

# 基于微透镜阵列的积分视场成像光谱仪前置成像系统分析与设计

刘嘉楠<sup>1, 2\*</sup>, 崔继承<sup>1</sup>, 尹禄<sup>1, 2</sup>, 孙慈<sup>1</sup>, 陈建军<sup>1, 2</sup>, 张锐<sup>1, 2</sup>, 刘建利<sup>1, 2</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. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 作为对天文光谱进行观测的仪器, 成像光谱仪有着十分重要的作用。由于传统的狭缝型成像光谱仪的狭缝限制, 对面源天体的观测需多次扫描, 才能获得完整的面源三维数据立方体 $(x, y; \lambda)$ , 这样将会浪费大量的观测时间。为了实现目标物体三维数据立方体的快速扫描, 提出了一种基于微透镜阵列的无狭缝、静态化、快速高效的可见光到近红外波段积分视场成像光谱仪结构, 并对其基本工作原理进行分析。为了扩展微透镜阵列积分视场成像光谱仪在医学、农业、物探等其他领域的应用潜能, 该研究的光谱波段选择可见光到近红外波段。根据视场积分的工作原理, 分析和设计了像方远心结构的离轴三反前置成像系统。系统采用视场离轴方式, 波段范围400~900 nm, 相对口径F/5, 主镜、次镜和三镜皆为二次非球面, 二次非球面系数分别为: -7.05, -0.92和-1.61。为减小系统体积, 在离轴三反系统的焦平面附近放置反射镜。系统在奈奎斯特空间频率60 lp·mm<sup>-1</sup>处, 调制传递函数大于0.75, 成像质量接近衍射极限, 满足系统要求。

**关键词** 微透镜阵列; 积分视场成像光谱仪; 像方远心离轴三反; 视场离轴

**中图分类号:** TH741 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)10-3269-04

## 引言

微透镜阵列积分视场成像光谱仪是20世纪末出现的新三维成像光谱仪器, 可以实现面源目标三维数据立方体 $(x, y; \lambda)$ 的同时采样, 获取天体的完整信息。其大幅节省了望远镜宝贵的观测时间, 提高观测所得数据的稳定性与一致性, 是实现三维成像光谱技术的最有效手段, 并且是当天文观测手段关注的焦点之一<sup>[1-3]</sup>。微透镜阵列积分视场成像光谱仪是将微透镜阵列作为积分视场单元。微透镜阵列位于望远系统的焦面处, 光经过微透镜阵列后会在其后形成微孔径, 该微孔径作为后端的光谱仪系统的入射孔径, 将成像在望远系统焦面处的面源分割成若干单元像, 这些单元像被光谱仪色散为相应的光谱。该技术的缺点是会出现光谱重叠, 为了避免该问题, 需将微透镜阵列相对于色散方向旋转一定的角度<sup>[3]</sup>。这种技术仅适用于低分辨率宽波段或高分辨率、窄波段的观测, 例如星系个别吸收线的研究或从单条吸收线或发射线研究星系动力学<sup>[4-8]</sup>。

国内对于微透镜阵列型积分视场光谱仪的研究几乎为零, 而国际上, Keck望远镜的OSIRIS光谱仪、Gemini-South

Telescope的GPI光谱仪、Subaru望远镜的CHARIS光谱仪, 以及正在研究的Thirty Meter Telescope的IRIS光谱仪都属于微透镜阵列积分视场成像光谱仪<sup>[8-11]</sup>。四种光谱仪的工作波段均为短波红外。

为了实现微透镜阵列积分视场成像光谱仪在其他领域的应用, 本文在微孔径的几何光学理论基础上, 提出了一种基于微透镜的可见光到近红外波段的积分视场成像光谱仪。利用微透镜阵列代替狭缝, 实现单次扫描即可获得完整面源信息, 节省大量的观测时间, 实现信息的稳定性与同时性。

## 1 基础理论

### 1.1 微透镜阵列的积分视场成像光谱仪原理

本文提出的基于微透镜阵列的积分视场成像光谱仪的基本结构如图1所示。此系统主要由前置成像光学系统、积分视场单元、准直系统、分光系统和后置成像光学系统构成。该系统中微透镜阵列位于望远系统焦面处, 每一个阵列透镜都对应其所在位置处的视场。微透镜阵列将焦面处的像进行视场分割, 在其焦面处形成微孔径, 不同微孔径对应其所在位置处的视场, 微孔径将视场积分, 故无需推扫, 单次扫描即

收稿日期: 2017-06-29, 修订日期: 2017-11-18

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2014YQ12035102)资助

作者简介: 刘嘉楠, 女, 1990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: liu\_jianan0926@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: liu\_jianan0926@163.com

可获得全部视场的图像信息。信息为同一时刻获得, 因此保证了信息的准确性。经过切割再积分后的图像信息经准直系

统准直再经分光系统分光, 最后经后置成像系统即可获得目标物体的图像信息和光谱信息<sup>[16-18]</sup>。

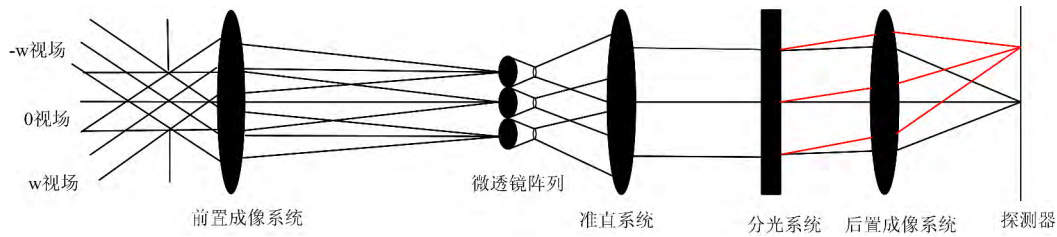


图 1 微透镜阵列积分视场成像光谱仪原理图

Fig 1 Principle of lenslet array integral field spectrometry

## 1.2 微透镜阵列的积分视场成像光谱仪的分析

为了获得均匀尺寸的微孔径, 并提高能量的利用率, 选择正方形阵列透镜。\$a\$ 为阵列透镜的尺寸, \$f\$ 为前置成像系统的焦距, \$R\$ 为阵列透镜的曲率半径, \$p\$ 为阵列透镜的口径。则每个阵列透镜所对应的视场角范围见式(1)

$$\omega_n = 2\arctan\left(\frac{a}{2f}\right) \quad (1)$$

微孔径的尺寸为 \$\phi\$, 如图所示。推导出 \$\frac{\phi}{2}\$ 表达式为式(2)

$$\frac{\phi}{2} = f \tan(i) - f \tan[\alpha(n-1)] + t \left\{ \tan\left[\alpha\left(\frac{n-1}{n}\right)\right] - \tan\left(\frac{i}{n}\right) \right\} \quad (2)$$

$$i = \alpha - \frac{\omega_n}{2} \quad (3)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{p}{2R}\right) \quad (4)$$

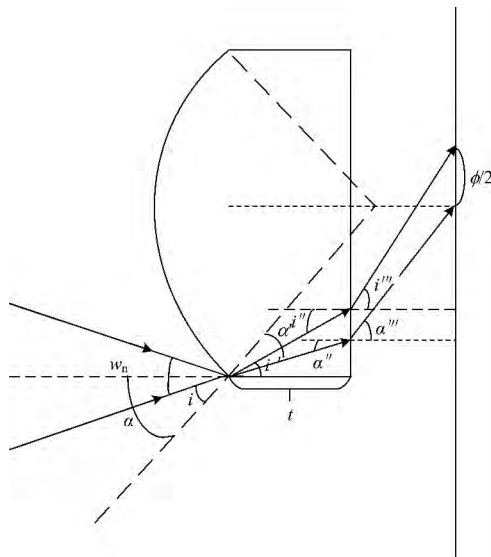


图 2 微孔径产生示意图

Fig 2 Production of the micro-pupil schematic diagram

由式(2)—式(4)及以上分析可知, 微孔径的尺寸 \$\phi\$ 与前置望远系统的焦距以及阵列透镜尺寸等参数均有关。为了得出最佳的微孔径尺寸 \$\phi\$, 并同时保证前置成像系统以及微透镜阵列系统结构的合理性, 利用 MATLAB 软件编制了初始

结构计算程序, 程序框图如图 3 所示。当输入 \$p, f\$ 则输出 \$\omega\_n, \alpha, i, \phi\$。得出的 \$\phi\$ 值进行分析是否符合系统分辨率要求, 再确认 \$p, f, R\$ 是否合理, 若都满足要求, 则根据得到的数据进行前置成像系统的设计, 若不满足要求, 返回程序开始, 重新选择 \$p, f, R\$, 知道得出的数据满足系统要求。

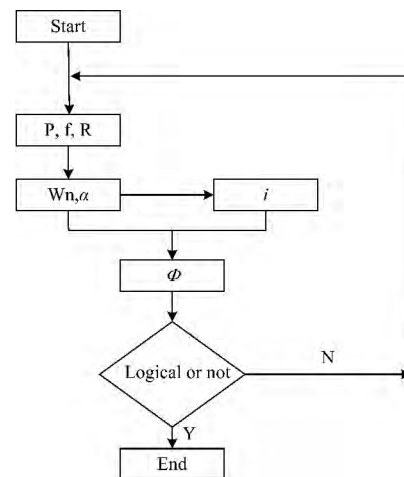


图 3 初始结构参数计算程序框图

Fig 3 Program block diagram for computing initial structure parameters

## 2 前置成像光学系统分析与设计

微孔径作为成像光谱仪的入射狭缝, 决定着光谱仪系统的性能。为了得到性能良好, 信息无串扰, 具有等相位波前的微孔径, 要求前置成像系统不同视场角的主光线均垂直于微透镜阵列的表面, 因此要求前置成像系统为像方远心光路结构。

当前置成像系统某一视场的主光线不垂直于微透镜阵列的表面时, 即成像在第 \$n\$ 个透镜阵列的某一视场主光线在微透镜阵列上的入射角为 \$\alpha\$, 当 \$\alpha\$ 大于每个阵列透镜所对应的视场角 \$\omega\$ 的二分之一时, 使得原本应成像在第 \$n\$ 个阵列透镜上的像点成像在其相邻的第 \$n-1\$ 个阵列透镜上, 从而导致相邻透镜所获得的图像信息的串扰, 给最终所获得的图像信息的数据处理带来困难, 如图 4 所示。因此各个视场的主光线在微透镜阵列的入射角 \$\alpha\$ 要满足以下要求, 如式(5)和式(6)所示

$$\alpha \leq \frac{\omega_n}{2} \tag{5}$$

目标物体的像经前置成像系统之后成像在微透镜阵列上。为了保证每个阵列透镜都能够获得清晰地目标物体的像,需对前置成像系统的视场角提出限制。取微透镜阵列的对角线长度  $h$  为基准,前置成像系统的视场角  $2\omega$  为

$$2\omega = 2\arctan\left(\frac{h}{2f'}\right) \tag{6}$$

微透镜阵列积分视场成像光谱仪系统需对二级光谱进行校正。若采用折射系统,需要复杂的光学结构进行校正。而反射系统则没有像差的产生,更有利于轻量化。

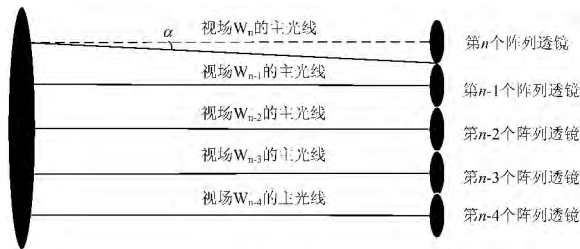


图 4 主光线偏离示意图

Fig 4 Deviation of the main light schematic diagram

影响光谱分辨率的色差、球差、像散、场曲、畸变等色差都需要严格校正。两反系统矫正像差的自由度有限。共轴三反系统有中心遮拦,影响进入系统的能量,降低光学系统的分辨能力。离轴三反系统根据离轴方式的不同,有光阑离轴和视场离轴两种类型。光阑离轴三反系统的孔径光阑放置 在主镜上,光学系统不具有对称性,因此不能获得较大的视场角。而视场离轴三反系统的孔径光阑放置 在主镜上,光学系统较对称,可设计较大的视场角,成像质量好。

综合以上分析,前置成像系统采用像方远心结构的离轴三反系统。各个视场的主光线在像面的入射角要求小于每个阵列透镜所对应的视场角的二分之一。

以微透镜阵列的对角线的长度作为视场角基准,所设计的前置成像系统的结构参数如表 1。波长范围为 400~900 nm,半视场角  $\omega$  为  $2^\circ$ ,焦距  $f'=600$  mm,入瞳直径为 120 mm,各视场主光线入射角小于  $0.011^\circ$ 。前置成像系统的入瞳位于第一片镜子前面,形成像方远心光路。主镜、次镜与三镜均采用二次非球面用以消除系统的高级像差,减少系统的镜子数量。在三镜后加一反射镜,将光路折叠形成较小系统尺寸。前置系统的结构如图 5 所示,系统的调制传递函数

表 1 前置成像系统结构参量

Table 1 Structural parameters of the front imaging system

Surface	Radius	Thickness	$-e^2$	6th order
Object surface	Infinity	310		
Primary surface	-1160.387	-300	-7.05	
Second mirror	-393.383	300	-0.92	
Third mirror	-585.766	-270	-1.61	
Image	Infinity			

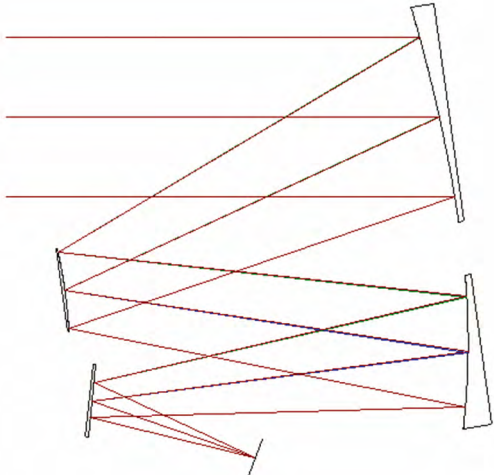


图 5 前置成像系统光学结构图

Fig 5 Optical path of the front imaging system

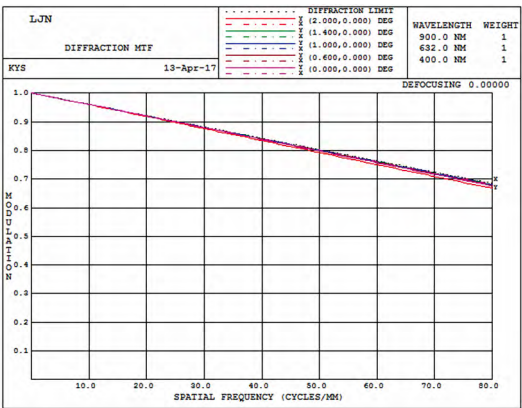


图 6 前置成像系统调制传递函数曲线

Fig 6 MTF curves of the front imaging system

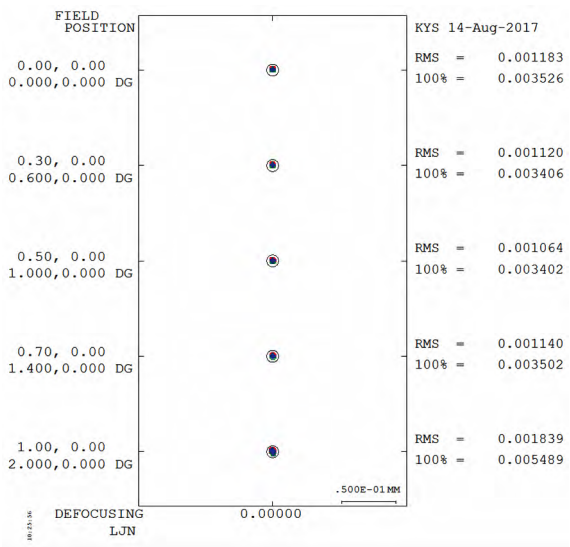


图 7 焦面上点列图

Fig 7 Spot diagram of the front imaging system

曲线如图 6 所示。由图 6 可知,系统在奈奎斯特空间频率  $60 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$  处,调制传递函数大于 0.75,成像质量接近衍射极限。系统的点列图如图 7 所示,各视场的艾里斑为最外位置的圆环。系统各视场的光斑均小于艾里斑,达到衍射极限。

### 3 结 论

提出了一种基于微透镜阵列的积分视场成像光谱仪结

构。对微透镜阵列积分视场成像光谱仪的工作原理和微孔径的产生进行分析,得出微孔径的尺寸的具体表达式。并根据微孔径的产生方式,分析了前置成像系统的各视场的主光线与像面的入射角,得到该入射角的范围以及前置成像系统的视场角范围。根据系统的工作原理对前置成像系统进行了分析与设计。设计的前置成像系统成像质量良好,各视场的 MTF 均达到衍射极限,各视场的主光线与像面的入射角均小于  $0.011^\circ$ ,满足系统要求。

### References

- [1] Timothy D Brandt, Michael W McElwain, Markus Janson, et al. Society of Photo-Optical Instrumental Engineer, 2016, 9148; 914849-1.
- [2] Mary Anne Peters, Tyler Groff, N Jeremy Kasdin, et al. Society of Photo-Optical Instrumental Engineer, 2016, 8446; 84467U-1.
- [3] Thibault. Society of Photo-Optical Instrumental Engineer, 2011, 8128; 812802-1.
- [4] Bruce A Macintosh, Andre Anthony, Jenny Atwood, Society of Photo-Optical Instrumental Engineer, 2012, 8446; 84461U-1.
- [5] Hinkley S, Oppenheimer B R, Zimmerman N, et al. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2011, 123; 74.
- [6] Peters M A, Groff T, Kasdin N J, et al. Society of Photo-Optical Instrumental Engineer, 2012, 8446; 84467U.
- [7] CHEN Wei, ZHENG Yu-quan, XUE Qing-sheng(陈伟,郑玉泉,薛庆生). Opt. Precision Eng.(光学精密工程), 2015, 23; 15.
- [8] WANG Wen-cong, LIANG Jing-qiu, LIANG Zhong-zhu, et al(王文丛,梁静秋,梁中翥,等). Acta Phys. Sin.(物理学报), 2014, 63; 100701.
- [9] WEI Wei, CUI Ji-cheng, TANG Yu-guo, et al(魏巍,崔继承,唐玉国,等). Opt. Precision Eng(光学精密工程), 2016, 24; 1015.
- [10] XUE Qing-sheng(薛庆生). Acta Optica Sinica(光学学报), 2013, 3(33); 0322001.
- [11] YAN Chang-xiang, XU Jie, PENG Yan(颜昌翔,许杰,彭岩). Opt. Precision Eng.(光学精密工程), 2010, 18; 289.

## Analysis and Design of Pre-Imaging System of Integral Field Imaging Spectrometer Based on Lenslet Array

LIU Jia-nan<sup>1,2\*</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1</sup>, YIN Lu<sup>1,2</sup>, SUN Ci<sup>1</sup>, CHEN Jian-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, LIU Jian-li<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract** As an instrument for observing astronomical spectroscopy, imaging spectroscopy plays a very important role. Due to the slit limitation of the traditional slit type imaging spectrometer, the observation of the surface source object needs to be scanned several times in order to obtain the complete three-dimensional data cube  $(x, y; \lambda)$ , which will waste a lot of observation time. In order to realize the fast scanning of the three-dimensional data cube of the target object, this paper presents a micro-lens array with no slit, static, fast and efficient visible-to-infrared band integral field imaging spectrometer structure, and analyzes its basic working principle. In order to expand the application potential of spectrometer in medicine, agriculture, geophysical prospecting and other fields, the spectral bands selected in this paper ranged from visible to near infrared. According to the working principle of field integration, the off-axis three-reverse imaging system is analyzed and designed. The system uses the field of view from the off-axis mode, the band range is  $400 \sim 900 \text{ nm}$ , relative diameter is  $F/5$ . Primary mirror, secondary mirror and three mirrors are all secondary aspherical mirrors, the second aspheric surface coefficients are  $-7.05$ ,  $-0.92$  and  $-1.61$ , respectively. In order to reduce the system volume, the mirror is placed near the focal plane of the off-axis three-reaction system. In the Nyquist space with the frequency of  $60 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ , the modulation transfer function is greater than 0.75, the image quality close to the diffraction limit. These parameters all meet the system requirements.

**Keywords** Lenslet array; Integrated field of view imaging spectrometer; Telecentric off-axis three-reflection system; Field of view off the axis

\* Corresponding author

(Received Jun. 29, 2017; accepted Nov. 18, 2017)