

## 高分辨率星载真空紫外成像光谱仪设计与研究

于磊<sup>1,2</sup>, 林冠宇<sup>1</sup>, 曲艺<sup>1</sup>, 王淑荣<sup>1\*</sup>, 汪龙祺<sup>1</sup>

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 为了实现对大气层中辐射波长分布在真空紫外和近紫外波段(115~300 nm)的粒子探测, 完善大气遥感, 设计了一种高分辨率成像光谱仪, 并开展了原理样机的研制。根据国外已有载荷进行分析, 选用了以离轴抛物镜为望远系统、Czerny-Turner 结构为成像光谱系统的光学方案; 针对真空紫外波段辐射弱的特点选取了带有 MCP 的二维光子计数型探测器。为了实现该光学系统的宽波段成像功能, 在像差理论的基础上引入了几何与一阶微分的数学方法, 解决了传统结构像差校正不均匀、空间分辨率低的缺点; 最终设计得到了改进型的成像光谱仪。对设计结果进行模拟和光谱分辨率计算分析可知这种成像光谱仪全视场全波段调制传递函数值在 0.6 以上, 光谱分辨率达到 1.23 nm, 具有良好的性能。这种方案工程实现性好, 性能优越, 设计方法和设计结果合理可行。

**关键词** 真空紫外; 成像光谱仪; 像差校正; 光谱分辨率

中图分类号: O433.1; TH744.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)12-3417-06

## 引言

大气中的紫外光辐射对人类有着极为重要的意义, 对紫外波段探测数据进行反演建立大气模型, 可以实现大气预警和监测<sup>[1]</sup>。近年来, 国内的星载设备研究主要集中在大于 300 nm 的紫外可见波段和小于 100 nm 的极紫外波段, 而对于包含真空紫外波段的 100~300 nm 的研究尚属空白。这一波段的辐射粒子主要分布在平流层、热层、电离层和极光

带, 其中辐射分布在 200~300 nm 波段内的粒子主要成分如图 1 所示, 它们分布在地球表面 5~50 km 内的大气层中。

辐射分布在 100~200 nm 波段内的粒子(如表 1)主要分布在 50~500 km 的大气层中。

Table 1 Key particle in vacuum ultraviolet in atmosphere

	H <sup>+</sup>	O I	O II	N <sub>2</sub>
波长/nm	121.6	130.4	135.6	140~150, 165~180

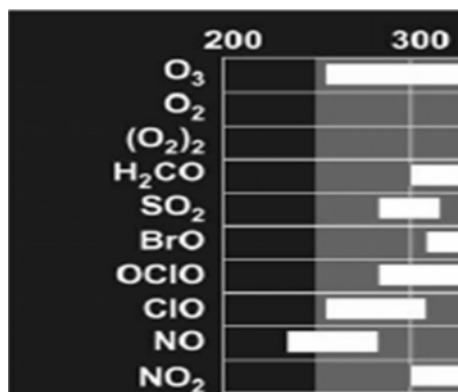


Fig 1 Key particles in near-ultraviolet in atmosphere

成像光谱仪是在多光谱遥感基础上发展形成的新型光学仪器, 它能以高光谱分辨率和高空间分辨率同时获得连续多谱段图像, 兼具摄谱仪的成像功能和单色仪的光谱分析能力, 这些功能可以使遥感应用在光谱维和空间维上同时展开, 达到分析地球表层大气的目的<sup>[2]</sup>。目前光栅型的成像光谱仪应用范围最广。真空紫外波段辐射弱, 易被大气吸收, 难以在地面上进行观测, 且电离层(真空紫外波段主要分布空间)易受扰动, 实时变化快, 因而只有空间遥感才能进行行之有效的探测。目前国外相关星载成像光谱仪主要包括观测远紫外的 AIRS, GUVI, RAIDS 和 IMAGER, 观测近紫外的 GOME, SCIAMACHY, 以及 HST 中的 COS 等<sup>[4-7]</sup>。

本文主要研究了真空紫外成像光谱仪的结构, 并着重对

收稿日期: 2010-11-15, 修订日期: 2011-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41074126)和应用光学国家重点实验室基金项目资助

作者简介: 于磊, 1984 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生

e-mail: top1gods@email.ustc.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: wsrong@ciomp.ac.cn

成像光谱系统进行了优化设计,使之能实现较宽波段的高分辨率成像功能;通过模拟计算对设计结果进行了分析与评价,为原理样机搭建工作奠定了基础。

## 1 成像光谱仪结构简述

目前国外各种相关仪器主要有以下特点:采用镜片数量少的反射式系统,如 AIRS 的 Ebert-Fastie 结构、RAIDS 的 Wadsworth 结构和 COS 的 Rowland 结构;其传输效率较低,因此普通探测器如 CCD 等无法应用,需要使用带有 MCP 的光子计数型探测器;光学可调参数少,为实现好的成像质量,大多采用复杂的非球面镜和非球面光栅制造技术。基于此我们选择了 Czerny-Turner 装置,它使用了平面光栅,结构加工与装调简单方便。并对传统结构的劣势进行了针对性的改进,从而获得了成像效果优良的结构。

带有 MCP 的二维成像光子计数型探测器有 XDL 探测器、WSA 探测器、MAMA 探测器<sup>[8]</sup>等,这种类型的探测器特点是,通过微通道板实现入射光子的二次电子碰撞,获得 $10^6 \sim 10^8$ 的电子增益,并对落在阳极上的电子云进行位置解码获得二维成像信息和光谱信息,灵敏度高,适用于微弱光探测。在样机初步实验中我们选择了 WSA 探测器。另外,裸 MCP 表面的量子效率低,需要加镀光电阴极以提高响应;对于 $100 \sim 200$  nm 波段,光电阴极采用碘化铯,而对 $200 \sim 300$  nm 波段,光电阴极则采用碲化铯。根据探测的粒子波段分析可知在 $190 \sim 210$  nm 处无重要粒子辐射分布,允许一定间断,故可将探测器接收表面按设计进行分块镀膜,以实现光路的同时探测的功能。

由探测波段可知,在 $240 \sim 300$  nm 处会有 $120 \sim 150$  nm 的二级谱影响,故在入射狭缝后需放置滤光片轮;样机是根据临边观测原理进行设计的,这种观测方式是按照大气层高度来进行切片观测,两种波段粒子分布高度不同,所以滤光片轮可以根据观测高度来进行切换,在近紫外探测时切换能去除 $200$  nm 以下波段的高通滤光片,在远紫外观测时则切换能去除 $200$  nm 以上波段的低通滤光片。在实现成像功能时二级谱基本无影响,可以不使用滤光片。基本结构示意图如图 2。

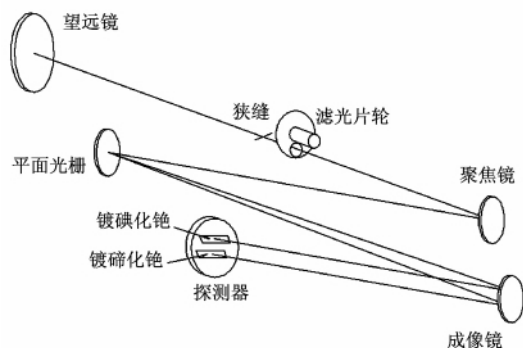


Fig 2 The structure of the imaging spectrometer

## 2 光学系统设计研究

望远镜系统使用离轴抛物镜,所成狭缝像差小,易设计。后续光谱成像系统是本文的主要研究内容。

### 2.1 主要像差

Czerny-Turner 系统由准直镜、平面光栅和聚焦镜共同构成。如图 3。

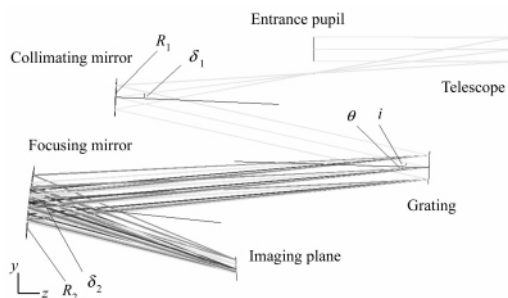


Fig 3 Schematic diagram of Czerny-Turner imaging spectrometer

系统的主要像差为慧差和像散。慧差产生的原因是光线的离轴入射。根据 Shafer 方程<sup>[9]</sup>有

$$\sin \delta_2 / \sin \delta_1 = (R_2 / R_1)^2 (\cos i \cos \delta_2 / \cos \theta \cos \delta_1)^3 \quad (1)$$

$R_1$  和  $R_2$  是准直镜和聚焦镜的曲率半径,  $\delta_1$  和  $\delta_2$  是准直镜和聚焦镜中心光线的入射角,  $i$  和  $\theta$  为光栅的入射角和衍射角。入射角通常较小,所以  $\cos \delta_1^3$  和  $\cos \delta_2^3$  近似等于 1, 式(1)可改写为

$$\sin \delta_2 / \sin \delta_1 = (R_2 / R_1)^2 (\cos i / \cos \theta)^3 \quad (2)$$

将  $R_1$ ,  $R_2$  和  $\delta_1$  设为常量,对聚焦镜的入射角  $\delta_2$  进行优化可消除慧差。

反射镜子午方向和弧矢方向上的不同焦距会导致狭缝像沿狭缝高度扩散,从而产生像散。系统扩展焦距表示如下<sup>[10]</sup>

$$\Delta f = \Delta(f_{1S} - f_{1T}) + \Delta(f_{2S} - f_{2T}) \quad (3)$$

式中:

$$f_{1T} = (R_{1T}/2) \cos \delta_1, f_{1S} = (R_{1S}/2) \sec \delta_1 \quad (4)$$

$f_1$  为准直镜焦距,  $f_2$  为聚焦镜焦距,  $T$  和  $S$  代表子午方向和弧矢方向。当  $\Delta f$  为 0 时,像散最小。设计时取准直镜为球面镜,固定聚焦镜弧矢方向上的曲率半径,只对其子午方向上的曲率半径进行调整就可以消除像散,这种聚焦镜的形式是超环面镜。需要注意像散的校正仍依赖于波长<sup>[11]</sup>。

### 2.2 宽波段像差校正条件

传统 Czerny-Turner 系统难以在宽波段上保持相同的成像性能。这是由于各个波长不能在聚焦镜上保持相同的入射角,因此使各个波长得到校正的最优条件也不同<sup>[12]</sup>。为此,我们引入向量几何和一阶微分方法来推导该系统全波段像差校正条件。

如图 4 所示,建立一个二维向量坐标系,可以获得几个向量三角形:  $ABO$ ,  $AB'O$ ,  $OBC$ ,  $OB'C'$  和  $OCC'$ 。各个向量表示如下

$$\begin{cases}
 \vec{OB} = (-R_2 \cos(\theta - \delta_2), -R_2 \sin(\theta - \delta_2)) \\
 \vec{OB'} = (-R_2 \cos(\theta' - \delta'_2), -R_2 \sin(\theta' - \delta'_2)) \\
 \vec{AB} = (-L_{GF} \cos\theta, -L_{GF} \sin\theta) \\
 \vec{AB'} = (-L'_{GF} \cos\theta', -L'_{GF} \sin\theta') \\
 \vec{CB} = [-L_{FI} \cos(2\delta_2 - \theta), L_{FI} \sin(2\delta_2 - \theta)] \\
 \vec{CB'} = [-L'_{FI} \cos(2\delta'_2 - \theta'), L'_{FI} \sin(2\delta'_2 - \theta')] \\
 \vec{OC} = [s \sin(\alpha - 2\delta_2 + \theta), -s \cos(\alpha - 2\delta_2 + \theta)]
 \end{cases} \quad (5)$$

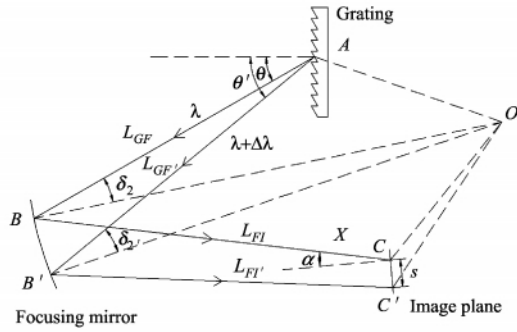


Fig 4 Showing the central wavelength  $\lambda$  and another with a slightly difference  $\Delta\lambda$  in wavelength

根据几何关系可以获得一组等式

$$\begin{cases}
 \vec{OB} - \vec{AB} = \vec{OA}, \vec{OB'} - \vec{AB'} = \vec{OA'} \\
 \vec{OB} - \vec{CB} = \vec{OC}, \vec{OB'} - \vec{CB'} = \vec{OC'} \\
 \vec{OC'} - \vec{OC} = \vec{CC'}
 \end{cases} \quad (6)$$

式(5)和(6)联立得到

$$\begin{cases}
 L_{GF} \cos\theta - R_2 \cos(\theta - \delta_2) = L'_{GF} \cos\theta' - R_2 \cos(\theta' - \delta'_2) \\
 L_{GF} \sin\theta - R_2 \sin(\theta - \delta_2) = L'_{GF} \sin\theta' - R_2 \sin(\theta' - \delta'_2)
 \end{cases} \quad (7)$$

和

$$\begin{cases}
 R_2 \cos(\theta - \delta_2) - R_2 \cos(\theta' - \delta'_2) + \\
 L'_{FI} \cos(2\delta'_2 - \theta') - L_{FI} \cos(2\delta_2 - \theta) = \\
 s \sin(\alpha - 2\delta_2 + \theta) \\
 R_2 \sin(\theta - \delta_2) - R_2 \sin(\theta' - \delta'_2) + \\
 L'_{FI} \sin(2\delta'_2 - \theta') - L_{FI} \sin(2\delta_2 - \theta) = \\
 s \cos(\alpha - 2\delta_2 + \theta)
 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $L_{GF}$  和  $L'_{GF}$  分别为聚焦镜到光栅的距离和聚焦镜到像面的距离,  $\alpha$  是像面法线与衍射主光线夹角,  $s$  为像面宽度。由于最优入射角是与波长相关的, 因此各波长到聚焦镜上的入射角相同时, 各波长的像差可在相同的光学参数下同时得到校正。令入射角  $\delta_2$  和距离  $L_{FI}$  与光栅衍射角  $\theta$  无关, 将方程(8)对  $\theta$  进行微分, 可以得到数学表达式如下

$$\begin{cases}
 \frac{d\theta_F}{d\theta} = 1 - \frac{L_{GF}}{R_2 \cos\delta_2} = 0 \\
 \frac{dL_{FI}}{d\theta} = \tan\alpha \left( L_{GF} + L_{FI} - \frac{2L_{GF}L_{FI}}{R \cos\delta_2} \right) - L_{GF} \tan\delta_2 = 0
 \end{cases} \quad (9)$$

因此

$$\begin{cases}
 L_{GF} = R_2 \cos\delta_2 \\
 L_{FI} = R_2 \cos\delta_2 \left( 1 - \frac{\tan\delta_2}{\tan\alpha} \right)
 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)即为光学系统宽波段像差校正条件。

### 3 光学系统实例设计与分析

#### 3.1 实例设计

根据之前所述原理设计了用于真空紫外大气探测的成像光谱仪光学系统。设计仪器运行在 833 km 高的轨道上, 与临边观测点的最远距离为 3 300 km。仪器观测 115~300 nm 波段, 覆盖 5~500 km 的大气高度, 使用探测器像元尺寸为  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 。设计光学系统设计参数如表 2,  $F$  数为 8, 成像光谱仪焦距为 133 mm, 视场角  $4^\circ \times 0.05^\circ$ 。

Table 2 Parameters of optical system

参数	值
入瞳	$\phi 15 \text{ mm}$
望远镜形式	离轴抛物镜
离轴量	15 mm
焦长	125 mm
入缝尺寸	$8.8 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$
对应视场角	$4^\circ \times 0.05^\circ$
准直镜形式	球面镜
曲率半径	250 mm
光栅形式	平面光栅
刻线密度	$300 \text{ 线} \cdot \text{mm}^{-1}$
入射角	$-10.37^\circ$
衍射角	$-7.24^\circ$
聚焦镜形式	超环面镜
入射角 $\delta_2$	$11.38^\circ$
曲率半径, $r_1^{\frac{1}{2}}(T, S)$	278.6 mm, 260 mm

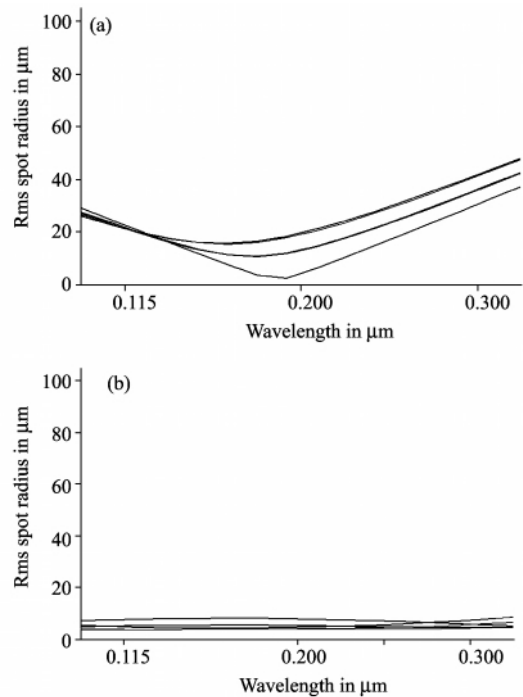


Fig 5 Comparison of results of the traditional structure (a) and the advanced structure (b)

### 3.2 设计结果分析

图 5 比较了传统结构和改进结构的点列图半径随波长的变化值, 可以看到, 传统结构在探测波段的中心波长处和边缘波长处性能相差较多; 改进系统则在全波段都有良好的成像性能, 两个方向均达到了  $20 \mu\text{m}$ , 像差得到了充分校正。

图 6 给出了改进结构各波长的调制传递函数(MTF)曲线, 在指标要求的奈奎斯特频率( $20 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ )下, 全视场全波段 MTF 值可达到 0.6 以上, 满足指标要求。

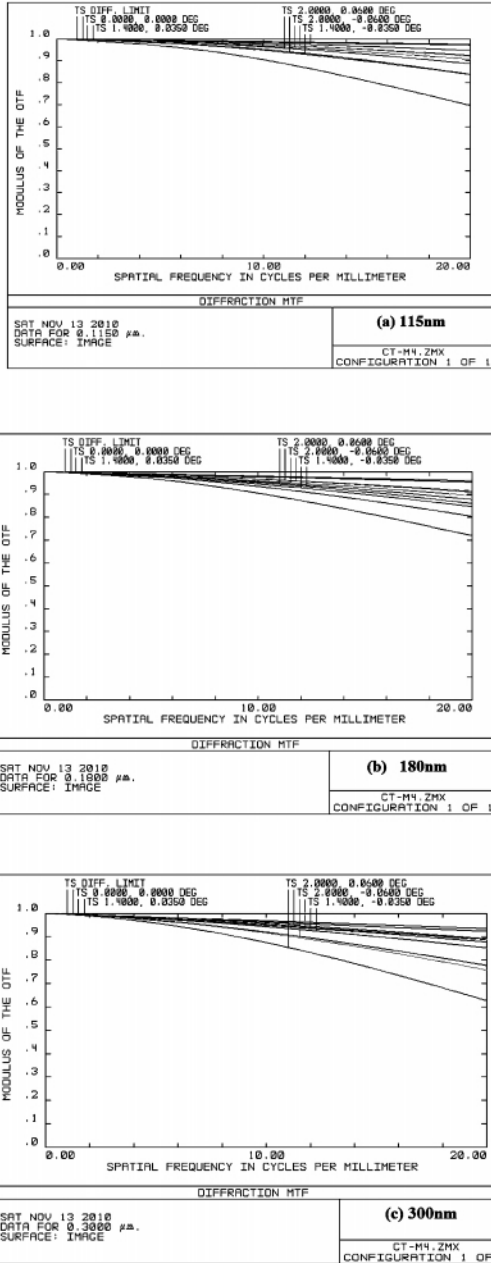


Fig 6 MTF of the central and marginal wavelengths of the design

### 3.3 光谱分辨率分析

在像差得到良好校正的情况下, 仪器的光谱分辨率主要与光栅的分辨能力、入射狭缝宽度和探测器像元尺寸相关<sup>[13]</sup>。其中, 光栅的分辨能力是指其分开相邻两条等强度窄

谱线的能力, 根据瑞利准则可以表示为

$$R = \lambda / \delta\lambda = mN \quad (11)$$

式中,  $N$  为光栅刻线总数。设计样机的光栅刻线总数为 7 500 条, 光栅自身的光谱分辨率  $\delta\lambda$  约为  $0.02 \text{ nm}$ , 远高于仪器光谱分辨率, 所以光栅对光谱分辨率的影响可以基本忽略。

理想狭缝认为是无穷窄的, 但实际应用狭缝必然具有一定宽度。设入射狭缝宽度为  $b_1$ , 则在仪器中像面(出射狭缝平面)上所成的狭缝像谱线宽度为  $b'_1$ 。二者的关系为

$$b'_1 = \frac{f'_2}{f_1} b_1 = \frac{f_2 \cos i}{f_1 \cos \theta} b_1 \quad (12)$$

式中  $f'_2 = f_2 \cos i$  和  $f'_1 = f_1 \cos \theta$  分别为成像镜和准直镜的平行光管焦距。将光栅方程对衍射角  $\theta$  进行微分得到

$$d \cos i \frac{\partial i}{\partial \theta} + d \cos \theta = m \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \quad (13)$$

在成像光谱仪中, 入射角是固定的, 因此有

$$\frac{\partial i}{\partial \theta} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} = \frac{m}{d \cos \theta} \quad (14)$$

式中,  $\partial \theta / \partial \lambda$  称为角色散, 即当波长有微小改变时衍射角的变化值。如图 7, 设仪器能够区分的最小光谱间隔为  $\Delta\lambda$ , 则这两条谱线在像面上距离为  $\Delta x$ 。

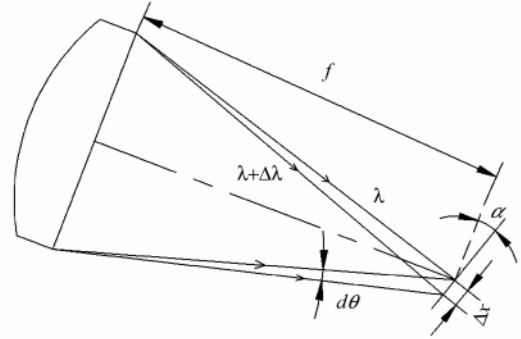


Fig 7 Resolution of different wavelengths

由几何关系可得

$$\Delta x = \frac{\Delta \lambda f_2 d \theta}{\cos \alpha} = \frac{m \Delta \lambda f_2}{d \cos \theta \cos \alpha} \quad (15)$$

式中  $\alpha$  为像面相对于垂直面的倾角,  $d\theta$  即为角色散。将本式与式(12)联立得到成像光谱仪光谱分辨率公式, 其中  $\Delta x$  即为出射狭缝像谱线宽度  $b'_1$

$$\Delta \lambda = \frac{f_2 \cos i}{f_1 \cos \theta} b_1 \frac{d \cos \theta}{m f_2} \cos \alpha = \frac{d \cos i}{m f_1} b_1 \cos \alpha \quad (16)$$

根据设计结果,  $d = 1/300 \text{ mm}$ ,  $i = 10.37^\circ$ ,  $b_1 = 0.05 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $m = 1$ ,  $f_1 = 125 \text{ mm}$ , 从而得到光谱分辨率为  $1.23 \text{ nm}$ 。

探测器像元同样具有一定尺寸, 在对入射光进行采样收集成像时, 应符合抽样定理, 即探测器像元空间频率至少为光谱变化频率 2 倍, 由此可以获得探测器最小分辨波长差

$$\Delta \lambda_{\text{de}} = 2a \frac{d\lambda}{d\lambda} \cos \alpha = \frac{2ad}{m f_2} \cos \theta \cos \alpha \quad (17)$$

式中  $a$  为像元尺寸,  $d\lambda/d\lambda$  为光栅逆线色散。以 XDL 探测器为例, 像元尺寸为  $25 \mu\text{m}$ ,  $f_2 = 139.3 \text{ mm}$ , 根据方程(17), 用 Matlab 计算出  $\Delta \lambda_{\text{de}}$  随波长变化的曲线如图 8, 根据图中曲

线可知探测器的最小分辨波长差小于狭缝像谱线宽度  $\Delta\lambda$ , 因此, 设计系统光谱分辨率由狭缝像对应的光谱分辨率决定。

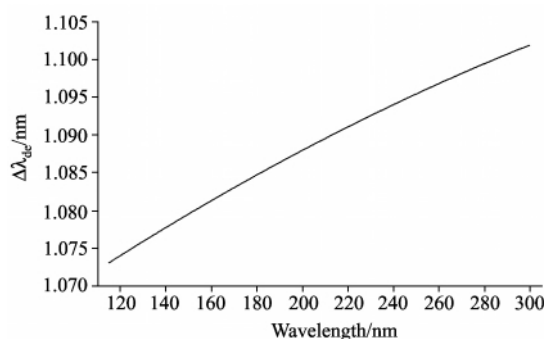


Fig 8 Relation curve of detector's spectral resolution and wavelength

## 4 结 论

首先根据对国外先进技术的分析确定了适用于真空紫外的成像光谱仪光学系统和探测器, 以及二级谱的消除的整体结构。之后设计了样机的光学系统, 并通过几何方法和一阶微分方法获得了中心波长和边缘波长光线到像面上的像差纠正条件, 完善了成像功能, 使系统在全波段内分辨率趋近于一致。最后通过 ZEMAX 光学设计软件进行了模拟, 结果显示, 全视场调制传递函数在全波段达到 0.6 以上, 满足成像质量要求; 又通过对光谱分辨率进行分析计算, 确定了影响光谱分辨率的主要因素, 计算结果为 1.2 nm。目前样机正在研制中, 并准备根据初步实验结果进行进一步的改进。这种设计研究的成功, 将对用于真空紫外探测的星载成像光谱仪的研制提供重要的理论基础和实践指导。

## References

- [1] LÜ Da-ren, CHEN Ze-yu, BIAN Jian-chun, et al(吕达仁, 陈泽宇, 卞建春, 等). Chinese J. Atmospheric Sciences(大气科学), 2008, 32(4): 782.
- [2] ZHENG Yu-quan, WANG Hui, WANG Yi-fan(郑玉权, 王慧, 王一帆). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17(11): 2629.
- [3] David J Sahnou, Charles D Keyes, Thomas B Ake, et al. Proc. SPIE, 2010, 7731: 39.
- [4] Robert P McCoy, Kenneth F Dymond, Gilbert G Fritz, et al. Optical Engineering, 1994, 33(2): 423.
- [5] Paxton L J, Christensen A B, Morrison D, et al. Proc. of SPIE, 2004, 5660: 228.
- [6] Larry J Paxton, Ching I Meng, Glen H Fountain, et al. Proc. SPIE, 1992, 1764: 161.
- [7] Goldsten J O, Humm D C, Paxton L J, et al. Proc. SPIE, 1998, 3765: 408.
- [8] Arthur B Shafer, Lawrence R Megill, Leann Droppleman. J. Opt. Soc. Am., 1964, 54: 879.
- [9] Xu Li, Chen Kexin, He Qingsheng, et al. Applied Optics, 2009, 48(15): 2871.
- [10] Austin D R, Witting T, Walmsley Ian A. Appl. Opt. 2009, 48, 3846.
- [11] YU Lei, QU Yi, LIN Guan-yu, et al(于磊, 曲艺, 林冠宇, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 1(1): 0112011.
- [12] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, et al(薛庆生, 王淑荣, 李福田, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 18(4): 823.

# Design and Study of a High Resolution Vacuum Ultraviolet Imaging Spectrometer Carried by Satellite

YU Lei<sup>1,2</sup>, LIN Guan-yu<sup>1</sup>, QU Yi<sup>1</sup>, WANG Shu-rong<sup>1\*</sup>, WANG Long-qi<sup>1</sup>

1. Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A high resolution vacuum ultraviolet imaging spectrometer prototype carried by satellite applied to the atmosphere detection of particles distribution in 115 ~ 300 nm was developed for remote sensing. First, based on the analysis of advanced loads, the optical system including an off-axis parabolic mirror as the telescope and Czerny-Turner structure as the imaging spectrometer was chosen. Secondly, the 2-D photon counting detector with MCP was adopted for the characteristic that the radiation is weak in vacuum ultraviolet waveband. Then the geometric method and 1st order differential calculation were introduced to improve the disadvantages that aberrations in the traditional structure can not be corrected homogeneously to achieve perfect broadband imaging based on the aberration theory. At last, an advanced example was designed. The simulation and calculation of results demonstrate that the modulation transfer function (MTF) of total field of view is more than 0.6 in the broadband, and the spectral resolution is 1.23 nm. The structure is convenient and predominant. It proves that the design is feasible.

**Keywords** Vacuum ultraviolet; Imaging spectrometer; Spectral resolution; Aberration correction

(Received Nov. 15, 2010; accepted Mar. 20, 2011)

\* Corresponding author