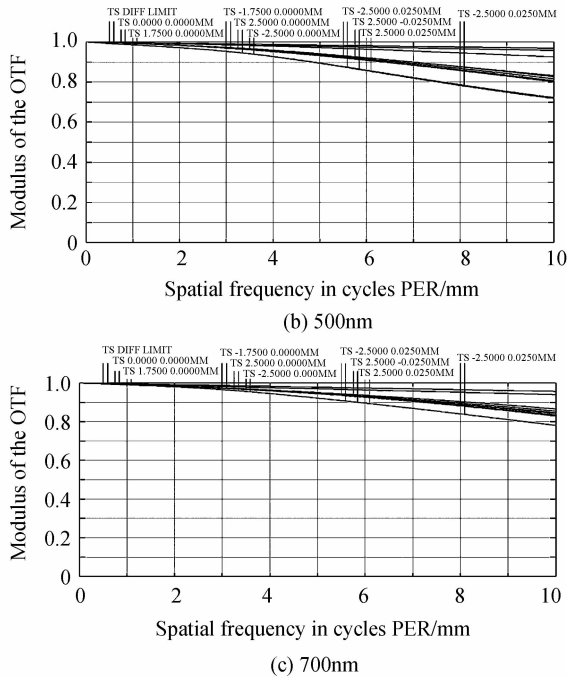


图9 改进型 Czerny-Turner 光谱仪的 MTF
Fig. 9 MTF of different spectral bands for Modified Czerny-Turner spectrometer

光谱仪不同谱段的光学传递函数曲线,可以看出特征频率 10 lp/mm 处,各个谱段的各个视场的光学传递函数均大于 0.7,这说明在整个宽波段内同时获得了良好的成像质量,满足指标要求。

4 临边探测仪全系统设计

多种结构型式的望远镜均可与改进型 Czerny-Turner 光谱仪匹配组成临边探测仪全系统.本系统覆盖的波段宽(300~700 nm),并且含有紫外波段,因此选择结构简单的离轴抛物面作为望远镜,避免了色差的影响,还可以校正球差.望远镜焦距 120 mm,相对孔径 1:6,离轴量 25 mm.为与光谱仪进行光瞳匹配,望远镜具有像方远心结构.图 10 为望远镜的光学结构图,孔径光阑位于离轴抛物面的焦面上实现了像方远心.如图 11 所示,望远镜的光学传递函数在特征频

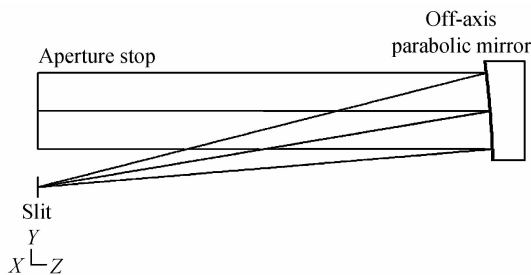


图 10 望远镜光学结构
Fig. 10 Optical construction for telescope

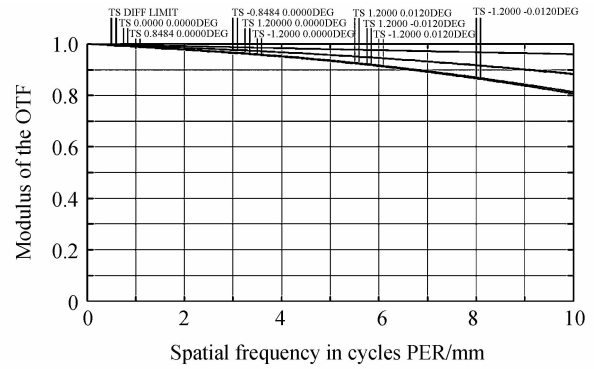


图 11 望远镜的光学传递函数曲线
Fig. 11 MTF of the telescope

率 10 lp/mm 处大于 0.8,完全满足成像质量要求。

望远镜像方远心,光谱仪物方远心,二者光瞳匹配,并且望远镜的像方数值孔径与光谱仪的物方数值孔径匹配.将离轴抛物面望远镜与改进型 Czerny-Turner 光谱仪连接得到临边探测仪全系统的光学结构如图 12.图 13(a)~(c)为临边探测仪全系统不同谱段的光学传递函数曲线,可以看出不同谱段的光学传递函数均达到 0.69 以上,在整个宽波段内同时获得了良好的成像质量,满足指标要求。

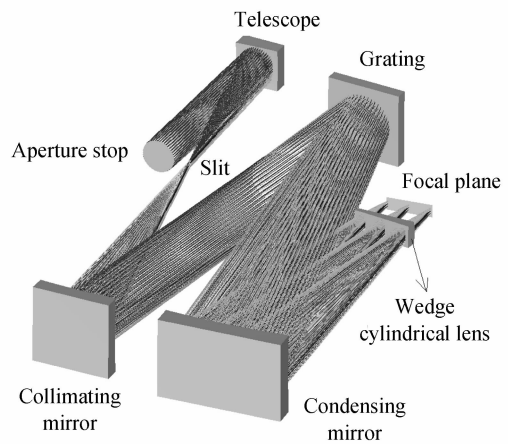
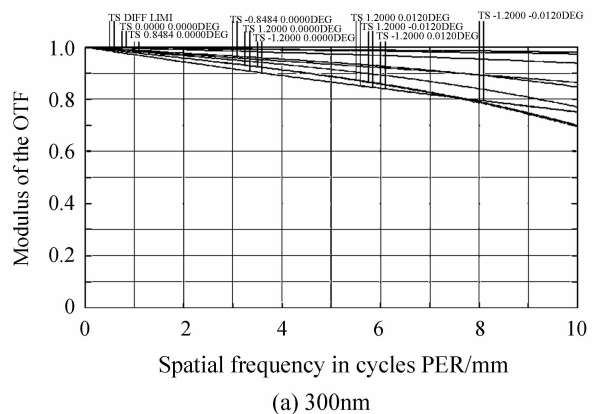


图 12 临边探测仪全系统光学结构
Fig. 12 Layout of optical system of limb sounder



(a) 300nm

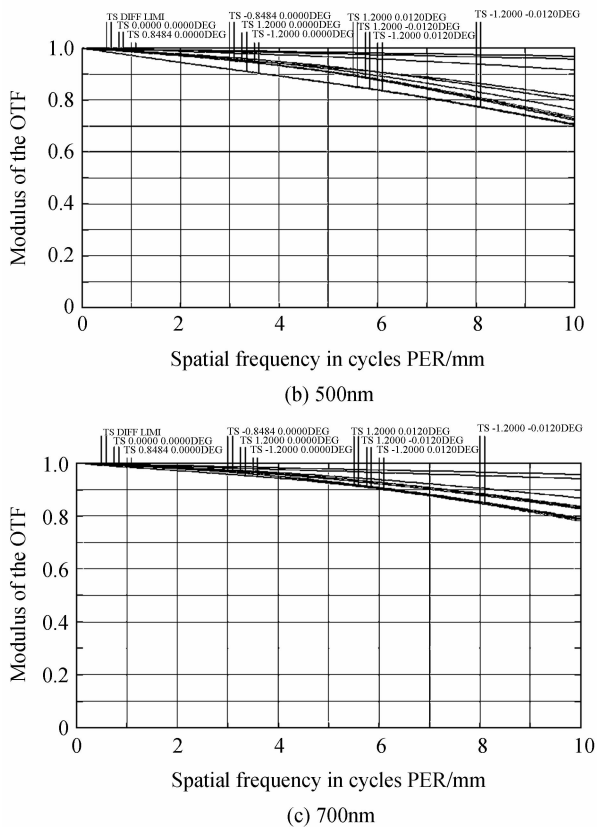


图 13 临边探测仪全系统不同谱段的 MTF

Fig. 13 MTF of different spectral bands for Limb sounder

5 结论

星载宽波段大气痕量气体临边探测仪已成为空间大气痕量气体探测领域的迫切需求,本文提出了一种采用楔形柱面透镜的改进型 Czerny-Turner 光谱仪,实现了在宽波段内同时校正像散,提高了空间分辨率,能够满足星载宽波段临边探测仪的应用要求.将离轴抛物面望远镜与改进型 Czerny-Turner 光谱仪匹配,完成了星载宽波段临边探测仪全系统光学设计,并对设计结果进行了分析.分析结果表明,各谱段的光学传递函数值均达到 0.69 以上,在宽波段内同时获得了良好的成像质量,完全满足成像质量要求,并且结构紧凑,适合空间遥感应用.

参考文献

- [1] ZHANG Xin-ying, ZHANG Peng, FANG Zong-yi, *et al.* Method of retrieving refractive index of aerosol particles[J]. *Meteorological Monthly*, 2007, **33**(7): 3-13.
张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术检测大气痕量气体的研究进展[J]. *气象*, 2007, **33**(7): 3-13.
- [2] ZHU Yan-wu, LIU Wen-qing, XIE Pin-hua, *et al.* Monitoring and analysis of atmospheric pollutants in traffic ban period of Beijing with DOAS[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2040-2045.
朱燕舞, 刘文清, 谢品华, 等. 北京限行期间大气污染物的差分吸收光谱监测与分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 2040-2045.
- [3] WANG Zi-jun, CHEN Sheng-bo, YANG Chun-yan, *et al.* DOAS tomography for the retrieval of trace gas profiles from satellite-based UV-Vis limb spectra[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **9**(2): 020101-1-020101-4.
- [4] XUE Qing-sheng, LIN Guan-yun, SONG Ke-fei. Optical design of spaceborne shortwave infrared imaging spectrometer with wide field of view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 673-678.
薛庆生, 林冠宇, 宋克非, 等. 星载大视场短波红外成像光谱仪光学设计[J]. *光子学报*, 2011, **40**(5): 673-678.
- [5] YUAN Li-yin, HE Zhi-ping, SHU Rong, *et al.* Optical design of a SWIR PGP imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 831-834.
袁立银, 何志平, 舒嵘, 等. 短波红外棱镜-光栅-棱镜成像光谱仪光学系统设计[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 831-834.
- [6] LEWELLYN E J, LLOYD N D, DEGENSTEIN D A, *et al.* The OSIRIS instrument on the Odin spacecraft[J]. *Canada Journal of Physics*, 2004, **82**(6): 411-422.
- [7] RAULT D F, LUMPE J, EDEN T, *et al.* The OMPS limb profiler instrument an alternative data analysis and retrieval algorithm[C]. *SPIE*, 2009, **7474**: 74741R-1-74741R-12.
- [8] ZHANG Jun-qiang, WU Qing-wen, YAN Chang-xiang. Measurement and correction of stray light of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(3): 552-560.
张军强, 吴清文, 颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光测量与修正[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(3): 552-560.
- [9] LIU Yu-juan, Bayanheshing, CUI Ji-cheng, *et al.* Interferometric alignment of imaging spectrometer with convex gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1736-1742.
刘玉娟, 巴音贺希格, 崔继承, 等. 凸面光栅成像光谱仪的干涉法装调[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(8): 1736-1742.
- [10] 吴国安. 光谱仪器设计[M]. 北京: 科学出版社, 1978.: 185-199.
- [11] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LU Feng-qin. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(1): 11-16.

Optical Design of Spaceborne Broadband Limb Sounder for Detecting Atmospheric Trace Gas

XUE Qing-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 13033, China)

Abstract: In order to meet the urgent requirements of detecting atmospheric trace gas in limb observation geometry, an optical system of spaceborne broadband limb sounder for detecting atmospheric trace gas is designed. The system is an imaging spectrometer with the working wavelength band from $0.3 \mu\text{m}$ to $0.7 \mu\text{m}$, and its full field of view is 2.4° , focal length is 120 mm, and the relative aperture is $1:6$. To avoid the problems of the classical Czerny-Truner spectrometer, such as low spatial resolution caused by large astigmatism, a modified Czerny-Turner spectrometer is designed, in which astigmatism can be corrected simultaneously in a wide band. By matching the modified Czerny-Turner spectrometer with a off-axis parabolic telescope, an example of limb sounder optical system is designed. Ray tracing, optimization and analysing are performed by ZEMAX software. The analyzed results demonstrate that the astigmatism is substantially corrected, and the MTF for different spectral band is more than 0.69, which satisfies the pre-designed requirement and proves the feasibility of the astigmatism-correction method.

Key words: Optical design; Imaging spectrometer; Czerny-Turner; Astigmatism correction; Spatial resolution