

# 轻小型可见/近红外实时成像光谱仪的光学系统设计

刘 兵<sup>1,2</sup> 刘 英<sup>1\*</sup> 李 灿<sup>1</sup> 王 健<sup>1</sup> 李 淳<sup>1</sup> 孙 强<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>中国科学院大学, 北京 100039

**摘要** 为了解决传统成像光谱仪难以实现光谱和图像信息实时获取的问题,设计一款可见/近红外宽波段视频型成像光谱仪系统。系统利用多狭缝分光成像技术,将目标光谱图像进行区域划分,代替传统的推帚型成像光谱仪,实现光谱维的大视场成像。采用低色散光学玻璃和双胶合透镜实现宽波段光学系统的像差校正。前置望远物镜系统采用复杂的双高斯结构,实现小畸变设计和不同视场狭缝处能量的均匀分布。为了同时获取高空间分辨率的实时视频监控和高光谱分辨率,利用分光棱镜将前置望远物镜的像分为两路,一路直接由高分辨率全色相机接收,另一路进入分光系统由灰度相机接收。采用三块棱镜作为分光元件,通过优化材料组合和实际光线控制,获得了萤石-熔石英-萤石理想棱镜组合,实现了光路同轴性和良好色散线性度。设计结果为光学系统的光谱范围为400~1000 nm,  $F$ 数为3.5,前置望远物镜奈奎斯特频率处设计调制传递函数(MTF)大于0.5,畸变小于0.1%,像面照度均匀性高于98%。整个系统奈奎斯特频率处设计MTF大于0.44,平均光谱分辨率为10 nm。

**关键词** 光谱学; 可见/近红外; 棱镜分光; 实时成像光谱仪

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0630002

## Design of Optical System for Miniature Visible/Near-Infrared Real-Time Imaging Spectrometer

Liu Bing<sup>1,2</sup> Liu Ying<sup>1</sup> Li Can<sup>1</sup> Wang Jian<sup>1</sup> Li Chun<sup>1</sup> Sun Qiang<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>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** In order to solve the problem in traditional spectral imaging spectrometers that the spectral and image information cannot be acquired at the same time, a new type of real-time imaging spectrometer working in visible/near-infrared wide spectral range is designed. Different from traditional push-broom imaging spectrometers, the system is with multi-slits imaging technology that the spectral image of target is divided into several areas to achieve large field of spectrum. The system reasonably adopts low-dispersion optical glass and doublet lens to achieve aberration correction among wide spectral range. The front telescope objective system is a combination of complex double Gaussian structure to achieve small distortion and uniform illumination at slits for different fields of view. The image of telescope objective system is divided into two parts by prisms, and high spatial resolution of video monitoring and high spectral resolution of spectrometer are obtained. One part is received by a high-resolution panchromatic camera and the other is received by a grayscale camera. Triplet prisms are used as dispersion components. By optimizing the angle of prisms and controlling the actual light, a coaxial optical path and dispersion linearity is achieved with CaF<sub>2</sub>-silica-CaF<sub>2</sub> structure. The results are as follows: spectral range of the optical system is 400~1000 nm,  $F$  number is 3.5, modulation transfer function (MTF) of distortion is lower than 0.1%, illumination uniformity at image plane is higher than 98%, and MTF of the front telescope objective system is more than 0.5 at the Nyquist frequency. The designed MTF of the optical system is more than 0.44 at the Nyquist frequency and spectral resolution is 10 nm.

收稿日期: 2014-11-19; 收到修改稿日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(60977001)、吉林省科技厅项目(20106015, 20125092)

作者简介: 刘 兵(1986—),女,博士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: liu32060209@163.com

导师简介: 孙 强(1971—),男,博士,研究员,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn

\*通信联系人。E-mail: liuy613@163.com

**Key words** spectroscopy; visible / near-infrared; prism splitting; real-time imaging spectrometer

**OCIS codes** 300.6190; 300.6320; 170.0110

## 1 引 言

高光谱成像光谱仪由于能够同时获得目标的图像信息和光谱信息,广泛应用于航空、航天器等观测系统中<sup>[1]</sup>。地面植被的反射谱段主要集中在可见/近红外波段(400~1000 nm)<sup>[2]</sup>,在此波段上成像光谱仪接受到的太阳辐射能量强,图像信噪比高。伴随着小卫星、无人机等航空航天设备的发展,基于可见/近红外波段的成像光谱仪广泛应用于植物生长监控、植物类型鉴别、植株的农药残留、病虫害检测等领域<sup>[3-4]</sup>,尤其是轻小型实时成像光谱仪的需求尤为突出。

目前,美国SOC公司研制的710VP便携式光谱成像系统、美国Headwall公司研制的Hyperspec™高光谱成像仪([http://www.azup.com.cn/html/2014/PortableHSI\\_0404/58.html](http://www.azup.com.cn/html/2014/PortableHSI_0404/58.html))、芬兰Specim公司研制的Inspector系列成像光谱仪([http://www.zolix.com.cn/prodcon\\_370\\_375\\_367.html](http://www.zolix.com.cn/prodcon_370_375_367.html))均采用推帚工作模式,可获得较高的空间分辨率和光谱分辨率,但推帚模式的光谱仪在采集数据时耗时长,效率低<sup>[5-6]</sup>。德国Cubert公司的UHD185型实时轻小型成像光谱仪采用凝视工作模式,提取数据立方体的速度远高于推帚模式成像光谱仪([http://www.azup.com.cn/html/2014/UAVHSI\\_0325/8.html](http://www.azup.com.cn/html/2014/UAVHSI_0325/8.html))。而我国卓立汉光公司所生产的几款轻小型成像光谱仪采用推帚型工作模式,不但采集数据耗时长,而且光谱分辨率低。成像光谱仪的核心是色散元件。在众多分光方式中,棱镜分光的缺点是存在很大的色散非线性。利用Fery棱镜和Offner中继结构组成的光谱成像系统可以改善色散非线性<sup>[5-6]</sup>。但是Fery棱镜制作工艺复杂,检测手段有限,装调工作难度大。

为了缩短光谱仪采集数据时间,增大光谱范围及光谱分辨率,该成像光谱仪采用凝视工作模式,实现快速采集数据;为了实现色散线性,简化装调难度,将棱镜组作为分光元件,提高谱段带宽的同时实现高光谱分辨率成像;以双高斯结构的望远系统来实现小畸变、高成像质量;利用像方远心结构和无渐晕设计达到系统像面的均匀照明;采用双相机方案实时监控空间分辨率和光谱分辨率。最终系统的平均光谱分辨率可达到10 nm,空间分辨率是0.157 mrad,对我国轻小型实时高光谱成像光谱仪的研究和发展具有重要意义。

## 2 视频光谱仪系统工作原理及参数选择

如图1所示,视频成像光谱仪主要由前置望远物镜、分束棱镜组、狭缝阵列、光谱成像系统以及全色相机组成,光谱成像系统由准直系统、色散元件、收集系统和灰度相机组成。其工作原理是目标反射的太阳光经过前置望远物镜,由分束棱镜按2:8的分束比分成两路,其中20%的光能量透过分束棱镜进入高空间分辨全色相机,产生高空间分辨视频图像信息;80%的光能量通过分束棱镜反射后照射到狭缝阵列并进入成像光谱仪系统,保证在灰度相机上获得足够能量的高光谱分辨率和低空间分辨率的视频光谱图像。为了使成像光谱仪系统达到较好的对称性,降低像差的校正难度,光谱成像系统垂轴放大倍率为-1。若灰度相机和全色相机有相同的像素数和像素尺寸,则两路系统具有相同的目标视场,即全色相机和灰度相机上获得的是同一目标的图像信息和光谱图像信息。将全色相机上的高空间分辨率图像和灰度相机上的高光谱分辨率图像进行差值运算即可获得具有高光谱分辨率和高空间分辨率的视频图像<sup>[7]</sup>。

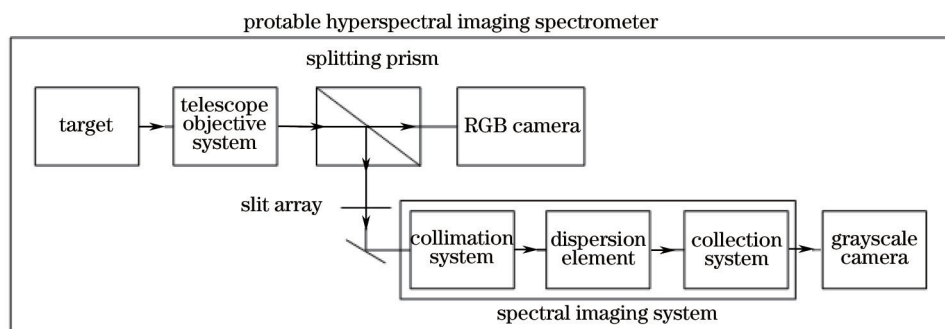


图1 光学系统结构示意图

Fig.1 Layout of the optical system

该光谱仪主要应用于植被的检测和艺术品的鉴定,所以该便携式成像光谱仪的工作波段选择为可见/近红外波段,即400~1000 nm,一般要求分辨率达到10 nm左右即可。该系统所选全色与灰度相机均为IO公司的Flare 2M360,主要指标是:像素2048 pixel×1088 pixel;像素尺寸5.5 μm×5.5 μm,为了获得足够高的光谱分辨率,灰度相机像素2048 pixel方向为光谱维方向。为了获得较多的光通量和较高的目标分辨率,设计系统的F数为3.5,前置望远物镜焦距为35 mm,由于选择狭缝的尺寸为两个像素大小,则由系统的瞬时视场角公式

$$2 \tan \frac{\theta_{\text{IFOV}}}{2} = \frac{a}{f_1}, \quad (1)$$

式中 $a$ 为像素大小, $f_1$ 为前置望远物镜焦距,根据(1)式计算得知,系统的瞬时视场角是0.157 mrad。则系统的总视场角为

$$\theta_{\text{FOV}} = \theta_{\text{IFOV}} \times M, \quad (2)$$

式中 $M$ 为像素个数,计算得知总视场角是18.4°×9.8°。

为了实现平均光谱分辨率为10 nm的光谱分辨率,若成像光谱仪系统具有较好的线色散度,在光谱带宽为600 nm的范围内,需要获得100个光谱通道,实验中设狭缝阵列光谱维为10,则每个狭缝宽度方向对应的像素数为2048/10/100≈2 pixel,即每个狭缝宽度为11 μm;为了获得足够的光谱能量,设空间维占狭缝的个数为10个,即狭缝长度为55 μm,考虑到狭缝阵列加工定位精度约为±5 μm,为避免两列光谱之间的相互干扰,令两列狭缝之间的间隔为2 pixel,则空间维狭缝个数为1088/12≈90个。为了便于仪器的光谱标定和图像处理<sup>[8]</sup>,令相邻两列狭缝错开,错开间隔为同列两个狭缝间隔的一半,如图2所示。

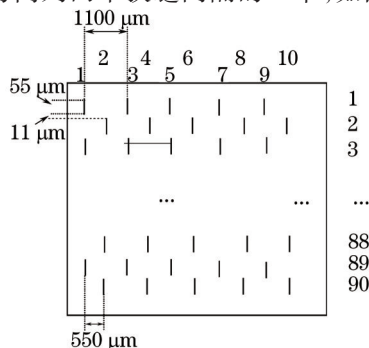


图2 多狭缝阵列

Fig.2 Multi-slit array

为了保证最终图像融合简单和快捷,要求全色相机和灰度相机上狭缝像的大小一致。对于光谱成像系统,为了降低光谱成像系统像差校正的难度,系统的垂轴放大倍率为-1,即准直系统和成像系统焦距相等。 $f_2$ 是准直系统的焦距, $f_3$ 是成像系统焦距。按照狭缝阵列的排列方式,计算每个狭缝大约对应200 pixel,即对应灰度相机探测器上1.1 mm的长度,即系统的线色散率 $\frac{dl}{d\lambda}$ 。取 $\Delta=0.6^\circ$ , $\Delta\lambda$ 为光谱带宽600 nm。又知棱镜色散与收集系统焦距关系为

$$f_3 \times \frac{\Delta}{\Delta\lambda} = \frac{dl}{d\lambda}, \quad (3)$$

式中 $dl$ 为单位长度 $d\lambda$ 上的色散距离,则成像系统焦距 $f_3=100$  mm。可知准直系统的焦距 $f_2=100$  mm。

综上所述,表1给出便携式高光谱成像光谱仪的主要设计指标。

表1 光学设计指标

Table 1 Optical design parameters

Parameters	Values
Wavelength	400~1000 nm
Spectral resolution	10 nm
Number of pixels	2048 pixel×1088 pixel
F/#	3.5
Field of view	18.4°×9.8°
Slit	55 μm × 11 μm
Focal length	35 mm
Focal length of collimating system	100 mm
Focal length of collection system	100 mm
Spectral channel number	100

### 3 结构设计

#### 3.1 前置望远物镜设计

前置望远物镜是系统的重要组成部分之一,用于收集外界目标的能量信息和空间信息,其性能的好坏直接影响着目标图像质量和系统的光谱分辨率,因此,前置望远物镜的设计质量决定整个系统性能的好坏<sup>[9]</sup>。为了获得足够目标能量和光谱信息、保证目标信息不失真,该成像光谱仪系统要求前置望远物镜具有小  $F$  数、宽谱段、小畸变的特点,这使得前置望远物镜需要合理地选择初始结构和严格的初高级像差平衡,为了保证前置望远物镜垂轴像差的良好校正,系统初始结构采用复杂的双高斯结构,通过系统的失对称优化设计保证整个系统无渐晕,实现前置望远物镜的像差平衡和像面照度的均匀化。完全对称型高斯结构能够消除垂轴像差,而轴向像差则互相叠加,因此,在系统优化设计时,先将高斯结构的半部进行优化,保证系统的轴向像差达到最佳优化,然后将优化好的半部结构复制,获得完全对称的高斯系统,由于前置望远物镜并非物像对称,这时采用非对称处理,透过厚透镜分离,将结构进一步复杂化,使得各类像差得到进一步平衡和校正。

利用 Zemax 软件最终优化结果图,设计调制传递函数图(MTF)/像面照度图、像面圆内能量图如图 3~7 所示。可以看出,前置望远物镜各视场在奈奎斯特特征频率 90 lp/mm 处设计 MTF 大于 0.5;像面照度均匀性接近于 1,并且目标能量的 80% 包含在 2.5  $\mu\text{m}$  直径内,小于一个像素的尺寸 5.5  $\mu\text{m}$ 。该尺寸与传感器匹配良好,并且为加工公差留下余量。根据优化最终结果可知由全色相机收集的目标信息图像质量优良。

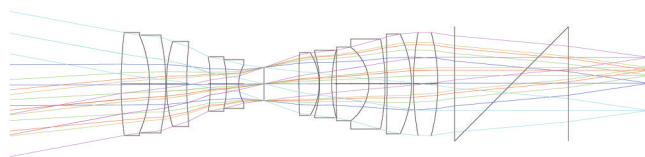


图 3 前置望远物镜设计光路图

Fig.3 Optical layout of the telescope objective system

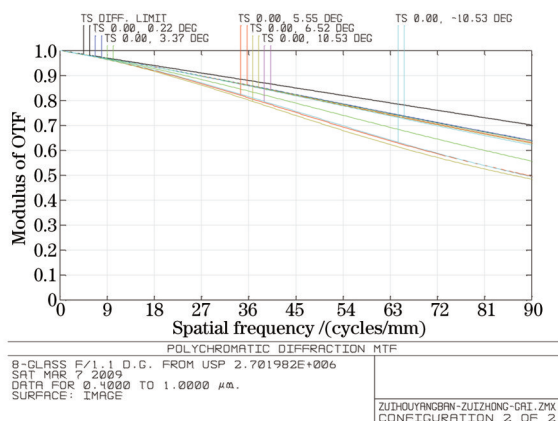


图 4 系统设计调制传递函数图

Fig.4 Designed MTF of the system

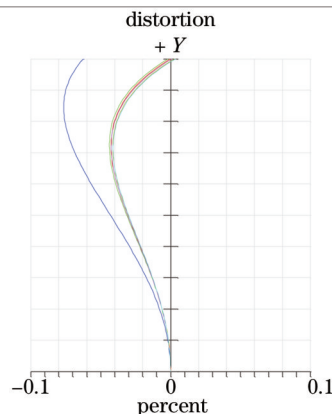


图 5 系统的畸变曲线

Fig.5 Distortion curves of the system

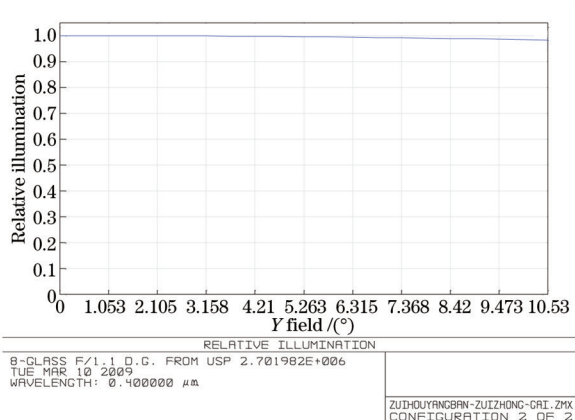


图 6 像面的照度曲线

Fig.6 Illuminance curves of the telescope system

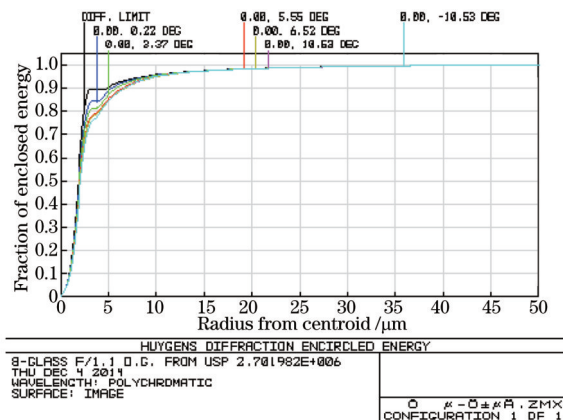


图 7 像面圆内能量

Fig.7 Circular energy

### 3.2 棱镜光谱仪设计

光谱成像系统主要包括准直系统、色散元件和收集系统。色散元件可以选择光栅、棱镜-光栅、棱镜-光栅-棱镜<sup>[10-12]</sup>。但是该系统是在400~1000 nm的宽谱段内成像,考虑到光栅的二级衍射谱线干扰问题以及仪器需要比较高的能量利用率,色散元件选择棱镜。准直系统采用像方远心设计、成像系统采用物方远心结构可以消除因立体视差引起的景象畸变<sup>[10]</sup>,保证像面照度均匀,并且能够简化检测和装调过程,即使全色相机和狭缝阵列安装位置稍有变化,也不会影响成像质量。

棱镜分光式光谱成像系统设计需要注意两个问题,一是光瞳衔接,即光谱仪的入瞳与前置望远物镜的出瞳衔接,保证整个系统能量和视场的利用率,二是色散棱镜设计,该系统采用三片胶合棱镜,保证中心波长无偏离,色散接近线性。

镜分光系统采用三棱镜对称结构作为初始结构,如图8所示。该结构的优点是相对于单棱镜能够大大提高色散的线性度,增强色散,保持直视结构,便于整个系统在平行光路中进行调节,且有效缩小棱镜的尺寸,便于整个系统的微型化、小型化。在考虑使用棱镜作为分光器件时,还要同时考虑出射光束是否被压缩。光束过分压缩或是扩大,会导致棱镜的尺寸不合理,还可能会有部分光束损失,不利于仪器的小型化以及光谱数据的提取。设计指标主要包括:平行于光轴入射中心波长为700 nm的光束,出射光束相对光轴无偏离;色散近似线性或是可用简单的函数拟合。该系统是在400~1000 nm的宽谱段内成像,考虑用氟化钙作为外层材料和熔融石英作为内层材料。

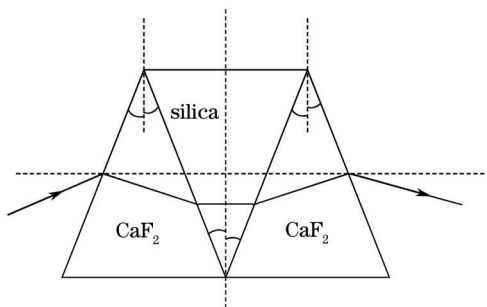


图8 对称三棱镜示意图

Fig.8 Symmetrical triplet prisms

利用经验公式

$$\delta = (n - 1)\alpha + l\alpha^3, \tag{4}$$

式中  $\delta$  为偏离角,  $l = \frac{1}{24}(n^3 - n)$ ,

$$\Delta = (n_1 - n_s)\alpha + k\alpha^3, \tag{5}$$

式中  $\Delta$  为色散角,  $k = \frac{1}{24}[(n_1^3 - n_s^3) - (n_1 - n_s)]$ ,  $n_1$  和  $n_s$  分别为长波处和短波处的材料折射率。对于波长700 nm的光束,  $\delta = 0$ 。整个波段400~1000 nm中,色散角  $\Delta = 0.6^\circ$ 。利用(4)、(5)式,解得棱镜的顶角  $\alpha_1, \alpha_2$ 。通过改变顶角寻找最优解,最后利用Zemax进行优化。解得棱镜顶角分别为  $38.5^\circ, -79.5^\circ, 46.5^\circ$ 。总偏离角  $\delta = 0.005^\circ$ ,  $\Delta = 0.5844^\circ$ 。色散线性度为0.26693,即一个波长的线度,长波的色散角是短波的0.26693倍。光束压缩系数,即出射光束与入射光束的宽度比为1.005。

利用Matlab模拟灰度相机上色散长度与波长的关系,如图9所示。拟合标准误差如表2所示。

表2 拟合标准误差

Table 2 Standard error

Wavelength range / $\mu\text{m}$	Linear fitting /mm	Quadratic fitting /mm
0.4~1.0	2.2916	0.86071
0.4~0.5	0.29509	0.02681
0.5~1.0	0.84688	0.26291

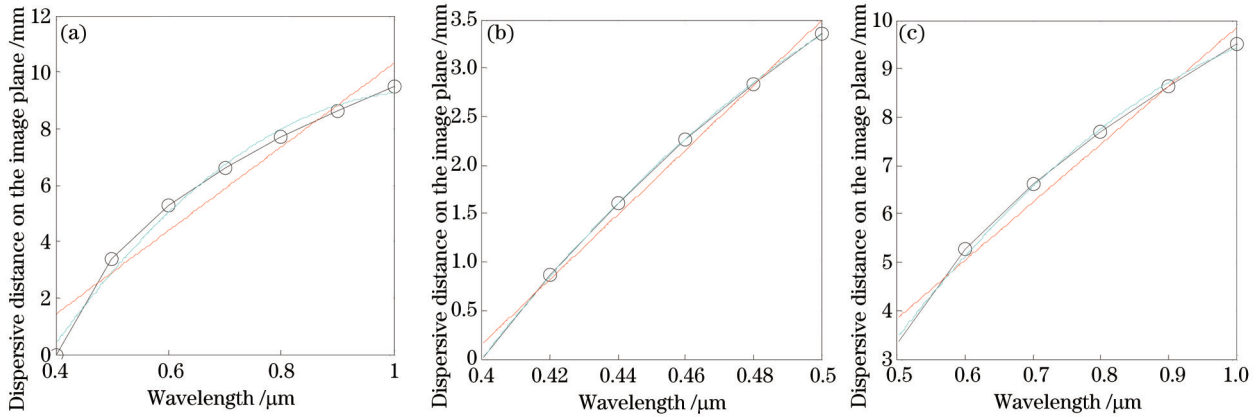


图9 波长与色散长度之间的关系。(a) 0.4~1.0  $\mu\text{m}$ ; (b) 0.4~0.5  $\mu\text{m}$ ; (c) 0.5~1.0  $\mu\text{m}$

Fig.9 Relationship between wavelength and dispersion length. (a) 0.4~1.0  $\mu\text{m}$ ; (b) 0.4~0.5  $\mu\text{m}$ ; (c) 0.5~1.0  $\mu\text{m}$

从图9(a)可以看出,短波色散较大,长波色散较小。整个波段色散线性度并不是非常理想。与二次拟合相比,线性拟合标准误差比较大。若对波长色散曲线进行分段拟合,会得到比较好的结果,将整个波段分为 0.4~0.5  $\mu\text{m}$  和 0.5~1.0  $\mu\text{m}$  两个部分,分别进行线性拟合,与表2进行比较得出,分段线性拟合之后,在每个波段均得到较好的拟合结果,基本上可以对色散近似线性处理。二次拟合虽然结果更好,但是与线性拟合相比,稍微麻烦一些。若要求更加精密的系统可以采用二次拟合。对于该系统,分段线性拟合就可以满足要求。

为保证全色相机与灰度相机成像尺寸完全一致且光瞳匹配,准直镜和成像物镜放大倍数为-1。为了保证系统具有更高的光谱分辨率和成像效果,还要利用成像系统对前置望远物镜做进一步的像差校正。系统总体光路图如图10所示,系统畸变曲线如图11所示,整个系统的畸变小于0.2%。系统在400,550,1000 nm处光谱分辨率点斑图如图12所示。系统的光谱分辨率在400 nm时为2 nm,在550 nm时为5 nm,在1000 nm时为10 nm。系统设计MTF图如图13所示。

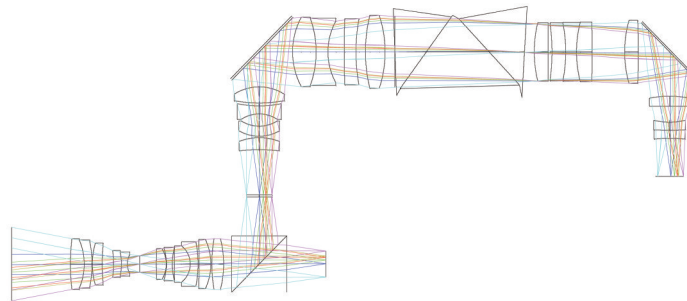


图10 系统总体光路图

Fig.10 Overall optical system

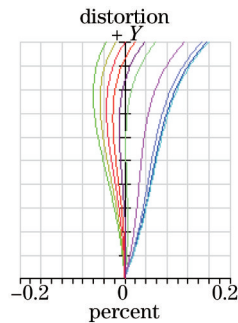
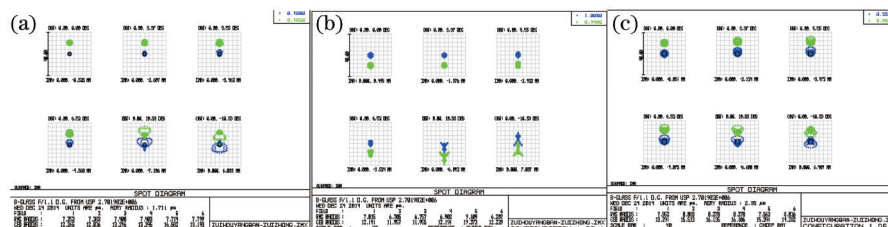


图11 系统的畸变曲线

Fig.11 Distortion curves of the system



- 王新全, 黄庆梅, 廖宁放, 等. 干涉型计算层析成像光谱仪的图像重建[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1600-1604.
- 8 Zhou Lianqun, Wu Yihui, Zhang Ping, *et al.*. A new mini-fiber-spectrometer adopting micro-silicon-slit[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6): 637-642.
- 周连群, 吴一辉, 张平, 等. 一种采用微硅片狭缝的新型微小型光纤光谱仪[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 637-642.
- 9 Lu Xuefeng, Bai Qinglan. Design of fore objective for wide spectrum imaging spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2993-2996.
- 逯雪峰, 白清兰. 宽谱段成像光谱仪前置物镜的设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2993-2996.
- 10 Chen Yang, Wang Yueming. Optical design of prism spectrometer system with a small incident angle[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922002.
- 陈杨, 王跃明. 小入射角棱镜成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922002.
- 11 Yang Zengpeng, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Optimization design method for optical system of prism-grating ultraspectral imaging spectrometers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911003.
- 杨增鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 棱镜-光栅组合色散型超光谱成像系统的优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911003.
- 12 Chen Hongfu, Gong Yan, Luocong, *et al.*. Design of prism-grating imaging spectrometer with eliminating spectral line curvature[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0922004.
- 陈洪福, 巩岩, 骆聪, 等. 消谱线弯曲棱镜-光栅型成像光谱仪设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0922004.

栏目编辑: 吴秀娟