

# 改进 Offner 型凸面光栅光谱辐射定标光学系统设计

徐达<sup>1\*</sup>, 张国玉<sup>1,2</sup>, 孙高飞<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对数字可调光源输出能量较低的问题, 提出一种改进型 Offner 凸面光栅光谱辐射定标光源光学系统的设计方法。基于光线追迹原理, 理论推导 Offner 型光谱成像结构狭缝和像散的关系, 利用双柱面透镜对 Offner 型光谱成像系统大狭缝下的残余像散进行补偿。使用所提方法设计了光谱范围为 500~800 nm, 狭缝长度为 0.4 mm 的传统 Offner 光谱成像系统和狭缝长度为 8 mm 改进型 Offner 光谱成像系统。结果表明: 改进型 Offner 光谱成像系统具有良好的成像质量, 全视场点列图方均根(RMS)半径小于 8.1  $\mu\text{m}$ ; 系统沿 Y 方向 RMS 半径小于 6.7  $\mu\text{m}$ , 在一个像元尺寸内; 谱线弯曲为单像元尺寸 6.2%、色畸变为单像元尺寸 5.8%, 消除了谱线重叠和谱线偏移现象。设计方法对提高遥感仪器的光谱辐射定标精度具有一定的研究意义和工程价值。

**关键词** 光学设计; 光谱辐射定标; Offner 光谱成像系统; 消像散; 凸面光栅

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0822002

## Design of Advanced Offner-Type Convex Grating Spectral Radiation Calibration Optical System

Xu Da<sup>1\*</sup>, Zhang Guoyu<sup>1,2</sup>, Sun Gaofei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In this study, we propose a design method of advanced Offner-type convex grating spectral radiation calibration light source optical system to solve the problem of low energy output in case of digital tunable light sources. Further, we theoretically deduce the relation between slit and astigmatism of the Offner-type spectral imaging structure based on the theory of ray tracing. The residual astigmatism in the large slit of the Offner-type spectral imaging system is compensated using a double cylindrical lens. Using the proposed method, a traditional Offner-type spectral imaging system with a slit length of 0.4 mm and an advanced Offner-type spectral imaging system with a slit length of 8 mm are designed having the same spectral range from 500 to 800 nm. The results indicate that the advanced Offner-type spectral imaging system exhibits good image quality and that the root mean square (RMS) radius of full field of view spot diagram is less than 8.1  $\mu\text{m}$ ; the RMS radius along the Y direction is less than 6.7  $\mu\text{m}$ , which is within the size of a single pixel. The smile is 6.2% of the size of a single pixel, whereas color distortion is 5.8% of the size of a single pixel; thus, spectral overlapping and spectral offset are diminished. Therefore, the proposed method has some research significance and engineering value to ensure the improved precision of spectral radiometric calibration in case of remote sensing instruments.

**Key words** optical design; spectral radiance calibration; Offner spectral imaging system; anastigmatism; convex grating

**OCIS codes** 220.4830; 120.4820; 120.6200; 300.6380

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2019-12-16; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61703057)、吉林省科技发展计划项目(20190302124GX)

\* E-mail: 418168115@qq.com

## 1 引 言

随着空间遥感技术的迅速发展,遥感信息的定量化逐渐成为遥感研究中的关键技术,遥感信息定量化研究的前提是遥感仪器准确的辐射定标。遥感仪器的辐射定标直接决定了其精度水平,定标精度同时也决定了遥感数据的准确性,因此准确的辐射定标对遥感数据有着重要的影响<sup>[1-2]</sup>。

目前,国际上主流的遥感仪器,例如美国研制的星载太阳后向散射紫外谱仪、用于地外太阳光谱精确测量的太阳恒星辐照度比较试验仪,及我国研制的星载臭氧垂直探测仪、大气定量光谱遥感仪等,对光谱辐射定标精度提出了很高的要求<sup>[3-6]</sup>。辐射定标光源与目标的光谱差异会导致定标结果包含光谱非匹配所引入的不确定度<sup>[3-4]</sup>,对高精度遥感仪器,光谱的非匹配对定标结果的影响不可忽略。2012年刘洪兴等<sup>[7]</sup>设计了氙灯和发光二极管(LED)的积分球光源;2013年袁银麟等<sup>[8]</sup>设计了光学遥感辐射定标用积分球参考光源,利用LED对氙灯、卤钨灯进行补偿,实现对目标光谱的模拟;2015年孙景旭等<sup>[9]</sup>设计了直径为4 m的均匀扩展定标光源,该设计以实现大出光面积的辐射光源为目的,满足了大视场、大口径遥感仪器辐射标定的要求,但没有对目标光谱进行模拟;2015年刘洪兴<sup>[10]</sup>设计了一种基于LED的多色温积分球光源,通过增加LED的数量和种类,一定程度上提高了目标光谱的模拟精度。LED光谱模拟技术受限于LED种类,其光谱模拟精度较低、光谱模拟种类有限,难以达到遥感仪器对光谱辐射定标高精度、大动态范围的辐射定标要求。近年来,随着空间光调制器件的发展,数字可调光源

由于具有较高的光谱模拟精度而逐渐成为光谱辐射定标源的研究热点,并且还具有宽带输出和窄带输出功能。在窄带模式下,数字可调光源以标准探测器为光源定标;在宽带模式下,为遥感仪器定标。基于光的色散原理,数字可调光源的光谱模拟精度受光束细分系统成像质量的影响。光束细分系统是基于棱镜或光栅的光谱成像系统的,为获得较高的成像质量,其入射狭缝视场通常较小,导致辐射定标光源的输出能量较弱,无法满足遥感仪器的光谱辐射定标需求。

本文提出一种改进 Offner 型凸面光栅光谱辐射定标光源光学系统的设计方法。基于光线追迹原理,理论推导 Offner 型光谱成像结构狭缝和像散的关系,利用双柱面透镜对 Offner 型光谱成像系统大狭缝下的残余像散进行补偿。通过 ZEMAX 设计了传统 Offner 型光谱成像系统和改进型 Offner 光谱成像系统。改进型 Offner 光谱成像系统将狭缝长度由0.4 mm扩大到了8 mm,提高了系统的输出能量,对提高遥感仪器的光谱辐射定标精度有一定的研究意义和工程价值。

## 2 Offner 型光谱定标系统的组成和工作原理

Offner 型辐射定标光源的组成如图1所示,主要由光源、Offner 型光谱成像系统、数字微镜(DMD)及积分球组成。选择光谱曲线平滑的卤钨灯作为输入光源,光源发出的宽光谱光束经过狭缝入射至 Offner 光谱成像系统;利用凸面光栅的色散特性,将不同波长的光束分开;成像物镜将不同波长

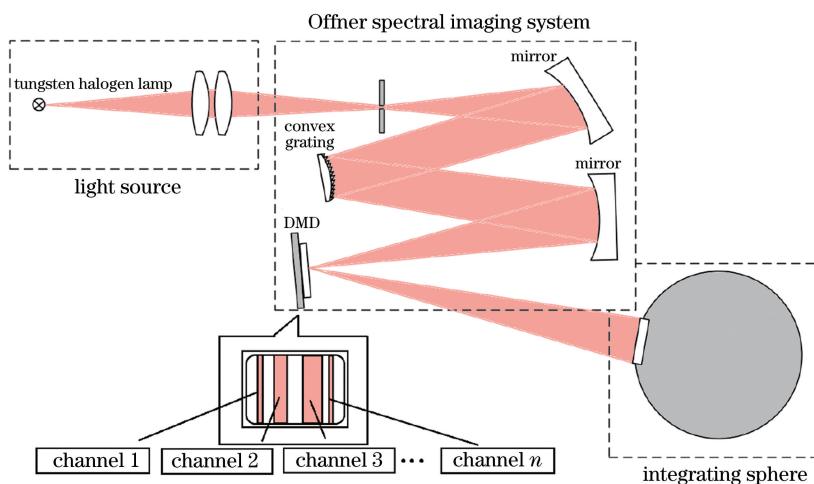


图1 光谱辐射定标系统示意图

Fig. 1 Schematic of spectral radiation calibration system

的光束依次成像在位于像方焦面 DMD 的不同列上;DMD 对阵列面的光谱分布进行调制,输出目标光谱,通过选通 DMD 的开关状态,可以实现窄带和宽带两种输出模式。

根据辐射定标系统的工作原理可知,DMD 通过微镜偏转对入射光束进行调制,选通的光束入射至积分球内,其余光束则通过光学陷阱滤掉;提高相对孔径会导致整个系统的横向尺寸过大,为保证 Offner 型光谱成像系统各部分元件不互相干涉,系统的相对孔径不能过大。因此通过扩大 Offner 型光谱成像系统的视场,提高辐射定标系统的能量。

### 3 Offner 型光谱成像系统原理

Offner 型光谱成像系统的结构是基于凸面光栅的同心光学系统的,其成像符合罗兰圆条件,从而系统具有良好的光学性能,三级的赛德尔像差<sup>[11-13]</sup>得到了校正,其成像原理如图 2 所示。

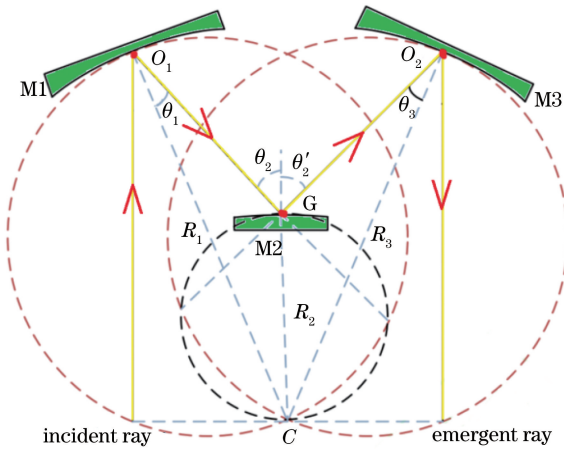


图 2 Offner 型成像系统原理图

Fig. 2 Schematic of Offner-type imaging system

M1 为主镜,G 为光栅,M2 为次镜,孔径光阑位于凸面光栅上,入射光束主光线和出射光束主光线平行且均垂直于物像平面,这组合形成远心系统。在近轴条件下,成像宽光束光线不平行度较小,带来的像差很小<sup>[14]</sup>,近似满足同心光学系统的理想成像条件;但是凸面光栅的色散性质使得 Offner 光学结构的对称性遭到破坏,导致系统存在残余的彗差和像散<sup>[15]</sup>。由于 Offner 光学结构缺乏平衡残余像差的自由度,因此仅适用于小视场成像。

### 4 Offner 型光谱成像系统的像散分析

为研究 Offner 光学结构像散随视场变化的关系,利用光线追迹方法,分别对狭缝上任一点发出的子午光线和弧矢光线进行追迹。Offner 型光谱成

像系统的子午光束成像和弧矢光束成像如图 3 和图 4 所示,O 为边缘狭缝上一点,位于 XCY 平面内,C 为主镜、光栅及次镜的公共球心, $I_M$  为子午像点, $d_{CI_M}$  为公共球心到子午像点的距离。

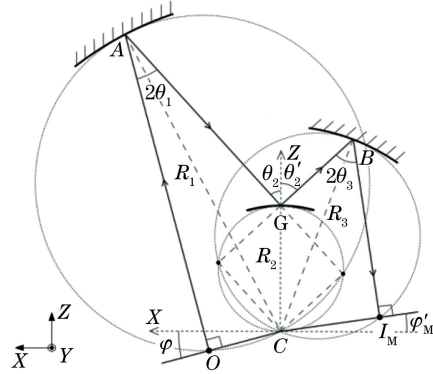


图 3 子午光束成像

Fig. 3 Meridional light beam imaging

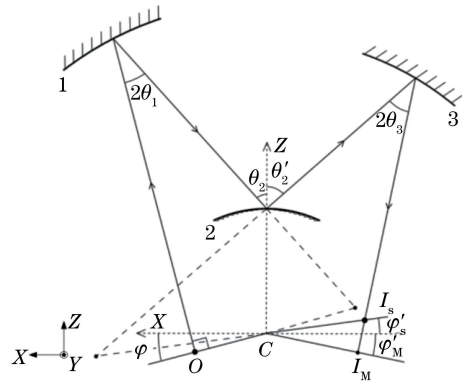


图 4 弧矢光束成像

Fig. 4 Sagittal light beam imaging

当 Offner 结构中所有元件均满足罗兰圆条件时,物点位于第一个反射镜的罗兰圆上,主镜的罗兰圆与光栅的罗兰圆相交于主镜的子午像点,在四边形 AOCG 中的关系为

$$\frac{\pi}{2} + 2\theta_1 + (\pi - \theta_2) + \frac{\pi}{2} + \varphi = 2\pi, \quad (1)$$

化简后可推导出

$$\varphi = \theta_2 - 2\theta_1. \quad (2)$$

由三角形 AOC 可推出

$$OC = R_1 \sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2. \quad (3)$$

同理,由光栅和次镜可推出

$$\varphi'_M = 2\theta_3 - \theta'_2, \quad (4)$$

$$d_{CI_M} = R_2 \sin \theta'_2 = R_3 \sin \theta_3, \quad (5)$$

式中: $\varphi'_M$  为子午像极角。

根据空间光栅方程,有

$$\sin \theta'_2 \cos \gamma' - \sin \theta_2 \cos \gamma = mg\lambda, \quad (6)$$

$$\sin \theta'_2 \sin \gamma' - \sin \theta_2 \sin \gamma = 0, \quad (7)$$

式中： $\gamma$  为主光线入射光栅的空间方位角； $\gamma'$  为衍射的空间方位角； $m$  为衍射级次； $g$  为光栅线数。由此可以推出  $\varphi'_s$  与  $\varphi$  满足的关系为

$$\tan \varphi'_s = \tan \varphi \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'}, \quad (8)$$

式中： $\varphi'_s$  为弧矢像极角。

Offner 型光谱成像系统狭缝上任一点的像散可表示为

$$T_{AS} = d_{CI_M} \tan(\varphi'_s - \varphi'_M). \quad (9)$$

Offner 型光谱成像系统的消像散条件为

$$\varphi'_s = \varphi'_M. \quad (10)$$

狭缝上不同的点发出的入射光束具有不同的夹角  $\varphi$ 、空间入射方位角  $\gamma$ 、空间衍射方位角  $\gamma'$ ，因此具有不同的  $\varphi'_s$ 、 $\varphi'_M$ 。设狭缝任一点  $O$  的坐标为  $(x, y)$ ，主镜、凸面光栅、次镜的半径分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ，则有

$$d_{CI_M} = \sqrt{x^2 + y^2} \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'}, \quad (11)$$

$$\varphi'_s = \arctan \left[ \frac{\sin \gamma'}{\sin \gamma} \tan \left( \arcsin \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R_2} - 2 \arcsin \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R_1} \right) \right], \quad (12)$$

$$\varphi'_M = 2 \arcsin \left( \frac{\sin \gamma'}{\sin \gamma} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R_1} \right) - \arcsin \left( \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (13)$$

根据(11)~(13)式可知,Offner 型光谱成像系统过大的狭缝尺寸无法校正系统边缘视场的残余像散。经典的 Offner 型光谱成像结构在一个小狭缝的近轴区域中可近似完善像,当狭缝长度继续增加时,像散将迅速增加,使得成像质量迅速下降。根据 Offner 型光谱成像系统像散随视场的变化关系,为校正长狭缝下带来的大像散,采用双柱面透镜对大视场下的残余像散进行校正,在 Offner 型光谱成像系统的反射镜 M3 和像面之间引入柱面镜。柱面镜由于自身的曲面特性,具有良好的消除子午方向和弧矢方向焦差(子午方向焦距和弧矢方向焦距偏差)的优势,在子午方向曲率半径为零,相当于平板玻璃;在弧矢方向可以适当补偿弧矢像距。带有一定楔角的柱面镜可以进一步消除残余像散,降低像面弯曲带来的影响。

## 5 Offner 型光谱成像系统的优化设计

Offner 型光谱成像系统的光谱范围为 500~800 nm,空间光调制器件 DMD 的分辨率为 1920×1080,单像元尺寸为 7.6 μm。利用 ZEMAX 分别设计了传统的 Offner 光谱成像系统和改进型 Offner 光谱成像系统,其中传统 Offner 光学系统的狭缝长度为 0.4 mm,改进型 Offner 光学结构的狭缝长度为 8 mm。

根据第 4 节可知,Offner 光谱成像结构仅在小视场下具有良好的成像质量。为提高 Offner 型光谱成像系统的像质,将主镜分裂为两个凹面反射镜,增加系统优化设计的自由度,利用分裂后结构的非对称性,平衡系统的残余像差。传统 Offner 型光谱

成像系统的光学结构如图 5 所示,其结构参数如表 1 所示,成像质量如图 6~9 所示。

表 1 传统 Offner 型光谱成像系统的光学结构参数

Table 1 Optical structure parameters of traditional Offner-type spectral imaging system

Surface	Radius / mm	Thickness / mm	Material	Lines / (lp · mm <sup>-1</sup> )
1	-84.500	30	Mirror	
2	-473.676	30	Grating	600
3	-95.065	55.545	Mirror	

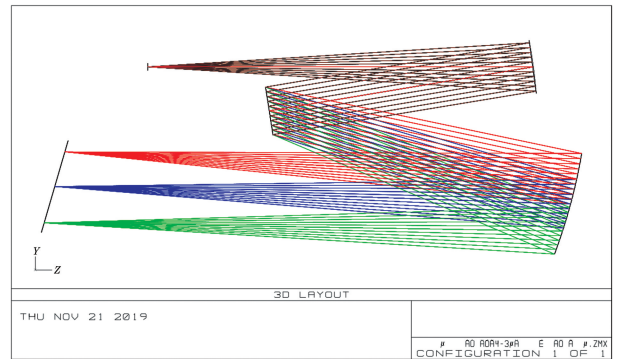


图 5 传统 Offner 型光谱成像系统的光学结构

Fig. 5 Optical structure of traditional Offner-type spectral imaging system

由图 7~9 可知,Offner 型光谱成像系统在波长为 500 nm 处弥散斑方均根(RMS)半径小于 6.3 μm,波长为 650 nm 处弥散斑 RMS 半径小于 5.1 μm,波长为 800 nm 处弥散斑 RMS 半径小于 12.09 μm。边缘视场和中心视场的弥散斑差异较大,这是由系统自由度小所造成的。由于视场的对称性,



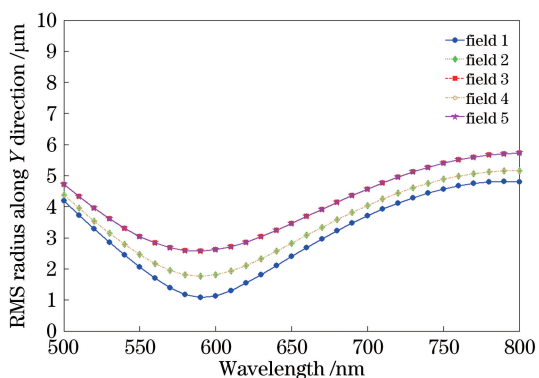


图 6 传统 Offner 型系统的 RMS 半径随波长变化的曲线

Fig. 6 Curve of RMS radius varies with wavelength in traditional Offner-type system

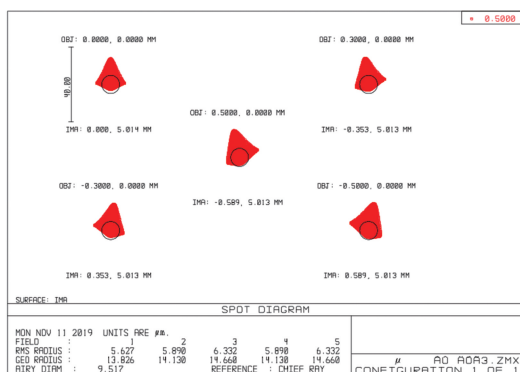


图 7  $\lambda=500$  nm 处点列图

Fig. 7 Spot diagram at  $\lambda=500$  nm

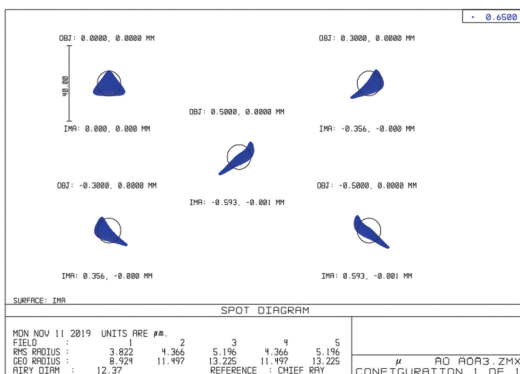


图 8  $\lambda=650$  nm 处点列图

Fig. 8 Spot diagram at  $\lambda=650$  nm

表 2 改进 Offner 光谱成像系统的结构参数

Table 2 Optical structure parameters of advanced Offner-type spectral imaging system

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Lines /( $lp \cdot mm^{-1}$ )	Tilt angle along X direction /( $^{\circ}$ )
1	-62.913	30	Mirror		
2	-49.463	30.588	Grating	600	10
3	-67.826	40.526	Mirror		
4	-49.302	2	H-K9L		-15.714
5	-64.988	25.031			
6	Infinity	2.997	H-K9L		
7	Infinity	0.480			

视场 2、4 和 3、5 具有相同的 RMS 半径变化曲线,根据图 6 可知,系统沿 Y 方向 RMS 半径小于  $6 \mu\text{m}$ ,在一个像元尺寸内。

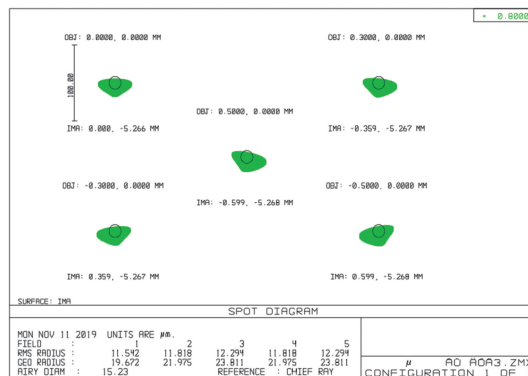


图 9  $\lambda=800$  nm 处点列图

Fig. 9 Spot diagram at  $\lambda=800$  nm

光谱辐射定标光源的工作原理是通过 DMD 对其阵列面上的空间光谱分布进行调制,Offner 型光谱成像系统的视场较小,无法实现大谱面成像,为匹配 DMD 阵列面,需将系统次镜面型优化为柱面镜,使狭缝的像在弧矢方向进行扩展,从而达到大成像谱面的效果。

改进型 Offner 光谱成像系统是以传统 Offner 结构为基础,在像面前加入具有一定倾角的双柱面透镜,实现了对大视场下残余像散的平衡。改进型 Offner 光谱成像系统的狭缝长度为 8 mm,较传统 Offner 结构扩大了 20 倍,有效提高了光谱辐射定标光源的输出能量。光谱辐射定标光源利用 DMD 的空间光调制特性对目标光谱进行模拟,为了不使 DMD 的入射光束和反射光束干涉,在插入柱面镜后,系统需要较长的后截距。考虑 DMD 窗口的影响,优化后的光学结构如图 10 所示,成像质量如图 11~14 所示,结构参数如表 2 所示。

从图 11~13 可知,改进型 Offner 光谱成像系统在波长为 500 nm 处弥散斑 RMS 半径小于

7.68  $\mu\text{m}$ , 波长为 650 nm 处弥散斑 RMS 半径小于 6.2  $\mu\text{m}$ , 波长为 800 nm 处弥散斑 RMS 半径小于 8.1  $\mu\text{m}$ 。从图 14 可知, 系统沿 Y 方向 RMS 半径小于 6.7  $\mu\text{m}$ , 在一个像元尺寸内。

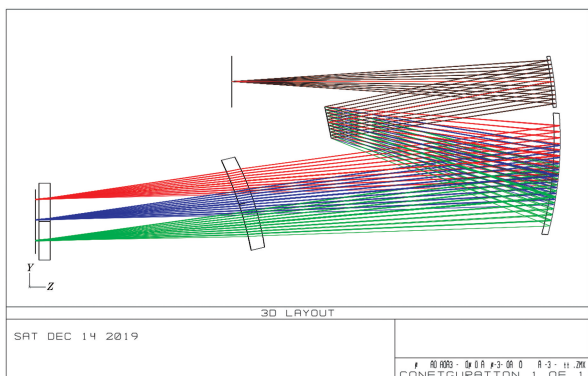


图 10 改进 Offner 型光谱成像系统的光学结构  
Fig. 10 Optical structure of advanced Offner-type spectral imaging system

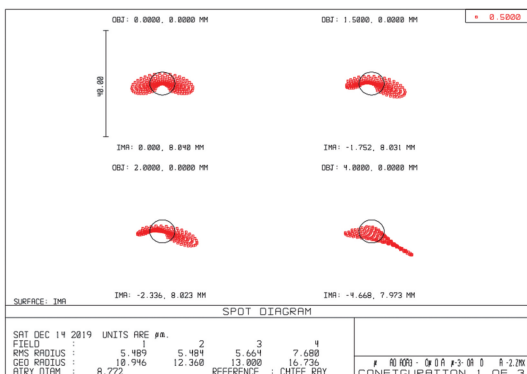


图 11 改进后  $\lambda=500$  nm 处点列图  
Fig. 11 Spot diagram at  $\lambda=500$  nm after improvement

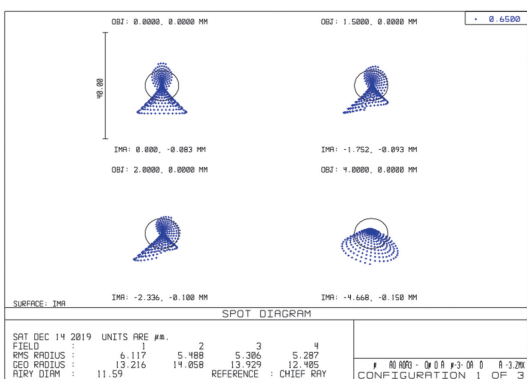


图 12 改进后  $\lambda=650$  nm 处点列图  
Fig. 12 Spot diagram at  $\lambda=650$  nm after improvement

对光谱辐射定标光源, 光谱成像系统的色畸变和谱线弯曲会严重影响光谱调制的精度, 其中色畸变为入射狭缝上同一点所成的不同波长的像点沿垂直于狭缝方向的偏离, 谱线弯曲指的是某一波长的

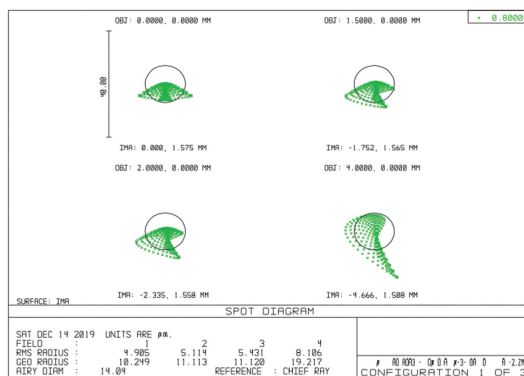


图 13 改进后  $\lambda=800$  nm 处点列图  
Fig. 13 Spot diagram at  $\lambda=800$  nm after improvement

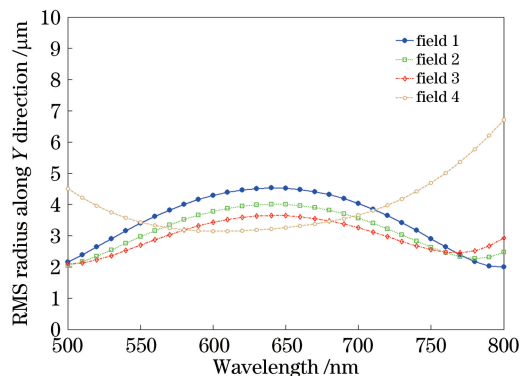


图 14 改进后 RMS 半径随波长变化的曲线  
Fig. 14 Curves of RMS radius varies with wavelength after improvement

边缘视场与中心视场在垂直于狭缝方向的像点位置差异。在 DMD 阵列面上, 色畸变和谱线弯曲会使光谱随视场的增大而逐渐偏离出对应的列像元, 出现单列像元内光谱偏移和光谱重叠现象, 影响光谱辐射定标光源调制的准确性, 从而降低了光谱模拟精度。为保证单列像素光谱数据有较高的一致性, 需要对光谱辐射定标光源严格校正色畸变和谱线弯曲。

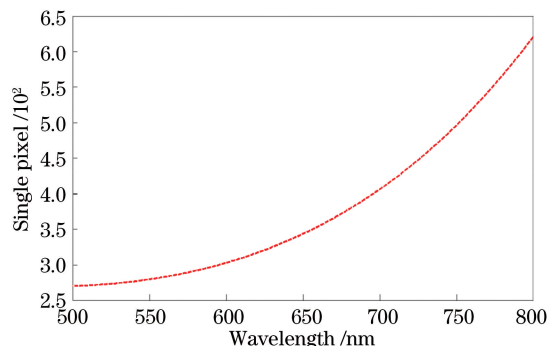


图 15 改进 Offner 型结构谱线弯曲  
Fig. 15 Smile for advanced Offner-type structure  
谱线弯曲和色畸变随波长变化的关系如图 15

和图 16 所示,变化趋势随着波长的增加而增大,谱线弯曲和色畸变最大值出现在 800 nm 处,谱线弯曲为单像元尺寸 6.2%,色畸变为单像元尺寸 5.8%。改进型 Offner 光谱成像系统很好地控制了谱线弯曲和色畸变,消除了 DMD 单元通道内的光谱偏移和光谱重叠,能够确保 DMD 阵列面与空间光谱辐射分布的准确标定,提高了光谱辐射定标光源的光谱调制精度。

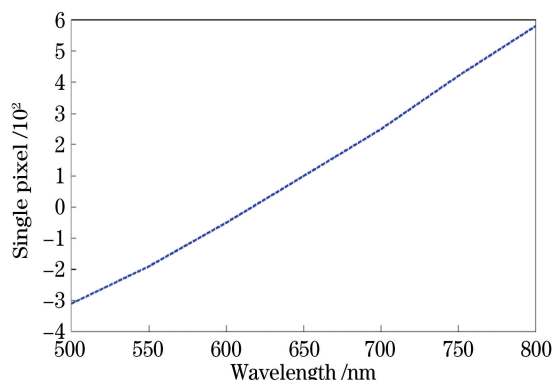


图 16 改进 Offner 型结构色畸变

Fig. 16 Color distortion for advanced Offner-type structure

## 6 结 论

针对遥感仪器对光谱辐射定标的高精度要求和数字可调型光谱辐射定标光源输出能量低的问题,提出了一种改进型 Offner 凸面光栅光谱辐射定标光源光学系统的设计方法。推导了 Offner 型光谱成像系统的像散随狭缝变化的关系,利用双柱面透镜改变了子午方向和弧矢方向成像的聚焦距离,补偿了大视场下的残余像散,从而有效扩大了 Offner 型光谱成像系统的视场。通过 ZEMAX 设计了改进型 Offner 光谱成像系统,实现了大狭缝下的高成像质量,校正了系统的谱线弯曲和色畸变,进而提高了数字可调光源的能量和光谱调制精度。所提方法为实现遥感仪器的高精度光谱辐射定标提供了研究基础,对提升遥感仪器的性能、遥感数据的价值及增加应用范围有一定的意义和工程价值。

### 参 考 文 献

- [1] Wan Z, Li B Y, Liu Z X, et al. Spectral and radiometric calibrations for mapping satellite-1 camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1867-1873.  
万志, 李葆勇, 刘则洵, 等. 测绘一号卫星相机的光谱和辐射定标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1867-1873.
- [2] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [3] Chen F, Zheng X B. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(3): 415-419.  
陈风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 415-419.
- [4] Xu D, Zhang G Y, Sun G F, et al. Spectrally tunable star simulator light source based on digital micro-mirror device[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(10): 1384-1390.  
徐达, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于数字微镜的光谱可调星模拟器光源系统[J]. 发光学报, 2017, 38(10): 1384-1390.
- [5] Harder J W, Lawrence G M, Rottman G J, et al. Spectral irradiance monitor (SIM) for the SORCE mission[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4135: 204-214.
- [6] Yang X H, Wang S R, Huang Y. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101004.  
杨小虎, 王淑荣, 黄煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱照度定标研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101004.
- [7] Liu H X, Sun J X, Liu Z X, et al. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1447-1454.  
刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1447-1454.
- [8] Yuan Y L, Xu J, Zhai W C, et al. Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712004.  
袁银麟, 徐骏, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712004.
- [9] Sun J X, Liu H X, Xu Y J, et al. 4 m extended uniform source for radiometric calibration [J]. Chinese Optics, 2015, 8(5): 823-831.  
孙景旭, 刘洪兴, 许艳军, 等. 4 m 直径均匀扩展定标光源[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 823-831.
- [10] Liu H X, Ren J W, Liu Z X, et al. LED-based single star simulator with multi-color-temperature and

- multi-star-magnitude output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212003.
- 刘洪兴, 任建伟, 刘则洵, 等. 基于LED的多色温多星等单星模拟器[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0212003.
- [11] Ji Y Q, Gong G B, Zhu S B, et al. Minimal integrated hyperspectral imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 727-731.
- 季轶群, 宫广彪, 朱善兵, 等. 微型集成超光谱成像系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4): 727-731.
- [12] Kim S H, Kong H J, Chang S. Aberration analysis of a concentric imaging spectrometer with a convex grating[J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 6-10.
- [13] Chang S. Quality factors of an aberrant Gaussian beam diffracted through a convex grating spectrometer[J]. *Optik*, 2016, 127(3): 1116-1120.
- [14] Huang Y S, Ni Z J, Zhuang S L. Research of the concentric optical system of grating spectrometers[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(6): 38-42.
- 黄元申, 倪争技, 庄松林. 光栅成像光谱仪同心光学系统研究[J]. *光学仪器*, 2005, 27(6): 38-42.
- [15] Sun J Y, Liu Y, Li C, et al. Comparative study on performances of long-wave infrared imaging spectrometers based on Offner form and Dyson form[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1030003.
- 孙佳音, 刘英, 李淳, 等. Offner型与Dyson型长波红外成像光谱仪性能对比研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1030003.