

# 用于电离层探测的单光栅高分辨率成像 光谱仪光学系统研究

于磊<sup>1,2</sup> 王淑荣<sup>1</sup> 曲艺<sup>1</sup> 林冠宇<sup>1</sup> 张振铎<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 为完善国内星载电离层成像光谱仪研究,设计了一种适用于 120~180 nm 波段探测的光学系统。根据探测目标特点,结合国外方案提出了以离轴抛物镜为物镜,超环面光栅为成像光谱系统的方案;为解决传统单光栅结构像差校正不均匀、空间分辨率低等缺点,结合光栅表面方程和光程函数方程进行了理论分析,获得了全波段像差纠正的处理方法;利用 Matlab 编程计算初始结构,并用 Zemax 设计优化,成功得到了  $F$  数为 6.8,焦距为 102.3 mm,具有良好空间分辨率和高光谱分辨率的星载电离层成像光谱仪系统。通过对结果进行分析可知,全系统的像差得到充分校正,全视场全波段调制传递函数值在 0.7 以上,光谱分辨率 0.56 nm,满足设计指标要求,设计方法和设计结果合理可行。

**关键词** 光学设计;成像光谱仪;电离层;超环面光栅;像差校正

**中图分类号** O433.1; TH744.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0712005

## Single-Grating Optical System of Imaging Spectrometer with High Resolution for Ionosphere Detection

Yu Lei<sup>1,2</sup> Wang Shurong<sup>1</sup> Qu Yi<sup>1</sup> Lin Guanyu<sup>1</sup> Zhang Zhenduo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** An optical system working in 120~180 nm is developed for the study of ionospheric imaging spectrometer carried by satellite in China. The scheme, that the telescope is an off-axis parabolic mirror and the imaging spectral system is a single toroidal grating, is assumed with comparing different programs in foreign countries, based on characteristics of targets. Then the theory is studied by introducing the surface equation of the grating and optical path function, to get a novel broadband aberration-corrected method to resolve the disadvantages of traditional single grating structure, non-homogeneous aberration correction and low spatial resolution. The original structure is obtained by Matlab and is simulated by Zemax. A system operating in 120~180 nm with  $F$ -number of 6.8, focal length of 102.3 mm is designed. This imaging spectrometer has high spatial resolution and spectral resolution. The results demonstrate that aberrations are totally corrected, the modulation transfer function (MTF) of all field of view is more than 0.7 in the waveband, and the spectral resolution is 0.56 nm. It proves that the design which can satisfy the requirement of the design specifications is more convenient and more predominant.

**Key words** optical design; imaging spectrometer; ionosphere; toroidal grating; aberration correction

**OCIS codes** 120.0280; 120.4570; 120.6200; 300.6190

收稿日期: 2010-10-26; 收到修改稿日期: 2011-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(41074126)资助课题。

作者简介: 于磊(1984—),男,博士研究生,主要从事紫外遥感仪器设计及图像遥感处理等方面的研究。

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

导师简介: 王淑荣(1961—),女,研究员,主要从事空间紫外光学遥感技术方面的研究。E-mail: wsrong@ciomp.ac.cn

## 1 引言

成像光谱仪是一种兼具摄谱仪的成像功能和单色仪的高光谱分辨率的新一代光学遥感仪器,它可以高分辨率同时获得连续的超多谱段图像,从而使遥感应用在空间维和光谱维上同时展开,因而正在得到广泛的应用<sup>[1]</sup>,其中光栅光谱仪的应用最广<sup>[2]</sup>。

近年来,国内对电离层探测的星载仪器研究正在逐步展开,而在这方面美国已经进行了 20 多年的研究,并先后发射了一系列先进成像光谱仪载荷<sup>[3~6]</sup>。电离层中的粒子辐射波段主要为 120~180 nm 的远紫外区域,实时变化快,动态范围大,辐射弱且被大气完全吸收,在地面上无法观测,因而只有天基探测才是对电离层进行研究的主要手段<sup>[7]</sup>。

本文主要对适用于电离层探测的单光栅光谱成像结构进行了研究,在像差理论的基础上对这种系统进行了改进,并对优化结果进行了讨论。

## 2 光学结构分析选择

通过对国外已有载荷的共同特点进行分析,可以得到以下结论:

1) 系统基本采用镜片数量等于或少于 4 片的反射式系统。这是由于远紫外波段信号微弱,为了保证仪器有足够的信噪比和能接收到足够的光能量,镜片数量需要尽可能得少以提高系统传输效率。比如对早期小型载荷的 Elbert-fastie 系统进行改进后的 Czerny-Turner 结构, GUVI 的单超环面光栅结构, RAIDS 的 Wadsworth 球面光栅结构,和 IMAGER 的 Gregorian 望远系统与滤光片分光的结构。

2) 由于光学系统镜片数量少,可调参数少,故各系统较难实现良好的成像功能。为了提高成像质量,国外使用了较多的非常规技术,比如 RAIDS 中的凹面全息光栅, IMAGER 中的多次非球面镜等,高衍射效率的凹面全息光栅和高次非球面镜的制作造价昂贵,不具有通用性;而 GUVI 的超环面光栅的像差校正主要针对像散,对其他像差的矫正能力并不是很强。这使得这些光学系统在像面上的弥散斑直径一般都超过 30  $\mu\text{m}$ 。

基于此,我们选择了单光栅结构作为光谱成像系统以保证系统的最大传输效率。对于单光栅系统,为了解决其成像质量差的问题,目前已经做过很多的研究,比如,使用全息消像差光栅来解决凹面光栅彗差与球差不能消除的问题<sup>[8]</sup>;用变间距的刻划

凹面光栅同时去除彗差、球差和像散<sup>[9]</sup>以及使用椭圆面或超环面刻划光栅来去除像散带来的影响<sup>[10]</sup>。在当今的制作技术水平下,变间距凹面光栅的制作十分困难和昂贵;凹面全息光栅的消像差功能主要针对于具体使用系统,通用性较低;相对而言,椭圆面和超环面刻划光栅具有较好的工程应用性,但二者的引入通常只针对像散,对其他像差的纠正研究较少。基于此,主要对超环面刻划光栅的成像光谱仪结构进行研究,并在光程函数理论的基础上得到了相对较为通用的完善成像条件。

## 3 光谱成像系统分析与设计

对于离轴抛物镜的望远镜系统,轴上像点是没有像差的,通过调整离轴量和入射孔径可将轴外像差(主要是彗差和像散)降到最低。由于光谱成像系统是由单光栅构成,所以对系统的像差纠正实际上就是对光栅的各个参数进行调整。因此讨论的重点集中在超环面光栅上。

### 3.1 超环面光栅光程表达式

如图 1 所示,以光栅面中心点  $O$  为原点建立直角坐标系,光栅线槽方向与  $Z$  轴平行,栅距为  $d$ 。 $P(u,w,l)$  为光栅面上任意一点; $A(x,y,z)$  和  $A'(x',y',z')$  分别为光源(沿  $Z$  方向的狭缝)和像上的对应点, $B(x,y,0)$  和  $B'(x',y',0)$  则为  $A$  和  $A'$  在  $XOY$  平面上的投影点。 $\alpha$  和  $\alpha'$  分别对应  $AO$  和  $A'O$  与  $XOY$  平面的夹角, $i$  和  $\theta$  则满足光栅方程。 $r$  和  $r'$  分别表示  $AO$  和  $A'O$  在平面  $XOY$  上的投影长度,这两个长度一般符合罗兰圆条件,或在罗兰圆条件附近一定的长度范围内。

由此可以获得  $AP$  和  $A'P$  的几何关系

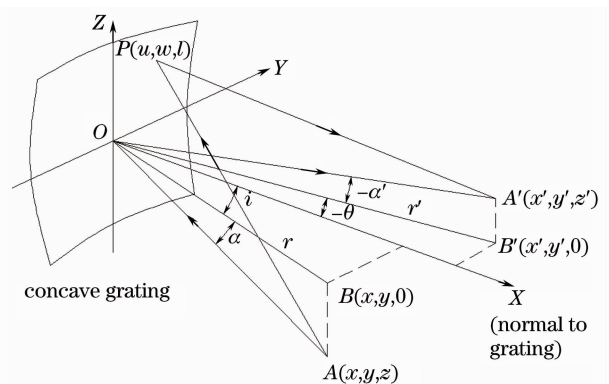


图 1 凹面光栅工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the concave grating

$$\begin{cases} AP^2 = (x-u)^2 + (y-w)^2 + (z-l)^2 \\ A'P^2 = (x'-u)^2 + (y'-w)^2 + (z'-l)^2 \end{cases} \quad (1)$$

要求通过相邻两条线槽的光线的光程相差为波长的整数倍。光程函数表示为

$$F = AP + A'P = AO + A'O - \frac{w}{d}m\lambda. \quad (2)$$

对于反射镜,理想的成像条件是光程函数  $F = AP + A'P = AO + A'O = \text{常数}$ ,但是,对于光栅成像,

超环面的表达式为

$$u = R - R \left[ 1 - \frac{(\omega^2 + l^2)}{R^2} + \frac{2\rho}{R} \left( \frac{\rho}{R} - 1 \right) \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{l^2}} \right) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中  $R$  为光栅子午面上的曲率半径,  $\rho$  为弧矢面上的曲率半径。在凹面光栅中,  $u, \omega$  和  $l$  与  $R$  相比均为小量,因此根据泰勒级数可将(3)式展开为

$$u = \frac{\omega^2}{2R} + \frac{l^2}{2\rho} + \frac{\omega^4}{8R^3} + \frac{l^4}{8\rho^3} + \frac{\omega^2 l^2}{4R^2 \rho} + \dots \quad (4)$$

在极坐标表示下  $x = r \cos i, y = r \sin i, x' = r' \cos \theta, y' = r' \sin \theta$ , 将(4)式代入(1)式并使用极坐标展开可得

$$\begin{aligned} AP^2 = & z^2 - 2lz + (r - \omega \sin i)^2 + \omega^2 \left( \cos^2 i - \frac{r \cos i}{R} \right) + l^2 \left( 1 - \frac{r \cos i}{\rho} \right) + \left( 1 - \frac{r \cos i}{R} \right) \left( \frac{l^4}{4\rho^2} + \frac{\omega^2 l^2}{2R\rho} \right) + \\ & \frac{\omega^4}{4R^2} \left( 1 - \frac{r \cos i}{R} \right) + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

光栅在实际应用时,其相对孔径和前端狭缝并不会很大,因此  $\omega, l, x$  与  $r$  相比均为较小量,可以再次使用二项式将(5)式展开,令

$$\Delta = z^2 - 2lz + \omega^2 \left( \cos^2 i - \frac{r \cos i}{R} \right) + l^2 \left( 1 - \frac{r \cos i}{\rho} \right) + \left( 1 - \frac{r \cos i}{R} \right) \left( \frac{l^4}{4\rho^2} + \frac{\omega^2 l^2}{2R\rho} \right) + \frac{\omega^4}{4R^2} \left( 1 - \frac{r \cos i}{R} \right) + \dots, \quad (6)$$

则有

$$\begin{aligned} AP = & [(r - \omega \sin i)^2 + \Delta]^{1/2} = (r - \omega \sin i) \left[ 1 + \frac{\Delta}{(r - \omega \sin i)^2} \right]^{1/2} = r - \omega \sin i + \\ & \frac{\Delta}{2(r - \omega \sin i)} - \frac{\Delta^2}{8(r - \omega \sin i)^3} + \dots = r - \omega \sin i + \frac{\Delta}{2r} \left( 1 + \frac{\omega \sin i}{r} + \frac{\omega^2 \sin^2 i}{r^2} + \dots \right) - \\ & \frac{\Delta^2}{8r^3} \left( 1 + \frac{3\omega \sin i}{r} + \frac{6\omega^2 \sin^2 i}{r^2} + \dots \right) + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

同样光程  $A'P$  也可以展开成相似的表达式,这样经过整理后,(2)式变为

$$F = F_{00} + F_{10} + F_{20} + F_{30} + F_{40} + F_{02} + F_{12} + F_{22} + F_{04} + O(\omega^5) + O(l^5) + F_{z0} + F_{z1} + F_{z2} + O(z^3), \quad (8)$$

式中  $O(\omega^5)$  和  $O(l^5)$  表示  $\omega$  和  $l$  的 5 阶以上小量,  $O(z^3)$  表示  $z$  的 3 阶以上小量。(8)式中各项表示为

$$\begin{cases} F_{00} = r + r', \\ F_{10} = \omega \left( \frac{m\lambda}{d} - \sin i - \sin \theta \right), \\ F_{20} = \frac{\omega^2}{2} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} + \frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right), \\ F_{30} = \frac{\omega^3}{2} \left[ \frac{\sin i}{r} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) + \frac{\sin \theta}{r'} \left( \frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right) \right], \\ F_{40} = \frac{\omega^4}{8} \left[ \frac{4\sin^2 i}{r^2} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) - \frac{1}{r} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} \right)^2 + \frac{1}{R^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) + \right. \\ \left. \frac{4\sin^2 \theta}{r'^2} \left( \frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right) - \frac{1}{r'} \left( \frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right)^2 + \frac{1}{R^2} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right) \right]. \end{cases} \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} F_{02} &= \frac{l^2}{2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} + \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right), \\ F_{12} &= \frac{\omega l^2}{2} \left[ \frac{\sin i}{r} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right) + \frac{\sin \theta}{r'} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) \right], \\ F_{22} &= \frac{\omega^2 l^2}{4} \left[ \frac{2\sin^2 i}{r^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right) - \frac{1}{r} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right) + \frac{1}{R\rho} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{2\sin^2 \theta}{r'^2} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) - \frac{1}{r'} \left( \frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right) \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) + \frac{1}{R\rho} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right) \right], \\ F_{04} &= \frac{l^4}{8} \left[ \frac{1}{\rho^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right) - \frac{1}{r} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{\rho^2} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) - \frac{1}{r'} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right)^2 \right]. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} F_{z0} &= \frac{1}{2} \left( \frac{z^2}{r} + \frac{z'^2}{r'} \right), \\ F_{z1} &= \frac{w}{2} \left( \frac{z^2 \sin i}{r^2} + \frac{z'^2 \sin \theta}{r'^2} \right) - l \left( \frac{z}{r} + \frac{z'}{r'} \right), \\ F_{z2} &= \frac{w^2}{2} \left( \frac{z^2 \sin^2 i}{r^3} + \frac{z'^2 \sin^2 \theta}{r'^3} \right) - \omega l \left( \frac{z \sin i}{r^2} + \frac{z' \sin \theta}{r'^2} \right) - \frac{l^2}{4} \left( \frac{z^2}{r^3} + \frac{z'^2}{r'^3} \right) - \\ &\quad \frac{z^2}{8} \left[ w^2 \left( \frac{\cos^2 i}{r^3} - \frac{\cos i}{Rr^2} \right) + l^2 \left( \frac{1}{r^3} - \frac{\cos i}{\rho r^2} \right) \right] - \frac{z'^2}{8} \left[ w^2 \left( \frac{\cos^2 \theta}{r'^3} - \frac{\cos \theta}{Rr'^2} \right) + l^2 \left( \frac{1}{r'^3} - \frac{\cos \theta}{\rho r'^2} \right) \right]. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

(9)~(11)式分别表示  $\omega, l$  和  $z$  3 个方向上的波前差系数,也就是相当于系统的初级和三级像差。而在通常情况下,对于光源经由狭缝发射过来的同心聚焦光束而言,由于狭缝长度相比光栅的曲率半径是很小的,故其相对孔径角  $\alpha$  也很小,因此对于凹面光栅而言, $Z$  方向上的各项所造成的像差影响也很小,只要(9)和(10)式中的像差系数得到良好的消除,则(11)式也可以得到较好的满足<sup>[11]</sup>。

### 3.2 系数和完善成像条件分析

取狭缝在  $XY$  平面上的点(即狭缝中点)进行分析,则光源点和对应像点变为图 1 中  $B$  和  $B'$  点,(11)式中各项均为 0。

在理想成像条件下,除  $F_{00} = r + r'$  以外,其他各项均应为 0。但是由于参数仅为  $i, \theta, r, r'$  等,因此令上几式各项同时为零是不可能的,根据像差理论,应尽量消除初级像差和三级像差,因此就需要尽可能使  $\omega, l$  的幂次较低的项等于零。对以上参数进行分类分析可有如下结论:

1) 当  $\omega$  和  $l$  的一次幂项为零,即  $F_{10}$  为零时,可得到光栅方程

$$m\lambda = d(\sin i + \sin \theta). \quad (12)$$

2)  $F_{20}$  和  $F_{02}$  表示与像散相当的波差系数,当两式均为零时,像散得到消除,因此有

$$\begin{cases} \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} + \frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} = 0 \\ \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} + \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

3)  $F_{30}$  和  $F_{12}$  表示与彗差相当的波差系数,彗差消除的条件可以写作

$$\begin{cases} \frac{\sin i}{r} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) + \left( \frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right) = 0 \\ \frac{\sin i}{r} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right) + \frac{\sin \theta}{r'} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

4)  $F_{40}, F_{22}$  和  $F_{04}$  表示与球差相当的波差系数,消除条件可以写作

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{4\sin^2 i}{2r^2} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) - \frac{1}{r} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} \right)^2 + \frac{1}{R^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) + \frac{4\sin^2 i}{2r'^2} \left( \frac{\cos^2 i}{r'} - \frac{\cos i}{R} \right) - \\ &\frac{1}{r'} \left( \frac{\cos^2 i}{r'} - \frac{\cos i}{R} \right)^2 + \frac{1}{R^2} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos i}{R} \right) = 0, \\ &\frac{2\sin^2 i}{r^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right) - \frac{1}{r} \left( \frac{\cos^2 i}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right) + \frac{1}{R\rho} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{R} \right) + \frac{2\sin^2 \theta}{r'^2} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) - \\ &\frac{1}{r'} \left( \frac{\cos^2 \theta}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right) \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) + \frac{1}{R\rho} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{R} \right) = 0, \\ &\frac{1}{\rho^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right) - \frac{1}{r} \left( \frac{1}{r} - \frac{\cos i}{\rho} \right)^2 + \frac{1}{\rho^2} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right) - \frac{1}{r'} \left( \frac{1}{r'} - \frac{\cos \theta}{\rho} \right)^2 = 0. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

(13)~(15)式即为单光栅光谱成像系统完善成像条件。需要注意的是,这3式并不能在代数条件下同时严格满足,为了获得光学系统结构的初始优化参数,需要考虑能对各个完善成像条件都实现接近满足的算法。

在这里,选择了遗传算法。这种算法从一个随机选取的初始种群开始,同时计算每个个体的适应度。通过引入各种遗传因子如选择,交叉和变异等因子对种群进行迭代计算,直到种群中所有个体都得到更新,若优化准则得到满足,则计算停止,否则继续进行新种群的迭代计算。直到计算的结构参数满足优化为止。规定设计变量为  $i, \theta, \rho, r$  和  $r'$ , 初始的种群各值取各设计变量的最小值。目标函数可以定义为光线追迹的点列图的均方根(RMS)半径值,当获得了认为最优的半径值时(即设计变量变化而目标函数基本无变化),算法结束,此时获得初始光学结构参数。下面用一个样机设计来证明理论的正确性。

## 4 光学系统设计与结果分析

### 4.1 设计要求

根据上述原理与方法,设计了用于电离层探测的成像光谱仪光学系统。它以一个成像物镜(离轴抛物镜)为前置望远系统,超环面光栅为光谱成像系统共两部分组成,光路图如图2所示。

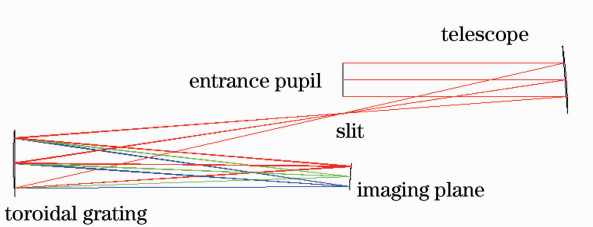


图2 成像光谱仪光学系统设计图

Fig. 2 Design of imaging spectrometer's optical system

设计仪器运行在833 km高的轨道上,与临边观测点的最小距离为2161.7 km,观测50~520 km的临边垂直高度范围,其观测粒子主要为  $H^+, O^+, O^0$  和  $N_2$ 。分别对应中心波长和波段为121.6, 130.4, 135.6, 140~150和165~180 nm<sup>[12]</sup>。仪器各项主要特性参数如表1所示。成像探测器使用带有微通道板(MCP)的延迟线阳极探测器,像元尺寸为25  $\mu\text{m}$ , 对应的奈奎斯特频率为20 lp/mm。

利用 Matlab 软件进行编程计算,并将得到的初始结构代入 Zemax 软件中进行光路追迹优化得到光学系统设计参数如表2所示,其中  $L_{S-G}$  为狭缝到光栅的距离,  $L_{G-I}$  为光栅到像面的距离。

表1 成像光谱仪特性参数

Table 1 Specification of designed imaging spectrometer

Parameter	Value
Spatial resolution /km	<1.6
Spatial coverage /km	50~520
Spectral coverage /nm	121.6, 130.4, 135.6, 140~150, 165~180
Spectral resolution /nm	0.7
Detector array size /pixel	256(spectrum) × 160(space)
Detector pixel size / $\mu\text{m}$	25 × 25
Focal length /mm	102.3
F-number	6.8

表2 光学结构初始和优化参数

Table 2 Original and optimized parameters of optical structure

Characteristic	Initial	Zemax
Entrance aperture /mm	$\Phi 15$	$\Phi 15$
Telescope mirror	Off-axis parabola	
Off-axis distance /mm	15	15
Focal length /mm	100	100
Entrance slit /mm	0.05 × 7.1	0.05 × 7.1
Angular resolution /( $^\circ$ )	0.1 × 4	0.1 × 4
Distance $L_{S-G}$ /mm	149.1260	148.3219
Grating	Toroidal	
Ruling /(lp/mm)	600	600
Curvature, $r_2^{\frac{1}{2}}$ (T, S) /mm	150, 148.64	150, 149.52
Incident angle /( $^\circ$ )	5	5
Diffraction angle /( $^\circ$ )	1.19435	1.19435
Distance $L_{G-I}$ /mm	152.9729	151.2280

### 4.2 设计结果分析

图3给出了边缘波长和中心波长的RMS点列图,可以看到,在子午方向和弧矢方向的像散得到纠正并趋于一致,从而使得弥散斑在  $x$  和  $y$  两个方向上均小于22  $\mu\text{m}$ 。

图4给出了均方根半径与波长的关系,可知全波段的像差都得到了很好的校正。

图5给出了设计优化后的系统中心波长和边缘波长的调制传递函数(MTF)曲线,可以看到,在设计指标要求的空间频率(20 lp/mm)下,全视场全波段MTF值达到0.7以上,完全满足设计要求。

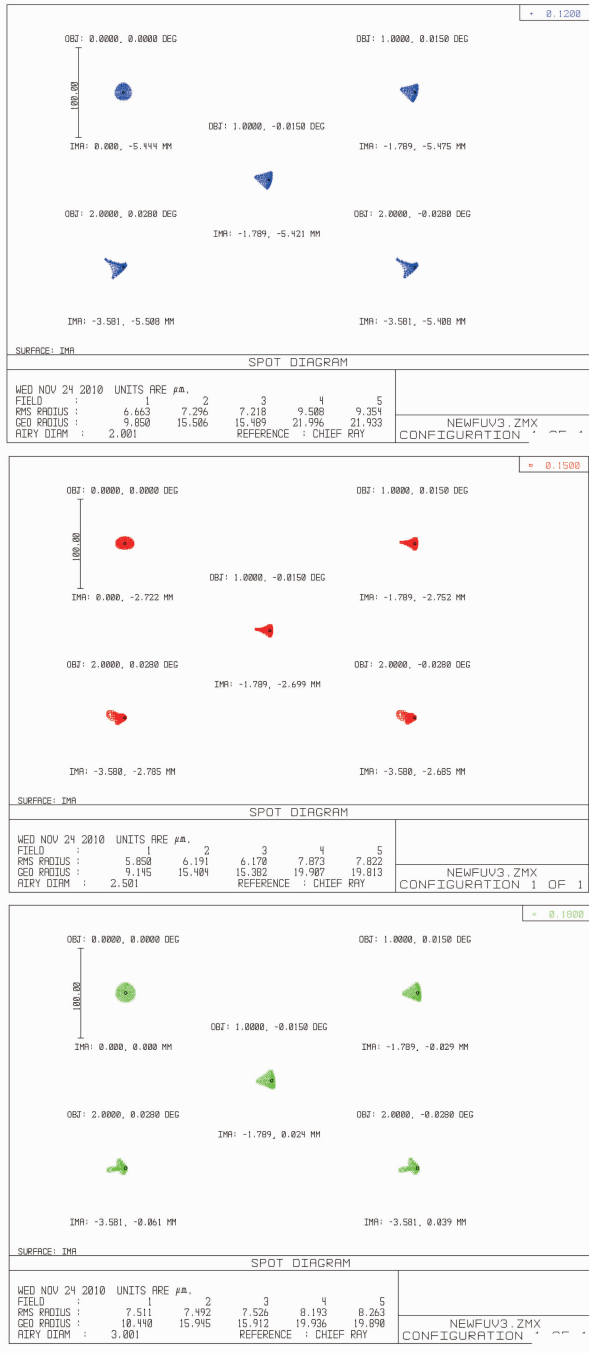


图 3 中心波长和边缘波长点列图

Fig. 3 Spots diagrams of different wavelengths

### 4.3 光谱分辨率分析

系统的光谱分辨率在像差校正较好的情况下主要与光栅的光谱分辨率、入射狭缝和探测器像元尺寸相关<sup>[13]</sup>。光栅的光谱分辨率可以写作

$$\Delta\lambda_G = \lambda/mN, \quad (16)$$

式中  $N$  为刻线总数。本系统  $N=16000, m=1$ , 显然光栅自身的光谱分辨率远高于仪器所需的光谱分辨率, 故其影响可以忽略。

对光栅方程  $d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda$  进行微分可

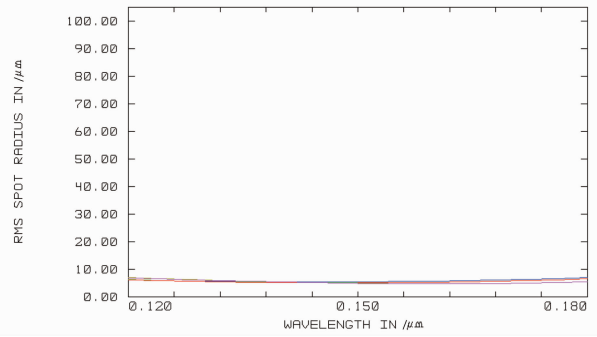


图 4 RMS 点半径与波长关系图

Fig. 4 RMS spot radius versus wavelengths

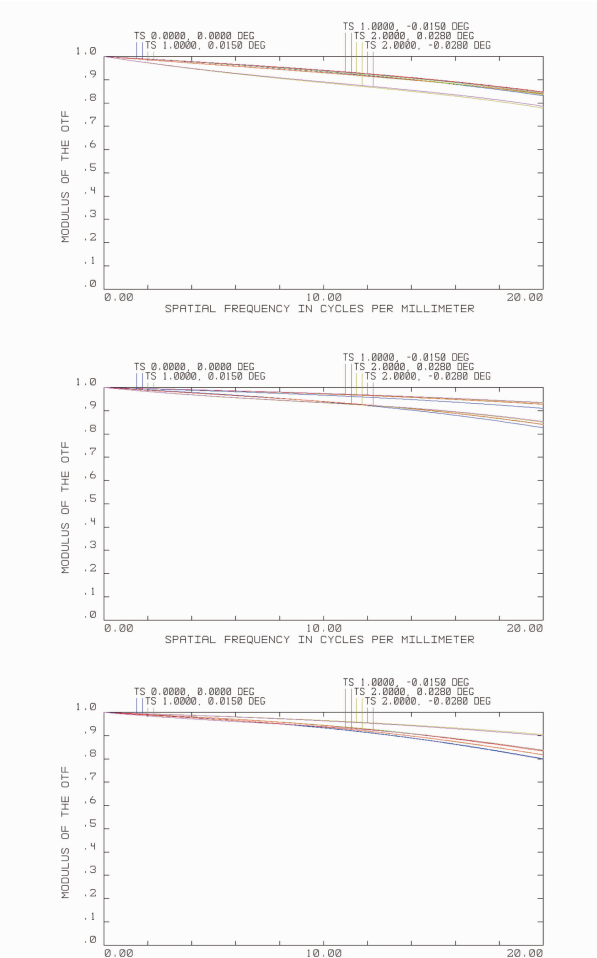


图 5 所设计的系统中心波长与边缘波长下的 MTF  
Fig. 5 MTF of the designed system under central and marginal wavelengths

以得到

$$d \cos i \frac{\partial i}{\partial \theta} + d \cos \theta = m \frac{\partial \lambda}{\partial \theta}, \quad (17)$$

式中  $\partial i / \partial \theta = 0, \partial \theta / \partial \lambda = m / d \cos \theta, \partial \theta / \partial \lambda$  是光栅的角色散, 设不同波长间的最小可区分光谱间隔为  $\Delta\lambda$ , 这样在本系统中的光谱间隔在像面上对应的距离  $\Delta x$  为如图 6 所示。

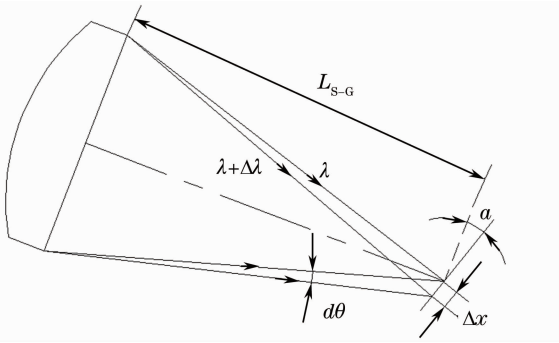


图6 不同波长像面对应距离示意图

Fig. 6  $\Delta x$  of different wavelengths on the image plane

根据几何关系可以得到

$$\Delta x = \frac{\Delta \lambda L_{S-G} d\theta}{m \cos \alpha} = \frac{\Delta \lambda d \cos \theta \cos \alpha}{m L_{S-G}}, \quad (18)$$

式中  $\alpha$  为像面与垂直面夹角,  $d\theta$  相当于角色散。(17)和(18)式联立可以得到由狭缝宽度决定的光谱分辨率为

$$\Delta \lambda_s = \frac{ad}{m L_{S-G}} \cos i \cos \sigma. \quad (19)$$

在光学系统中,  $a = 0.05 \text{ mm}$ ,  $d = 1/600 \text{ mm}$ ,  $i = 5^\circ$ ,  $\sigma = 1^\circ$  (像面相对于垂直面的夹角),  $L_{S-G} = 148.3 \text{ mm}$ , 可求得  $\Delta \lambda_s = 0.56 \text{ nm}$ 。

对于探测器像元来说, 每个像元都是具有一定几何尺寸的, 其进行采样成像的过程就是积分采样过程, 需符合采样定理, 即探测器像元分布的空间频率需至少为光谱变化频率的 2 倍, 这样, 与(19)式类似, 探测器最小可分辨波长差(即像元对应光谱分辨率)可表示为

$$\Delta \lambda_D = \frac{2db}{m L_{G-1}} \cos \theta \cos \sigma, \quad (20)$$

式中  $b$  为探测器像元尺寸, 大小为  $25 \mu\text{m}$ ,  $L_{G-1} = 151.23 \text{ mm}$ , 用 Matlab 可以计算出  $\Delta \lambda_D$  随波长变化关系的曲线, 如图 7 所示。

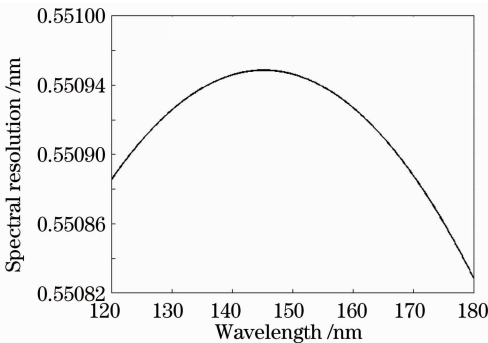


图7 探测器光谱分辨率与波长的关系

Fig. 7 Relation of detector's spectral resolution and wavelength

由图 7 可以看出探测器像元决定的光谱分辨率小于狭缝像对应的分辨率, 所以设计系统的光谱分辨率由狭缝像宽度对应的分辨率决定。

此外, 还需要考虑由于狭缝长度带来的像差导致的光谱变化(即狭缝长度方向像差对应的分辨率)。根据前面的光程函数和光栅方程, 可以得到这个光谱变化值为

$$\Delta \lambda_A = \frac{d}{2m} \cos \theta \left| \frac{\partial F}{\partial w} (z = 0, w = W) \right|, \quad (21)$$

式中  $W$  为光栅在色散方向的长度, 在系统中为  $27 \text{ mm}$ 。在已知狭缝长度为  $7.1 \text{ mm}$  的情况下, 通过(21)式可以看出在狭缝长度的两端所产生的光谱偏差是最大的, 对(21)式作适当变形和简化可得

$$\Delta \lambda_{Amax} = \frac{dc}{8mR^2} \cos i \cos \theta |2W \sin(i - \theta) - c \cos i (\sin i + \sin \theta)|, \quad (22)$$

式中  $c$  为狭缝长度,  $R$  为光栅子午方向曲率半径。将各值代入(22)式计算可得  $\Delta \lambda_{Amax} = 0.35 \text{ nm}$ 。在设计中,  $\Delta \lambda_A$  应小于狭缝宽度和探测器像元尺寸决定的光谱分辨率, 这样的设计才是合理的。根据以上计算可知本设计符合这项特征, 故最终确定设计系统的光谱分辨率约为  $0.56 \text{ nm}$ 。

## 5 结 论

设计并研究了适用于  $120 \sim 180 \text{ nm}$  波段电离层探测的成像光谱仪光学系统。对光栅光程函数和光栅表面函数的分析, 得到了消除宽波段像差的条件, 通过对入射角和衍射角, 狭缝到光栅和光栅到像面的距离, 以及光栅两个方向上的曲率半径的调整消除了各主要像差。利用编程得到初始结构, 并通过光学设计软件进行优化, 使得系统在整个波段内的分辨率趋近于一致。光线追迹得到的光谱图像结果显示, 光学系统完全可以匹配像元尺寸为  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  的探测器, 空间分辨率和光谱分辨率均满足设计要求, 且全视场调制传递函数在全波段达到  $0.7$  以上, 满足成像质量要求。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1516~1521  
薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J].

- 光学学报, 2010, **30**(5): 1516~1521
- 3 F. W. Schenkel, B. S. Ogorzalek, J. C. Larrabee *et al.*. Ultraviolet daytime auroral and ionospheric imaging from space [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(20): 3395~3405
- 4 L. J. Paxton, A. B. Christensen, D. Morrison *et al.*. GUVI: A hyperspectral imager for geospace [C]. *SPIE*, 2004, **5660**: 228~239
- 5 P. C. Kalmanson, J. Wilczynske, K. Wood *et al.*. The optomechanical design and operation of the ionospheric mapping and geocoronal experiment [C]. *SPIE*, 2005, **5901**: 0Q-1
- 6 M. Zuckic, D. G. Torr, J. Kim *et al.*. Filters for the international solar terrestrial physics mission far-ultraviolet imager [J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(12): 3069~3074
- 7 Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112011
- 于磊, 曲艺, 林冠宇等. 120~180 nm 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112011
- 8 M. P. Chrisp. Aberrations of holographic toroidal grating systems [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(10): 1508~1518
- 9 T. Onaka, T. Miyata, H. Kataza *et al.*. Design for an aberration-corrected concave grating for a mid-infrared long-slit spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(10): 1474~1479
- 10 D. M. Cotton, T. Cook, S. Chakrabarti. Single-element imaging spectrograph [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(10): 1958~1961
- 11 W. Werner. The geometric optical aberration theory of diffraction gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(10): 1691~1699
- 12 D. Morrison, L. Paxton, D. Humm *et al.*. On-orbit calibration of the special sensor ultraviolet scanning imager (SSUSI) a far-UV imaging spectrograph on DMSP F16 [C]. *SPIE*, 2002, **4485**: 328~337
- 13 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian *et al.*. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 823~830
- 薛庆生, 王淑荣, 李福田等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(4): 823~830