

文章编号 1004-924X(2012)02-0233-08

## 改进的宽波段车尔尼-特纳光谱成像系统设计

薛庆生\*, 陈 伟

(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:**针对传统的车尔尼-特纳光谱仪像散较大的缺点,基于像差理论,提出了一种改进的车尔尼-特纳光谱成像系统。将平面光栅置于发散光中,利用平面光栅产生的像散来补偿物镜产生的像散。推导出了宽波段像散同时校正条件,实现了宽波段像散的同时校正。具体分析了像差校正的原理和方法,编制了初始结构快速计算程序。作为实例,设计了一个波段为 540~780 nm 的宽波段像散同时校正车尔尼-特纳光谱成像系统,利用光学设计软件 ZEMAX-EE 对该光谱成像系统进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行了分析。结果表明,全视场调制传递函数在整个工作波段均达到 0.52 以上,实现了宽波段像散的同时校正,并获得了良好的成像质量,满足了设计指标要求,结果也证实了所提出的改进方法是可行的。

**关键词:**光学设计;车尔尼-特纳光谱成像系统;高光谱成像仪;平面光栅;像差校正

**中图分类号:**O433.1; TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0233

## Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system with wide spectral region

XUE Qing-sheng\*, CHEN Wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: xueqs\_ciom@163.com

**Abstract:** A modified Czerny-Turner spectral imaging system was developed based on aberration theory to minimize the large astigmatism in classical Czerny-Turner spectrometers. The astigmatism from a plane grating placed in the divergent light beam was used to compensate the astigmatism from an objective lens. The broadband astigmatism corrected simultaneously conditions were deduced, and the astigmatism was corrected in a wide spectral region. The principle and method of astigmatism correction were analyzed in detail, and the initial parameter computing was programmed. As an example, a Czerny-Turner imaging spectral system operating in 540–780 nm was designed. The ray tracing and optimization for the spectral imaging system were performed with ZEMAX-EE software. The analyzed results demonstrate that the total field-of-view modulation transfer function is higher than 0.52 in the whole working spectra. The system shows good imaging quality due to the astigmatism to be corrected in the wide spectral region synchronously. Obtained results prove the feasibility of the modified method.

收稿日期:2010-11-08;修订日期:2011-01-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41105014)

**Key words:** optical design; Czerny-Turner spectral imaging system; hyperspectral imager; plane grating; aberration correction

## 1 引言

高光谱成像仪是在多光谱遥感技术基础上发展起来的新一代空间光学遥感仪器,能以高光谱分辨力同时获取目标和景物的超多谱段图像,在大气、海洋和陆地观测中得到了越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。高光谱成像仪光学系统由前置望远系统和光谱成像系统组成,通过入射狭缝将二者有机地结合在一起。地物目标经前置望远系统成像在入射狭缝上,再经光谱成像系统色散后按波长不同成像在面阵探测器的不同位置上,其中与入射狭缝高度平行的一维为空间维,与入射狭缝高度垂直的一维为光谱维。因此,要求光谱成像系统不仅具有高光谱分辨力,还要在狭缝高度方向上具有较高的空间分辨力。

光谱成像系统是高光谱成像仪的核心,采用的分光技术直接影响整个高光谱成像仪的性能、体积和质量等<sup>[4-5]</sup>。以平面光栅作为色散元件的光谱成像系统因具有高光谱分辨力、色散均匀等优点而倍受关注。传统的车尔尼-特纳(Czerny-Turner)光谱仪以平面光栅作为色散元件,已广泛应用于光栅单色仪<sup>[6]</sup>和光谱辐射计<sup>[7]</sup>等光谱仪器中,这类仪器的平面光栅处于准直光中,以光电倍增管等单通道探测器作为光电转换器件,入射狭缝上的一点在探测器上所成的像是一个像散线段,像散线段的长度方向沿狭缝长度方向。由于光电倍增管等单通道探测器的光敏面直径(通常 $\geq 20$  mm)远大于狭缝像在狭缝长度方向上的扩展;因此,传统的 Czerny-Turner 光谱仪通常并不校正像散,并且这类仪器是通过转动光栅输出不同波长的光谱辐射,通常只对中心波长校正像差<sup>[8]</sup>。但是,由于采用面阵 CCD 等多通道探测器作为成像器件的高光谱成像仪要求空间分辨率,

而 CCD 探测器的像元尺寸只有几个微米到几十个微米,像散的存在严重影响沿狭缝长度方向上的空间分辨率,因此必须充分校正像散。另外,光栅固定,要在宽谱段内获得良好的成像质量,还需要同时实现宽谱段像散的校正。显然,传统的车尔尼-特纳结构不能满足高光谱成像仪的要求。

本文基于像差理论,提出了一种改进的车尔尼-特纳光谱成像系统,将平面光栅置于发散光中,利用光栅产生的像散来补偿物镜产生的像散,推导了同时校正宽谱段像散的条件,并实现了宽谱段像散的同时校正。然后,详细分析了像差校正原理和方法,编制了初始结构快速计算程序。最后,设计了一个宽谱段像散同时校正的车尔尼-特纳光谱成像系统实例,并对设计结果进行了分析与评价。

## 2 中心波长像散校正

传统的 Czerny-Turner 结构光学系统原理如图 1 所示。采用两个凹球面镜分别作为准直镜和聚焦镜,平面光栅置于平行光中,由于对物镜的离轴入射,存在很大的像散。本文提出了一种改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统,通过减小入射狭缝到准直镜的距离,使平面光栅处于发散光中,利用平面光栅产生的像散来补偿物镜产生的像散,从而达到校正像散的目的。

凹球面反射镜的离轴角为  $\alpha/2$ ,物距为  $l$ ,则它在弧矢面和子午面内的像距分别表示为:

$$1/l_s = 2(1/r)2\cos(\alpha/2) - (1/l), \quad (1)$$

$$1/l_t = 2[1/r\cos(\alpha/2)] - (1/l). \quad (2)$$

反射式平面衍射光栅在弧矢面(垂直于色散面)内的成像性质与平面反射镜相同,而在子午面(色散面)内满足光栅方程  $d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda$ ,其中, $d$ 为光栅常数, $i, \theta$ 分别为对光栅表面法线的入射角和衍射角, $m$ 为光谱级次, $\lambda$ 为波长。与

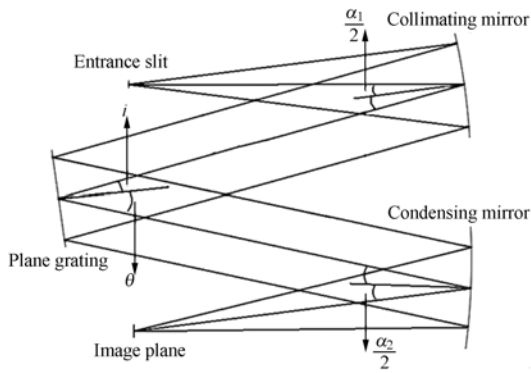


图 1 Czerny-Turner 结构光学系统原理图

Fig. 1 Optical layout of Czerny-Turner spectral imaging system

凹球面反射镜类似,置于发散光中的平面光栅在弧矢面和子午面内的像距分别表示为:

$$1/l'_s = -(1/D), \quad (3)$$

$$1/l'_t = -(\cos^2 i / \cos^2 \theta) - (1/D). \quad (4)$$

忽略光栅与准直镜和聚焦镜的间距,对 Czerny-Turner 结构中的两球面反射镜和平面光栅应用公式(1)~(4),求得在弧矢面和子午面内的像距与聚焦镜的距离分别为:

$$S_s = \frac{r_1 r_2 L_{sc}}{2L_{sc} [r_1 \cos(\alpha_2/2) + r_2 \cos(\alpha_1/2)] - r_1 r_2}, \quad (5)$$

$$S_t = \frac{r_1 r_2 L_{sc}}{2L_{sc} \left[ r_1 \sec(\alpha_2/2) + r_2 \sec(\alpha_1/2) \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \right] - r_1 r_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta}}, \quad (6)$$

式中,  $L_{sc}$  为入射狭缝到准直镜的距离。当弧矢像距  $S_s$  与子午像距  $S_t$  相等时,像散就不存在了。因此令  $S_s = S_t = L_{fd}$  (其中  $L_{fd}$  为聚焦镜到探测器的距离),得到像散的校正条件为:

$$L_{sc} = \frac{1}{2} r_1 r_2 \left\{ \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} - 1 \right\} \times \left\{ r_1 [\sec(\alpha_2/2) - \cos(\alpha_2/2)] + r_2 \left[ \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \sec(\alpha_1/2) - \cos(\alpha_1/2) \right] \right\}^{-1}, \quad (7)$$

由式(7)可以得到  $L_{sc}$  的初始参数值,  $L_{sc}$  的确切参数在光学设计软件中通过实际的光线追迹得到。从式(7)可以看出,像散校正条件与  $\theta$  和  $\alpha_2$  有关,因此依赖于波长。此时,按传统将光栅置于聚焦

镜的焦点附近,在光栅固定的条件下,只能在中心波长附近很窄的波段内(10 nm)获得良好的成像质量。

### 3 宽波段像散同时校正

当光栅置于发散光中时,根据光栅方程,波长  $\lambda$  不同,则衍射角  $\theta$  的大小不同。从式(5)和(6)可以看出,衍射角  $\theta$  的大小会直接影响子午像距  $S_t$  的大小,而且衍射角  $\theta$  的改变,又会导致聚焦镜离轴角  $\alpha_2/2$  的变化和衍射光线与聚焦镜交点位置的变化,从而导致子午像距  $S_t$ 、弧矢像距  $S_s$  及聚焦镜到探测器的传播距离  $L_{fd}$  的变化。从上面的分析可以看出,引起  $S_t$ 、 $S_s$  和  $L_{fd}$  变化的根源在于衍射角  $\theta$  的变化,因此,要实现宽波段像散的同时校正,要求子午像距  $S_t$  和弧矢像距  $S_s$  随衍射角  $\theta$  的变化速率与聚焦镜到像面的距离  $L_{fd}$  随衍射角  $\theta$  的变化速率相同,即

$$\frac{dS_s}{d\theta} = \frac{dS_t}{d\theta} = \frac{dL_{fd}}{d\theta}, \quad (8)$$

式中

$$\frac{dS_s}{d\theta} = \frac{\partial S_s}{\partial(\alpha_2/2)} \frac{d(\alpha_2/2)}{d\theta}, \quad (9)$$

$$\frac{dS_t}{d\theta} = \frac{\partial S_t}{\partial\theta} + \frac{\partial S_t}{\partial(\alpha_2/2)} \frac{d(\alpha_2/2)}{d\theta}. \quad (10)$$

式(5)两边对聚焦镜的离轴角  $\alpha_2/2$  求偏导数得

$$\frac{\partial S_s}{\partial(\alpha_2/2)} = \frac{2S_s L_{sc} r_1 \sin(\alpha_2/2)}{2L_{sc} [r_1 \cos(\alpha_2/2) + r_2 \cos(\alpha_1/2)] - r_1 r_2}. \quad (11)$$

式(6)两边对衍射角  $\theta$  求偏导数得

$$\frac{\partial S_t}{\partial\theta} = \frac{-2S_t r_2 [2L_{sc} \sec(\alpha_1/2) - r_1] \cos^2 i \tan \theta \sec^2 \theta}{2L_{sc} \left[ r_1 \sec(\alpha_2/2) + r_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \sec(\alpha_1/2) \right] - r_1 r_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta}}; \quad (12)$$

式(6)两边对聚焦镜的离轴角  $\alpha_2/2$  求偏导数得

$$\frac{\partial S_t}{\partial(\alpha_2/2)} = \frac{-2S_t L_{sc} r_1 \sec(\alpha_2/2) \tan(\alpha_2/2)}{2L_{sc} \left[ r_1 \sec(\alpha_2/2) + r_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \sec(\alpha_1/2) \right] - r_1 r_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta}}. \quad (13)$$

从式(8)~(13)可以看出,还要求出  $d(\alpha_2/2)/d\theta$  和  $dL_{fd}/d\theta$ 。

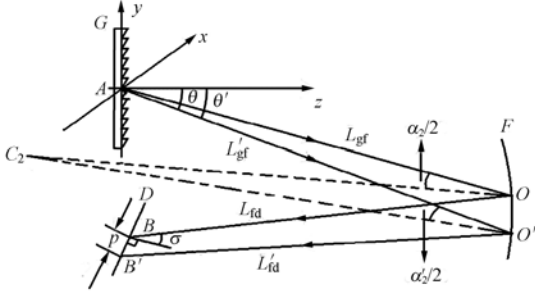


图 2 平面光栅与聚焦镜的几何关系图

Fig. 2 Geometric relations between plane grating and condensing mirror

通过分析光栅与聚焦镜的几何关系来求  $d(\alpha_2/2)/d\theta$  和  $dL_{fd}/d\theta$ 。光栅与聚焦镜的几何关系如图 2 所示。A 点为平面光栅 G 的中心,  $C_2$  为聚焦镜 F 的曲率中心。光线 A-O-B 为中心波长的光线,光线 A-O'-B' 是稍微偏离中心波长的光线,两条光线在探测器 D 上的交点相距为  $p$ ,探测器的倾角(即探测器与垂直平面的夹角)为  $\sigma$ 。采用图 2 所示的坐标系, A 为坐标原点,在  $y-z$  平面(光栅色散面)内,用  $y, z$  分别表示沿  $y$  轴和  $z$  轴方向的单位矢量,则各矢量可以表示为

$$\mathbf{AO} = -L_{gf} \sin \theta \mathbf{y} + L_{gf} \cos \theta \mathbf{z}, \quad (14)$$

$$\mathbf{AO}' = -L_{gf}' \sin \theta' \mathbf{y} + L_{gf}' \cos \theta' \mathbf{z}, \quad (15)$$

$$\mathbf{C}_2 \mathbf{O} = -r_2 \sin[\theta - (\alpha_2/2)] \mathbf{y} + r_2 \cos[\theta - (\alpha_2/2)] \mathbf{z}, \quad (16)$$

$$\mathbf{C}_2 \mathbf{O}' = -r_2 \sin[\theta' - (\alpha_2'/2)] \mathbf{y} + r_2 \cos[\theta' - (\alpha_2'/2)] \mathbf{z}, \quad (17)$$

$$\mathbf{OB} = L_{fd} \sin(\theta - \alpha_2) \mathbf{y} - L_{fd} \cos(\theta - \alpha_2) \mathbf{z}, \quad (18)$$

$$\mathbf{O}' \mathbf{B}' = L_{fd}' \sin(\theta' - \alpha_2') \mathbf{y} - L_{fd}' \cos(\theta' - \alpha_2') \mathbf{z}, \quad (19)$$

$$\mathbf{BB}' = -p \cos(\theta - \alpha_2 + \sigma) \mathbf{y} - p \sin(\theta - \alpha_2 + \sigma) \mathbf{z}, \quad (20)$$

由矢量和  $\mathbf{AO} + \mathbf{C}_2 \mathbf{O} + \mathbf{C}_2 \mathbf{O}' + \mathbf{O}' \mathbf{A} = 0$ , 联立式(14)~(17)得

$$L_{gf}' \sin \theta' - L_{gf} \sin \theta + r_2 \sin[\theta - (\alpha_2/2)] - r_2 \sin[\theta' - (\alpha_2'/2)] = 0, \quad (21)$$

$$L_{gf} \cos \theta - L_{gf}' \cos \theta' - r_2 \cos[\theta - (\alpha_2/2)] + r_2 \cos[\theta' - (\alpha_2'/2)] = 0. \quad (22)$$

式(21)和式(22)对  $\theta'$  微分得

$$\frac{dL_{gf}'}{d\theta'} \sin \theta' + L_{gf}' \cos \theta' - r_2 \cos[\theta' - (\alpha_2'/2)] \left[ 1 - \frac{d(\alpha_2'/2)}{d\theta'} \right] = 0, \quad (23)$$

$$\frac{dL_{gf}'}{d\theta'} \cos \theta' + L_{gf}' \sin \theta' - r_2 \sin[\theta' - (\alpha_2'/2)] \left[ 1 - \frac{d(\alpha_2'/2)}{d\theta'} \right] = 0, \quad (24)$$

将微分表达式(23)和(24)中带“'”的量换成不带“'”的量,并联立求得在中心波长处的微分

$$\frac{d(\alpha_2/2)}{d\theta} = 1 - \frac{L_{gf}}{r_2 \cos(\alpha_2/2)}. \quad (25)$$

同理,由矢量和  $\mathbf{C}_2 \mathbf{O} + \mathbf{OB} + \mathbf{BB}' + \mathbf{B}' \mathbf{O}' + \mathbf{O}' \mathbf{C}_2 = 0$ , 联立式(16)~(20)可求出

$$\frac{dL_{fd}}{d\theta} = \tan \sigma \left[ L_{gf} + L_{fd} - \frac{2L_{gf} L_{fd}}{r_2 \cos(\alpha_2/2)} \right] - L_{gf} \tan(\alpha_2/2). \quad (26)$$

把式(8)~(13)和(25)~(26)联立,可以求出光栅到聚焦镜的距离  $L_{gf}$  和探测器的倾角  $\sigma$ , 从而得到宽波段像散同时校正的光学结构参数。

#### 4 初始结构计算程序编制

改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统初始结构参数的确定还要考虑到球差和彗差的校正。球差既影响光谱分辨力,又影响空间分辨力,必须把球差控制在像差容限以内。根据瑞利准则,由球差所产生的波像差  $W_{smax}$  应小于  $\lambda/4$ , 即

$$W_{smax} = y_{max}^4 / (8r^3) \leq \lambda/4, \quad (27)$$

其中,  $y_{max}$  为球面镜的半口径,  $r$  为球面镜的曲率半径。对采用 2 个球面镜的 Czerny-Turner 光谱成像系统,由式(1)可得球面镜的焦距与许可的  $F\#$  ( $F\# = f/D$ ) 之间的关系如式(28)和(29)所示<sup>[9]</sup>

$$f \leq 256 \lambda F^4, \quad (28)$$

$$D \leq 256 \lambda F^8. \quad (29)$$

彗差是由于光线对反射镜的离轴入射产生的,它使光谱线单边扩散,影响分辨力,因此需要校正。在 Czerny-Turner 结构中校正彗差必须满足 Shafer 方程<sup>[10]</sup>, 如式(30)所示。

$$\sin(\alpha_2/2) = \frac{r_2^2}{r_1^2} \left[ \frac{\cos i \cos(\alpha_2/2)}{\cos \theta \cos(\alpha_1/2)} \right]^3 \sin(\alpha_1/2) \quad (30)$$

用 Matlab 编制了改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统的初始结构参数快速计算程序,程序框图如图 3 所示。先根据球差和彗差校正条件,确定球面准直镜和球面聚焦镜的离轴角  $\alpha_1/2$ ,  $\alpha_2/2$ , 曲率半径  $r_1, r_2$ , 对光栅表面法线的入射角  $i$  和中心波长的衍射角  $\theta$ ; 然后,根据像散的校正条件式(5)和式(7)求出入射狭缝到准直镜的距离  $L_{sc}$  及聚焦镜到探测器的距离  $L_{fd} = S_s$ ; 再根据前面确定的参数求解式(11)~(13)并将结果代入式(9)和式(10),令  $dS_s/d\theta = dS_i/d\theta$ , 求得  $d(\alpha_2/2)/d\theta$  的值,再根据式(25)求得光栅到聚焦镜的距离  $L_{gf}$ ; 最后利用式(9)和(26),令  $dS_s/d\theta = dS_i/d\theta$ , 求出像面的倾角  $\sigma$ 。

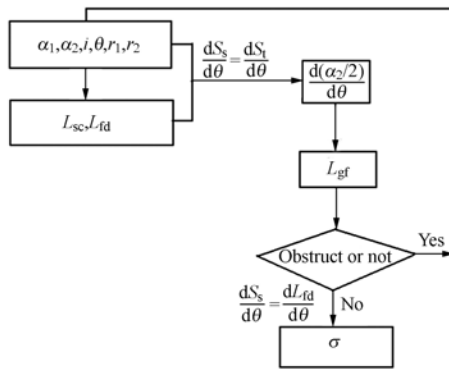


图 3 初始结构参数计算程序框图

Fig. 3 Program block diagram for computing initial structure parameters

## 5 设计实例及设计结果分析

### 5.1 设计实例

根据已论述的像差校正方法,设计了一个宽波段像差同时校正的 Czerny-Turner 光谱成像系统,该系统可作为大气临边探测高光谱成像仪的光谱成像系统。谱段为 540~780 nm, 入射狭缝尺寸为  $3.35 \text{ mm} \times 50 \mu\text{m}$ ,  $F\# = 8$ , 采用面阵 CCD 作为成像探测器,探测器的像元尺寸为  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ , 像元数为  $512 \times 512$ 。利用自己编制的 Matlab 程序计算得到初始结构参数如表 1 所示,将初始结构参数导入光学设计软件 ZEMAX-EE 中进行光线追迹和优化设计,优化设计的光

学结构参数如表 1 所示。图 4 为改进的光栅置于发散光中的 Czerny-Turner 光谱成像系统光路图。

表 1 改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统光学参数  
Tab. 1 Optical parameters of modified Czerny-Turner spectral imaging system

Specification	Initial parameter	Optimized parameter
$(\alpha_1/2)/(^{\circ})$	6	6
$(\alpha_2/2)/(^{\circ})$	8	8
$r_1/\text{mm}$	180	180
$r_2/\text{mm}$	206.35	206.35
$i/^{\circ}$	-6	-6
$\theta/^{\circ} (\lambda=660 \text{ nm})$	23.674	23.674
$(1/d)/\text{mm}$	450	450
$L_{sc}/\text{mm}$	77.453 39	74.427 76
$L_{fd}/\text{mm}$	129.245 74	126.641 04
$L_{gc}/\text{mm}$	89.507	89.507
$L_{gf}/\text{mm}$	67.983 84	78.413 75
$\sigma/^{\circ}$	16.091 53	11.413 80

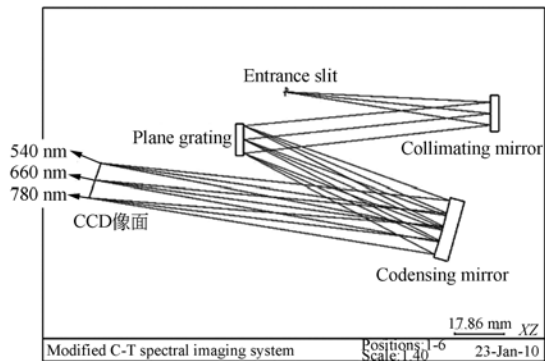


图 4 改进的车尔尼-特纳光谱成像系统光路图

Fig. 4 Layout of modified Czerny-Turner spectral imaging system

### 5.2 设计结果分析

图 5 给出了传统的平面光栅处于准直光中的 Czerny-Turner 光谱仪中心波长处的点列图,图 6 给出了改进的光栅处于发散光中的 Czerny-Turner 光谱成像系统中心波长的点列图。通过比较可知,传统的 Czerny-Turner 光谱仪存在严重的像散,对于中心波长为 660 nm,入射狭缝上的一个点在像面上沿狭缝高度方向被扩展到  $300 \mu\text{m}$  左右。而图 6 中点列图 RMS 值半径小于  $6.7 \mu\text{m}$ ,这表明改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统中心波长的像散得到充分校正。图 7 为改进的

Czerny-Turner 光谱成像系统像面上边缘波长的点列图,可以看出,边缘波长 540 nm 和 780 nm 处的像散也得到充分校正,点列图的RMS半径

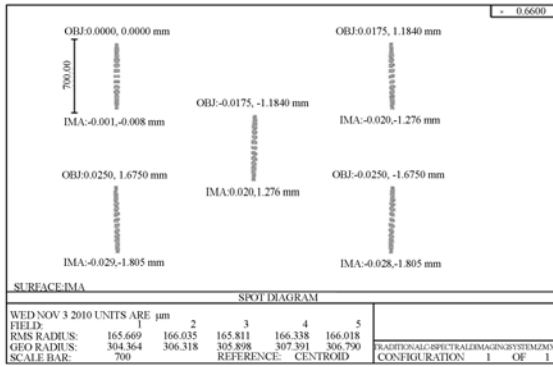


图 5 传统的车尔尼-特纳结构像面上中心波长的点列图  
Fig. 5 Spot diagram at central wavelength for classical Czerny-Turner spectrometer

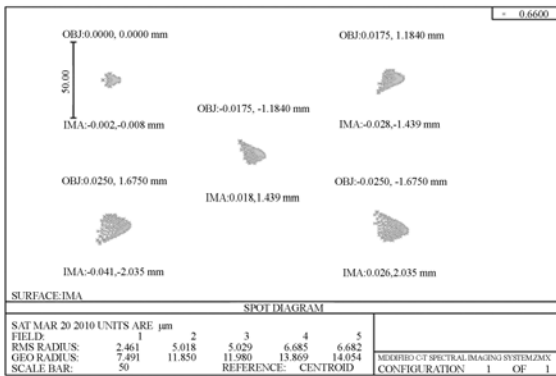
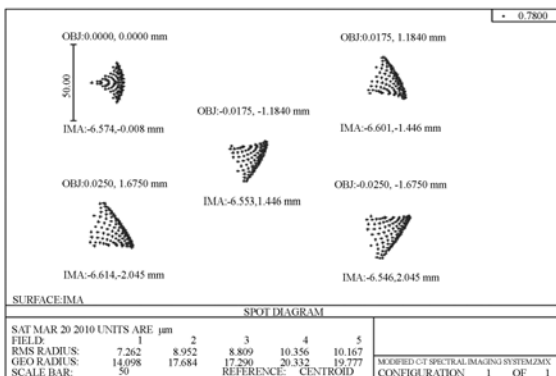
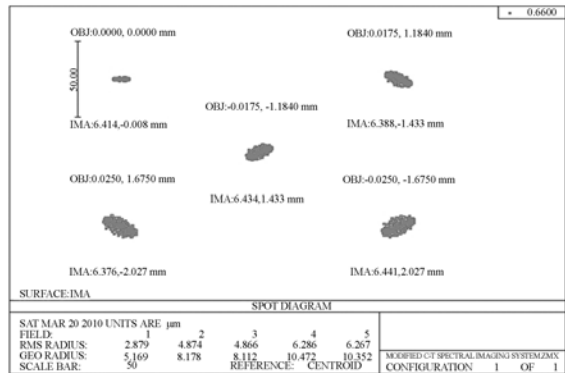


图 6 改进的车尔尼-特纳光谱成像系统像面上中心波长的点列图  
Fig. 6 Spot diagram at central wavelength for modified Czerny-Turner spectral imaging system



(a) 边缘波长为 780 nm  
(a) Marginal wavelength of 780 nm



(b) 边缘波长为 540 nm

(b) Marginal wavelength of 540 nm

图 7 改进的车尔尼-特纳光谱成像系统像面上边缘波长的点列图

Fig. 7 Spot diagram at marginal wavelength for modified Czerny-Turner spectral imaging system

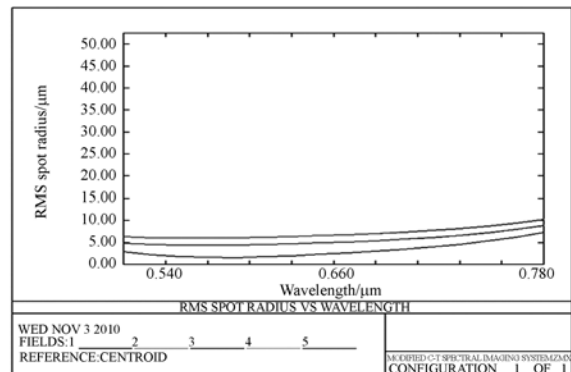
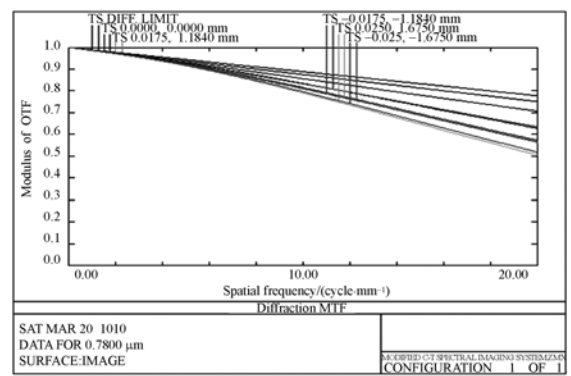
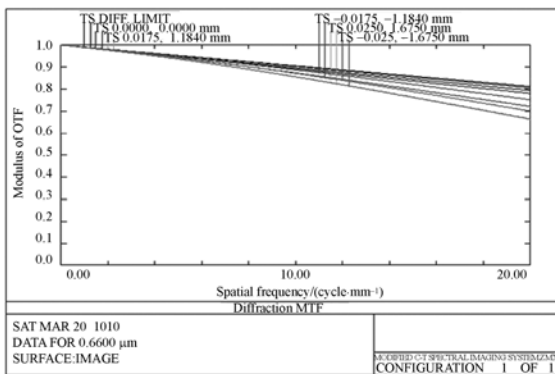


图 8 点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线  
Fig. 8 RMS spot radius versus wavelength

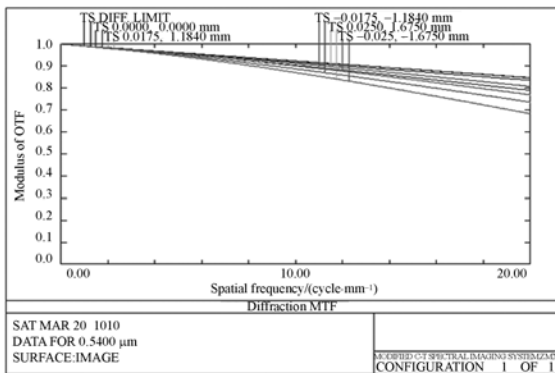


(a) 边缘波长为 780 nm

(a) Marginal wavelength of 780 nm



(b)中心波长为 660 nm  
(b)Central wavelength of 660 nm



(c)边缘波长为 540 nm  
(c)Marginal wavelength of 540 nm

图 9 中心波长和边缘波长的光学传递函数曲线

Fig. 9 MTF curves at central wavelength and marginal wavelength

小于  $10.2 \mu\text{m}$ 。图 8 为点列图 RMS 值半径随波长变化的关系曲线,在整个工作波段内 ( $540 \sim 780 \text{ nm}$ ),点列图的 RMS 值的半径均小于  $10.2 \mu\text{m}$ ,即实现了宽波段像散的同时校正,在宽波段内获得了良好的成像质量。图 9 为中心波长和边缘波长各视场的光学调制传递函数曲线,从图中可以

看出,中心波长和边缘波长各视场在特征频率为  $20 \text{ lp/mm}$  处的光学传递函数均大于  $0.52$ ,在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量,满足设计指标要求,也证明了前文提出的像差校正方法是可行的。

## 6 结 论

为满足高光谱成像仪的要求,基于像差理论,提出了一种光栅处于发散光中的改进的车尔尼-特纳光谱成像系统,利用光栅产生的像散来补偿物镜产生的像散,不但中心波长的像散得到校正,而且实现了宽波段像散的同时校正。编制了初始结构快速计算程序,设计了一个谱段为  $540 \sim 780 \text{ nm}$  的宽波段像散同时校正的车尔尼-特纳光谱成像系统实例,利用光学设计软件 ZEM-AX-EE 对该光谱成像系统进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行了分析。分析结果表明,在整个工作波段  $540 \sim 780 \text{ nm}$ ,全视场调制传递函数均达到  $0.52$  以上,实现了宽波段像散的同时校正,获得了良好的成像质量,完全满足成像要求,也表明所提出的改进方法是可行的,为下一步在星载高光谱成像仪中的应用奠定了技术基础。这种改进的 Czerny-Turner 光谱成像系统中不使用非球面也不另外增加其他光学元件就可以实现宽波段像散的同时校正,方便加工和装调,并且体积小、质量轻,满足高光谱成像仪的要求。

## 参考文献:

[1] 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.  
XUE Q SH, WANG SH R, LI F T, et al.. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sens-

ing[J]. Opt. Precision Eng., 2010, 18(6): 823-830. (in Chinese)

[2] 程欣,洪永丰,张葆,等.插入 Féry 棱镜的小型 Offner 超光谱成像系统的设计[J].光学精密工程,2010,18(8):1774-1780.

CHENG X, HONG Y F, ZHANG B, et al.. Design of compact hyperspectral imaging system with

- Féry prism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1174-1780. (in Chinese)
- [3] 刘英,王学进,潘玉龙,等. 谐衍射中、长波红外超光谱成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 579-585.
- LIU Y, WANG X J, PAN Y L, *et al.*. Design of hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and long infrareds[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):579-585. (in Chinese)
- [4] 郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6):650-657.
- ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):650-657. (in Chinese)
- [5] 李幼平,禹秉熙,韩昌元,等. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):974-979.
- LI Y P, YU B Y, HANG CH Y, *et al.*. Trade off optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):974-979. (in Chinese)
- [6] 卢启鹏,马磊,彭忠琦,等. 变包含角平面光栅单色器扫描转角精度的检测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1548-1553.
- LU Q P, MA L, PENG ZH Q, *et al.*. Rotation-angle-accuracy measurement of scanning mechanism in variable included angle plane grating monochromator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1548-1553. (in Chinese)
- [7] 王淑荣,李福田,宋克非,等. 地外太阳紫外光谱测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6):1271-1277.
- WANG SH R, LI F T, SONG K F, *et al.*. Measurement of extraterrestrial solar ultraviolet spectrum[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1271-1277. (in Chinese)
- [8] MASSAYUKI F, TAKEHIKO T, KEI-ICHI K, *et al.*. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(22):4655-4665.
- [9] 林中,范世福. 光谱仪器学[M]. 北京:机械工业出版社, 1988.
- LIN ZH, FAN SH F. *Spectrometer* [M]. Beijing: Mechanics Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [10] ARTHUR B S, LAWENCE R M, LEANN D, *et al.*. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, 54:879-887.

#### 作者简介:



薛庆生(1979—),男,山东梁山人,副研究员,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光学系统设计、成像光谱技术及辐射定标等方面的研究。E-mail: xueqs\_ciomp@163.com



陈伟(1963—),女,吉林长春人,工程师,主要从事计算机管理、结构设计。E-mail: ccgaomh@163.com