

## 基于 Dyson 结构的新型快照式分光成像系统光学设计

谭奋利<sup>1,2,3</sup>, 曾晨欣<sup>1,2,3</sup>, 冯安伟<sup>1,2,3</sup>, 赵世家<sup>1,2,3</sup>, 季轶群<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;<sup>2</sup>苏州大学江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;<sup>3</sup>苏州大学教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

**摘要** 快照式光谱成像系统可实时获取运动目标的光谱图像,在动态目标跟踪和识别等领域有着迫切的应用需求。快照式光谱成像系统的光谱分辨率与空间分辨率相互制约,针对现有快照式分光成像系统数值孔径小、难以同时实现高光谱分辨率和高空间分辨率的问题,提出了一种基于 Dyson 同心结构的新型快照式分光成像系统,它具有数值孔径大、成像性能优和结构紧凑等优点;视场离轴和复杂化设计可在保持光学成像性能的同时,增大机械装调空间,具有很好的工程可实施性。优化设计得到的新型快照式分光成像系统的数值孔径达到了 0.3,光谱分辨率优于 0.54 nm,空间采样点数为 112×24。这种高光谱分辨率和高空间分辨率的快照式分光成像系统可为研究对大视场内快速运动目标进行精确探测识别的快照式光谱成像系统提供重要的理论基础。

**关键词** 光学设计; 快照式分光成像系统; Dyson 同心结构; 高光谱分辨率; 高空间分辨率

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0422002

## Optical Design of Novel Snapshot Spectral Imaging System Based on Dyson Structure

Tan Fenli<sup>1,2,3</sup>, Zeng Chenxin<sup>1,2,3</sup>, Feng Anwei<sup>1,2,3</sup>, Zhao Shijia<sup>1,2,3</sup>, Ji Yiqun<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;<sup>2</sup>Jiangsu Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Modern Optical Technologies, Ministry of Education, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** Snapshot spectral imaging systems can obtain spectral images of moving targets in real time, and have urgent application requirements in the field of dynamic target tracking and recognition. The spectral and spatial resolutions of the snapshot spectral imaging system are mutually restricted. The existing snapshot spectral imaging system has a small numerical aperture, and it is difficult to achieve high spectral and spatial resolutions at the same time. This paper proposes a novel snapshot spectral imaging system based on the Dyson concentric structure. It has the advantages of large numerical aperture, excellent imaging performance, and compact structure. Meanwhile, through the off-axis of the field of view and complex design, the optical imaging performance is maintained while the space for mechanical assembly and adjustment is increased, which has good engineering feasibility. The optimized design of the novel snapshot spectral imaging system has a numerical aperture of 0.3, a spectral resolution better than 0.54 nm, and a spatial sampling point number of 112×24. This kind of high spectral and spatial resolution snapshot spectral imaging system can provide an important theoretical basis for the study of the snapshot spectral imaging system for the accurate detection and recognition of fast moving targets in a large field of view.

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-08-20; 录用日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(61405134, 61340007)、国防基础科研计划(JCKY2018414C013)、江苏省自然科学基金(BK20161512)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者: \*jiyiqun@suda.edu.cn

**Key words** optical design; snapshot spectral imaging system; Dyson concentric structure; high spectral resolution; high spatial resolution

## 1 引言

成像光谱仪作为一种新型信息获取设备<sup>[1]</sup>,可获取探测目标的空间信息和特征光谱信息,以确定探测目标的空间位置,并实现目标的光谱分析与辨别,在伪装揭露、目标侦察等军事领域和环境监测、灾害预警等民用领域都有着广泛的应用前景<sup>[2-6]</sup>。

快照式光谱成像系统可以在探测器单次积分时间内获取目标场景的空间信息和光谱信息。在对动态目标场景进行成像时,扫描型光谱成像系统会产生运动伪像,造成光谱信息混叠,难以实时获取动态目标的三维数据,而快照式光谱成像系统可实时获取动态目标的空间和光谱信息,满足对动态目标实时精准监测的应用需求<sup>[7-8]</sup>。微透镜阵列积分视场型(IFS-L)快照式光谱成像系统的成像原理简单、微透镜阵列研制技术成熟<sup>[9]</sup>,受到国内外学者的广泛关注。这一技术最初被成功应用于天文光谱观测,例如 Keck 望远镜上的 OSIRIS 光谱仪<sup>[10]</sup>、Subaru 望远镜中的 CHARIS 光谱仪<sup>[11]</sup>、TMT 望远镜中的 IRIS 光谱仪<sup>[12]</sup>。之后这一技术被广泛地应用到其他领域,如 2009 年 Bodkin 等<sup>[13]</sup>设计并研制出化学成分监测系统样机,采用针孔阵列代替微透镜阵列作为视场分割单元,牺牲系统光通量和空间分辨率以获取高的光谱分辨率;2017 年,莱斯大学的研究团队提出一种用于高光谱荧光显微镜的光谱分辨率可调成像光谱仪<sup>[14]</sup>,光谱分辨率的调节范围为 13.94~22.66 nm;2018 年,Liu 等<sup>[15]</sup>设计并搭建了国内首台用于天文光谱观测的 IFS-L 成像光谱仪原理样机,分光成像系统的数值孔径为 0.2,光谱分辨率优于 1 nm;2021 年 Yu 等<sup>[16]</sup>设计了一种用于生物医学领域的微透镜阵列快照式高光谱显微镜系统,前置显微物镜的像方数值孔径为 0.0063,分光成像系统的数值孔径为 0.21,光谱分辨率优于 0.56 nm,空间采样点数为 28×14。分光成像系统作为快照式光谱成像系统的核心组成部分之一,决定了快照式光谱成像系统的空间分辨率与光谱分辨率。

目前报道的 IFS-L 快照式分光成像系统主要有双高斯结构和离轴三反结构。双高斯结构的镜片数多,系统复杂,数值孔径一般小于 0.21。离轴三反结构无需校正色差,系统加工要求高,装调难度大。

这些快照式分光成像系统的数值孔径小,难以同时实现高的光谱分辨率和高的空间分辨率。而基于 Dyson 同心结构的分光成像系统具有光学像差校正能力强、可实现大数值孔径的高性能分光成像的优点<sup>[17]</sup>,其紧凑结构使光学元件间剩余空间小,给机械结构设计和工程实施带来一定难度,限制了该类系统的推广应用。

针对以上问题,本文基于 Dyson 同心结构,设计了一种数值孔径大、视场宽、结构合理的高分辨率快照式分光成像系统。基于一阶光学理论和几何像差特性<sup>[18-20]</sup>,首先研究了 Dyson 同心结构新型快照式分光成像系统的像差特性并通过推导得到消像散条件;然后对光谱叠级问题进行分析,确定系统一阶参数;再通过视场离轴和复杂化设计,实现合理的光学元件间剩余空间;最后,借助 ZEMAX 光学设计软件,通过建立合理的优化函数和优化设计得到了新型的 Dyson 结构快照式分光成像系统,该系统具有数值孔径达 0.3、视场为 14 mm×3 mm、光谱分辨率优于 0.54 nm 的较优的成像性能;同时,物面、像面与第一片透镜的距离大于 11 mm,物面与像面的垂轴距离大于 9 mm,这为系统工程实施提供了合理的装调空间,为研究可对大视场内快速运动目标进行精确探测识别的快照式光谱成像系统提供重要的理论基础。

## 2 设计思想

IFS-L 光学系统的光学原理图如图 1 所示,主要由前置物镜、微透镜阵列和分光成像系统组成。前置物镜用于捕获目标场景,微透镜阵列位于前置物镜的像面处并对前置物镜获取的光学像进行视场分割,微透镜阵列的焦平面处形成光瞳像阵列,光瞳像阵列位于分光成像系统的物面,经分光成像系统准直、色散和聚焦后最终成像在探测器上,从而同时

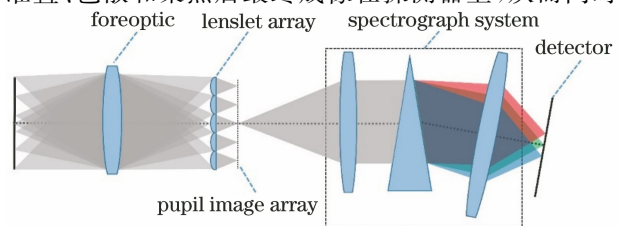


图 1 IFS-L 光学系统的光学原理图

Fig. 1 Optical schematic of IFS-L optical system

获得目标场景的空间信息和光谱信息。微透镜阵列的孔径作为系统的视场光阑,可对成像视场进行限制。

下面首先根据 IFS-L 光学系统成像原理进行分析,研究分光成像系统数值孔径的确定方法;然后通过推导 Dyson 同心结构的消像散条件,研究分光成像系统中的核心光学元件——凹面光栅的光栅常数确定方法,再根据光谱叠级问题分析,研究成像视场的确定方法,最终完成 Dyson 结构新型快照式分光成像系统一阶光学参数的确定。

## 2.1 数值孔径确定方法

为同时实现高的空间分辨率和光谱分辨率,要求成像光谱仪具有强集光能力,即大数值孔径,要求其前置物镜须具有大的像方孔径角  $u_o$ 。根据光瞳匹配原则,分光成像系统也须具备大的物方数值孔径。为此,本文开展了基于 Dyson 同心结构的大数值孔径、大视场、高分辨率的新型快照式分光成像系统研究。

根据一阶成像原理,计算得到了微透镜阵列的单元直径  $d_1$  与其光瞳像直径  $a$  的比值  $\beta$ ,该比值也等于微透镜阵列的像方孔径角  $u_1$  与  $u_o$  的比值,即

$$\beta = \frac{d_1}{a} = \frac{u_1}{u_o} \quad (1)$$

为保证相邻光瞳像之间存在足够的光谱色散空间, $a$  须小于  $d_1$ ,即  $\beta > 1$ 。此时, $u_1 > u_o$ ,要求微透镜阵列须具有更大的像方孔径角。

若选用填充率为 100%、微透镜排列方式为正方形的微透镜阵列,可计算得到 IFS-L 光学系统的光谱通道数  $N_\lambda$ ,即

$$N_\lambda = \beta^2 \quad (2)$$

为实现高光谱分辨率,须增大  $\beta$ ,即进一步增大  $u_1$ 。因此,确定数值孔径时须根据光谱分辨率设计指标确定  $\beta$ ,然后确定  $u_o$ 、 $u_1$  和分光成像系统的数值孔径。

## 2.2 光栅常数确定方法

针对现有 IFS-L 快照式分光成像系统数值孔径小、难以同时实现高光谱分辨率和高空间分辨率的问题,基于一阶光学理论和光学系统的几何像差特性,对 Dyson 同心结构进行消像散研究,并通过视场离轴和复杂化设计,解决紧凑结构带来的机械装调受限问题。图 2 给出了视场离轴量为  $h$  时的 Dyson 同心结构光路图。

图 2 中, $O_1$  为平凸透镜和凹面光栅的曲率中心, $O$  为凹面光栅顶点,物点  $S$  与像点  $I$  相对于  $Z$

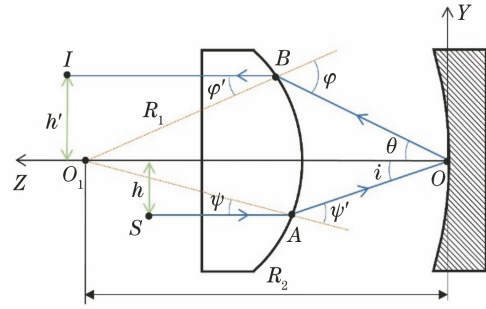


图 2 Dyson 同心结构光路图

Fig. 2 Optical layout of Dyson concentric structure

轴的距离分别为  $h$  和  $h'$ ,平凸透镜凸面的曲率半径为  $R_1$ ,凹面光栅的曲率半径为  $R_2$ ,从物点  $S$  出射的主光线入射至平凸透镜后,与平凸透镜后表面的交点为  $A$ ,入射角为  $\psi$ ,折射角为  $\psi'$ ,光栅入射角为  $i$ ,衍射角为  $\theta$ ;光线经光栅衍射后入射到平凸透镜凸面  $B$  点,该点处的入射角为  $\varphi$ ,折射角为  $\varphi'$ 。

由于光栅的引入,Dyson 同心结构在色散方向上不具备对称性,造成了严重的像散,因此像散像差的校正是需研究的重点之一。Dyson 同心结构分光成像系统满足 Rowland 成像条件时,子午像点与弧矢像点重合,像散为 0,像散像差的校正得以实现<sup>[21]</sup>。对物点  $S$  发出的光线进行光线追迹计算,由折射定律可得

$$\psi = \arcsin(h/R_1) \quad (3)$$

$$\psi' = \arcsin(nh/R_1) \quad (4)$$

$$i = \psi' - \psi \quad (5)$$

式中: $n$  为平凸透镜的折射率。将光栅入射角  $i$  代入光栅方程可得

$$\sin \theta = -\sin i + \frac{m\lambda}{d} \quad (6)$$

式中: $m$  为光栅衍射级次; $\lambda$  为工作波长; $d$  为光栅常数。由几何关系可得,在  $\triangle OO_1B$  中,满足

$$\frac{R_1}{\sin \theta} = \frac{R_2}{\sin(\pi - \varphi)} \quad (7)$$

经凹面光栅衍射后的光线再次入射至平凸透镜,由折射定律可得

$$\varphi' = \arcsin\left(\frac{\sin \varphi}{n}\right) \quad (8)$$

联立(3)~(8)式,即可获得  $R_1$  与  $R_2$  之间关系的表达式

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{\sin \varphi}{\sin \theta} = \frac{\sin(\varphi' + \theta)}{\sin \theta} = \frac{n}{\sqrt{1 - 2n \cos \theta + n^2}} \quad (9)$$

由(9)式可知,若 Dyson 同心结构新型快照式

分光成像系统的工作波段范围为  $\lambda_1 \sim \lambda_3$ , 在  $m = 1$  时, 针对  $\lambda_1$  和  $\lambda_3$  进行消像散计算, 即可得到  $d$ 。

### 2.3 成像视场确定方法

Dyson 同心结构的物面与像面同处一侧, 且快照式光谱成像系统的成像视场为面视场, 因此光谱叠级是这类系统须研究的另一个重要方面。Dyson 同心结构不同衍射级次的光路如图 3 所示, 其中视场  $y_1 = h - \Delta h$ ,  $y_2 = h + \Delta h$ ,  $\Delta h$  为色散方向的视场半宽。

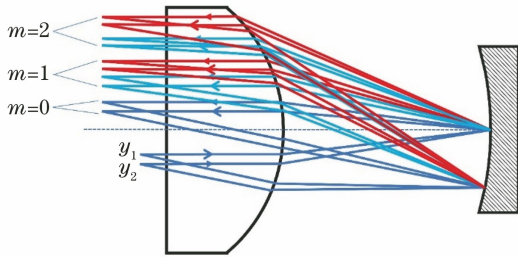


图 3 Dyson 同心结构不同衍射级次的光路图

Fig. 3 Light paths of different diffraction orders of Dyson concentric structure

首先对  $m = 1$  和  $m = 2$  的光谱叠级情况进行研究, 视场为  $y_1$ 、波长为  $\lambda_1$  的 2 级衍射像像高  $y'_1$  为

$$y'_1 = R_2 \frac{\sin i_{h-\Delta h} + \frac{2\lambda_1}{d}}{n_1} = R_2 \frac{2\lambda_1}{n_1 d} + h - \Delta h, \quad (10)$$

式中:  $n_1$  为波长为  $\lambda_1$  时平凸透镜的折射率;  $i_{h-\Delta h}$  为视场  $y_1$  进入凹面光栅的入射角。视场为  $y_2$ 、波长为  $\lambda_3$  的 1 级衍射像像高  $y'_2$  为

$$y'_2 = R_2 \frac{\sin i_{h+\Delta h} + \frac{\lambda_3}{d}}{n_3} = R_2 \frac{\lambda_3}{n_3 d} + h + \Delta h, \quad (11)$$

式中:  $n_3$  为波长为  $\lambda_3$  时平凸透镜的折射率;  $i_{h+\Delta h}$  为视场  $y_2$  进入凹面光栅的入射角。联立(10)式和(11)式可得

$$y'_1 - y'_2 = R_2 \frac{2\lambda_1}{n_1 d} - R_2 \frac{\lambda_3}{n_3 d} - 2\Delta h = R_2 \frac{\lambda_1}{n_1 d} - \Delta p - 2\Delta h, \quad (12)$$

式中:  $\Delta p$  为像面处 1 级衍射像的光谱色散宽度, 其表达式为

$$\Delta p = \frac{R_2}{d} \left( \frac{\lambda_3}{n_3} - \frac{\lambda_1}{n_1} \right). \quad (13)$$

为避免光谱叠级问题, 令  $y'_1 - y'_2 \geq 0$ , 可得

$$2\Delta h \leq R_2 \frac{\lambda_1}{n_1 d} - \Delta p. \quad (14)$$

同理, 对  $m = 1$  和  $m = 0$  的光谱叠级情况进行研究, 计算可得

$$2\Delta h \leq R_2 \frac{\lambda_1}{n_1 d}. \quad (15)$$

由(13)~(15)式可知, 当 1 级衍射像、0 级衍射像与 2 级衍射像不发生光谱叠级时, 此时其他衍射级次的衍射像均不会对 1 级衍射像造成影响, 从而解决了光谱叠级问题。色散方向视场宽度  $2\Delta h$  与色散宽度  $\Delta p$  存在一定的制约关系, 若已知色散宽度  $\Delta p$ , 可以确定视场宽度范围。综上, 即可确定 Dyson 结构新型快照式分光成像系的一阶参数和初始结构。

## 3 光学系统设计及像质评价

### 3.1 分光成像系统优化设计及像质评价

根据上述理论研究确定新型快照式分光成像系统的一阶参数和初始结构, 为提高新型 Dyson 同心结构的像差校正能力, 在平凸透镜和凹面光栅之间增加两片球面弯月透镜, 对玻璃材料进行合理选择, 以增加设计自由度, 实现对像差的平衡。本文借助 ZEMAX 光学设计软件<sup>[22-23]</sup>, 优化设计了基于 Dyson 同心结构的新型快照式分光成像系统, 其数值孔径达到 0.3, 视场为  $14 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 工作波段为  $450 \sim 650 \text{ nm}$ , 光谱色散宽度为  $2.66 \text{ mm}$ , 光路结构如图 4 所示, 由三片球面透镜和一个凹面光栅组成, 光阑位于凹面光栅上。

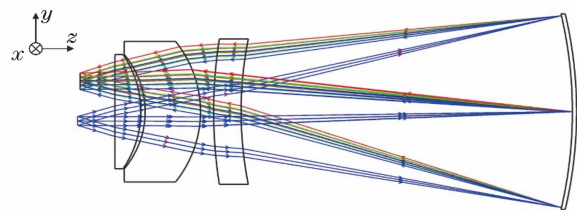


图 4 基于 Dyson 同心结构的新型快照式分光成像系统光路结构图

Fig. 4 Optical layout of novel snapshot spectral imaging system based on Dyson concentric structure

对优化得到的新型快照式分光成像系统进行成像性能评价, 像面光线追迹点列图如图 5 所示, 各个视场的聚焦光斑均方根 (RMS) 半径均小于  $1.23 \mu\text{m}$ , 接近衍射极限, 各种几何像差得到了平衡。光学调制传递函数 (MTF) 曲线如图 6 所示, 在奈奎斯特频率为  $83 \text{ lp/mm}$  处, 光学 MTF 均高于 0.8, 此时的成像质量好。

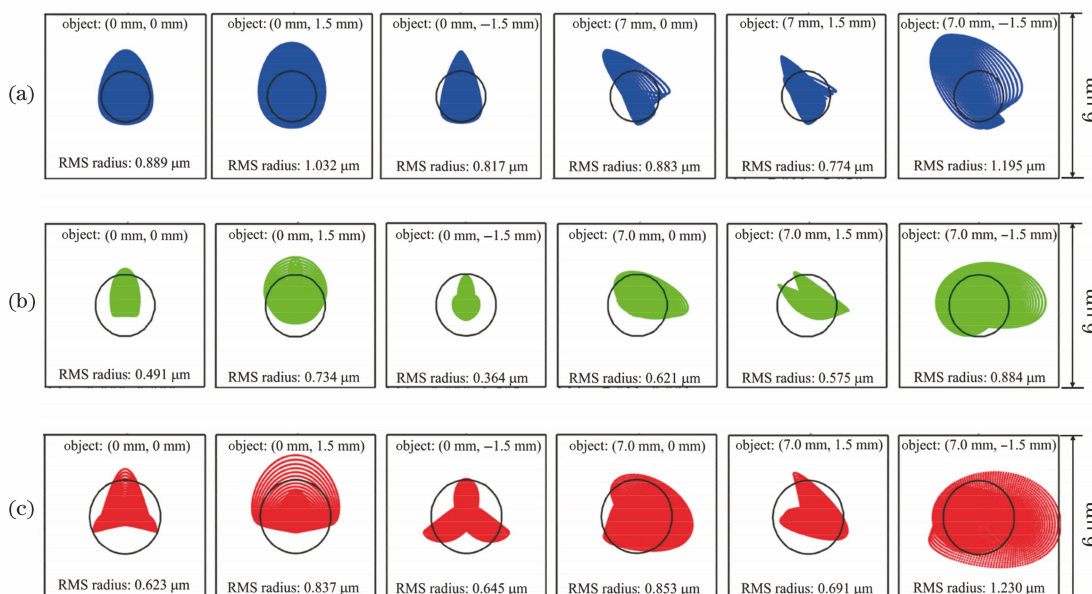


图 5 不同波长的光线追迹点列图。(a) 450 nm;(b) 550 nm;(c) 650 nm

Fig. 5 Spot diagrams of different wavelengths. (a) 450 nm; (b) 550 nm; (c) 650 nm

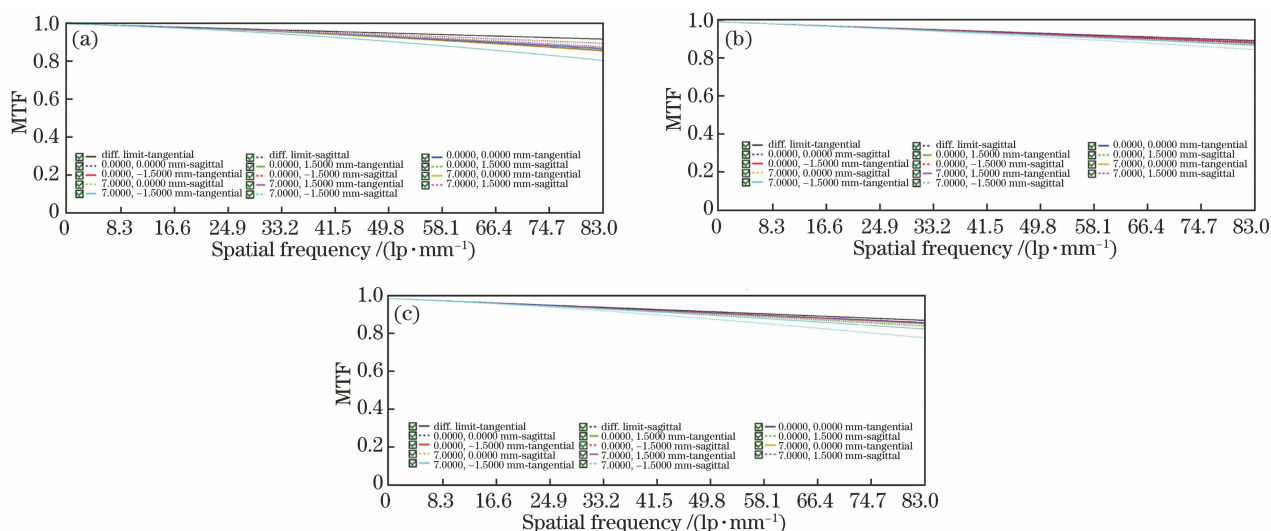


图 6 不同波长的光学 MTF 曲线。(a) 450 nm;(b) 550 nm;(c) 650 nm

Fig. 6 Optical MTF curves of different wavelengths. (a) 450 nm; (b) 550 nm; (c) 650 nm

对优化得到的新型快照式分光成像系统的剩余像散和畸变进行评价,像散曲线如图 7 所示,像散绝对值小于  $4 \mu\text{m}$ ,表明像散像差得到了很好的校正。Smile 畸变曲线以及 Keystone 畸变曲线分别如图 8、9 所示。由图 8 可知,Smile 畸变小于  $0.8 \mu\text{m}$ ;由图 9 可知,Keystone 畸变小于  $0.4 \mu\text{m}$ 。这表明两种畸变得到了很好的校正,验证了上述理论研究的正确性。另外,通过视场离轴和复杂化设计,系统物面、像面与第一片透镜的距离大于 11 mm,物面与像面垂轴的距离大于 9 mm,这为系统工程实施提供了合理的装调空间,具有很好

的工程可实施性。

### 3.2 新型 IFS-L 光学系统优化设计及光谱分辨率评价

对优化得到的新型快照式分光成像系统进行光谱分辨率评价,根据第 2.1 节理论研究,确定前置物镜与微透镜阵列一阶参数,前置物镜像方数值孔径为 0.0125,微透镜阵列像方数值孔径为 0.266,微透镜单元直径  $d_1$  为  $125 \mu\text{m}$ ,再对通过前置物镜、微透镜阵列设计得到的新型快照式分光成像系统进行联合优化设计,得到新型 IFS-L 光学系统光路,如图 10 所示。

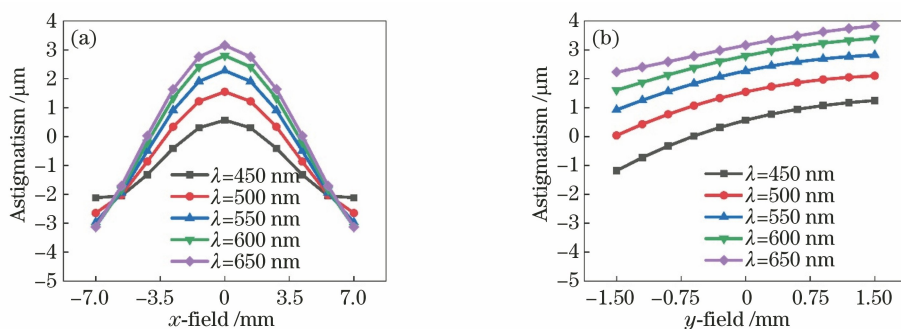


图 7 像散曲线。(a)  $x$  视场;(b)  $y$  视场

Fig. 7 Astigmatism curves. (a)  $x$ -field; (b)  $y$ -field

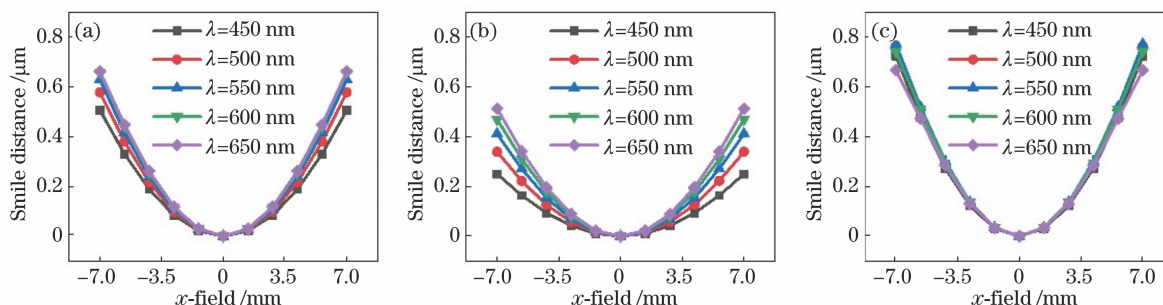


图 8 Smile 畸变曲线。(a)  $y=0$  mm;(b)  $y=1.5$  mm;(c)  $y=-1.5$  mm

Fig. 8 Smile distortion curves. (a)  $y=0$  mm; (b)  $y=1.5$  mm; (c)  $y=-1.5$  mm

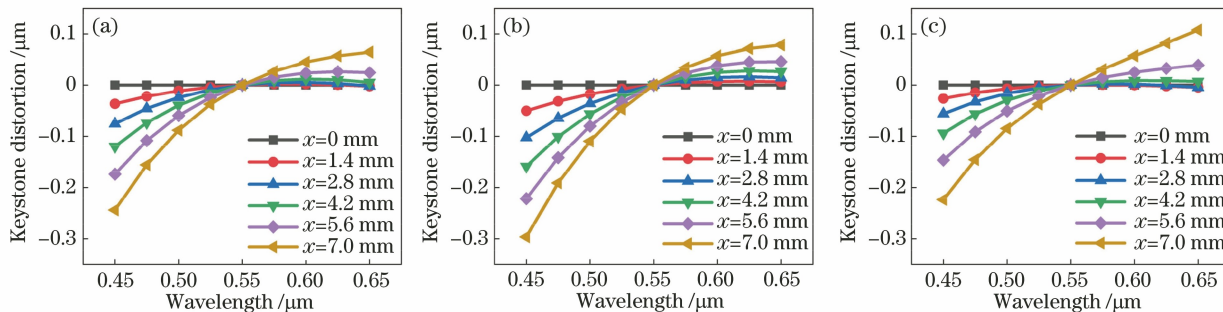


图 9 Keystone 畸变曲线。(a)  $y=0$  mm;(b)  $y=1.5$  mm;(c)  $y=-1.5$  mm

Fig. 9 Keystone distortion curves. (a)  $y=0$  mm; (b)  $y=1.5$  mm; (c)  $y=-1.5$  mm

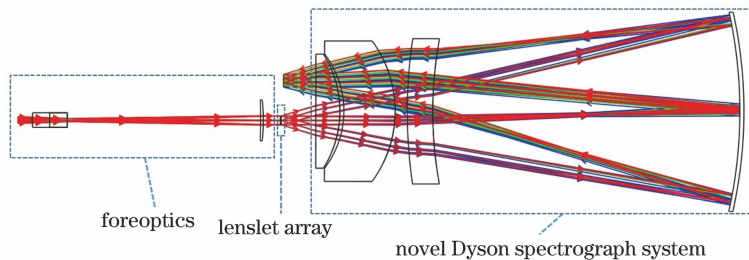


图 10 新型 IFS-L 光学系统光路结构图

Fig. 10 Optical layout of novel IFS-L optical system

对联合优化后的新型 IFS-L 光学系统进行光谱分辨率评价,像面光瞳像点列图如图 11 所示,光谱分辨率优于 0.54 nm,新型 IFS-L 光学系统的空间采样点数为  $112 \times 24$ 。综上所述,本文优化设计得

到的新型快照式分光成像光学系统具有数值孔径大、视场宽、结构合理和高分辨率的优点,这验证了上述理论的正确性,为实时获取动态目标高空间和高光谱分辨率图像提供理论基础。

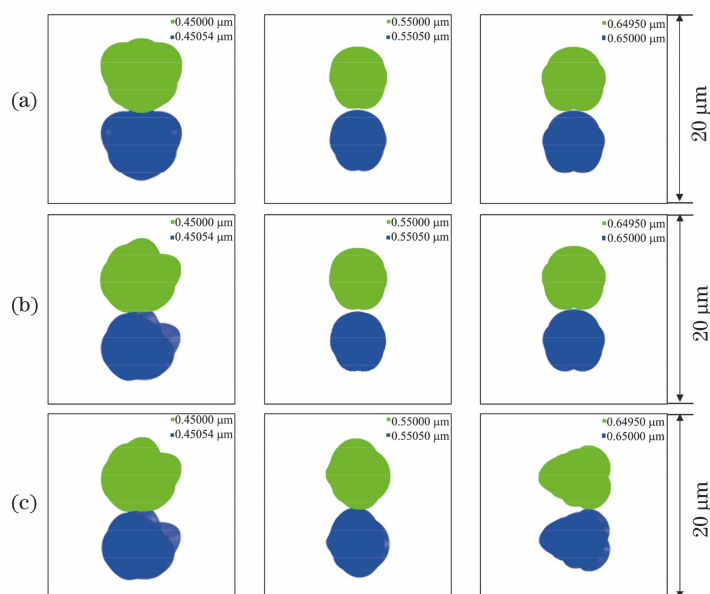


图 11 光瞳像点列图。(a)目标: (0 mm, 0 mm);(b)目标: (7.0 mm, 0 mm);(c)目标: (7.0 mm, -1.5 mm)

Fig. 11 Spot diagrams of pupil image. (a) Object: (0 mm, 0 mm); (b) object: (7.0 mm, 0 mm); (c) object: (7.0 mm, -1.5 mm)

## 4 结 论

针对快照式光谱成像系统在动态目标跟踪和识别等领域迫切的应用需求,基于一阶光学理论和几何像差特性,研究了具有大数值孔径、宽视场、结构合理和高分辨率优点的 Dyson 同心结构新型快照式分光成像系统;通过对光学系统进行视场离轴和复杂化设计,增大了光学元件间合理的剩余空间,该设计具有很好的工程可实施性;通过优化设计得到的新型快照式分光成像光学系统的数值孔径达到 0.3,视场为 14 mm × 3 mm,光谱分辨率优于 0.54 nm,空间采样点数为 112 × 24。这种高光谱和高空间分辨率的快照式分光成像光学系统可为研究对大视场内快速运动目标进行精确探测识别的快照式光谱成像系统提供重要的理论基础。

### 参 考 文 献

- [1] Hagen N A, Kudenov M W. Review of snapshot spectral imaging technologies [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 090901.
- [2] Chrisp M P, Lockwood R B, Smith M A, et al. Development of a compact imaging spectrometer form for the solar reflective spectral region [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(32): 10007-10017.
- [3] Yu L, Chen J X, Xue H, et al. Hyper-spectral imaging sensor in UV-VIS-NIR region in air for coastal ocean observation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2363-2370.
- [4] Luo G Y, Wang B D, Chen Y Q, et al. Design of visible near infrared imaging spectrometer on unmanned aerial vehicle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 0930001.  
罗刚银, 王弼陡, 陈玉琦, 等. 可见近红外波段无人机载成像光谱仪设计 [J]. *光子学报*, 2017, 46(9): 0930001.
- [5] Song W B, Jin Y M, Zhao Z C, et al. Analysis and optical design of very high spectral resolution imaging spectrometer of the atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0722001.  
宋文宝, 靳阳明, 赵知诚, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 甚高光谱分辨率成像光谱仪分析与光学设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0722001.
- [6] Mishra P, Asaari M S M, Herrero-Langreo A, et al. Close range hyperspectral imaging of plants: a review [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 164: 49-67.
- [7] Liu B, Liu Y, Li C, et al. Design of optical system for miniature visible/near-infrared real-time imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0630002.  
刘兵, 刘英, 李灿, 等. 轻小型可见/近红外实时成像光谱仪的光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0630002.
- [8] Gao L, Wang L V. A review of snapshot multidimensional optical imaging: measuring photon tags in parallel [J]. *Physics Reports*, 2016, 616: 1-

- 37.
- [9] Yang X, Sun H L, Yue D M, et al. Research progress of femtosecond laser fabrication of microlens array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 050005.  
杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 050005.
- [10] Larkin J, Barczys M, Krabbe A, et al. OSIRIS: a diffraction limited integral field spectrograph for Keck [J]. *New Astronomy Reviews*, 2006, 50(4/5): 362-364.
- [11] Peters-Limbach M A, Groff T D, Kasdin N J, et al. The optical design of CHARIS: an exoplanet IFS for the Subaru telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8864: 88641N.
- [12] Larkin J E, Moore A M, Barton E J, et al. The Infrared Imaging Spectrograph (IRIS) for TMT: instrument overview[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9908: 99081W.
- [13] Bodkin A, Sheinis A, Norton A, et al. Snapshot hyperspectral imaging: the hyperpixel array camera [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7334: 73340H.
- [14] Dwight J G, Tkaczyk T S. Lenslet array tunable snapshot imaging spectrometer (LATIS) for hyperspectral fluorescence microscopy [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(3): 1950-1964.
- [15] Liu J N, Chen J J, Liu J L, et al. Optical design of a prism-grating-based lenslet array integral field spectrometer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19456-19469.
- [16] Yu C B, Yang J, Song N, et al. Microlens array snapshot hyperspectral microscopy system for the biomedical domain [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(7): 1896-1902.
- [17] 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.
- [18] Wang W S. *Applied optics*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010: 293-298.  
王文生. *应用光学*[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 293-298.
- [19] Yu D Y, Tan H Y. *Engineering optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.  
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [20] Zhang Y M. *Applied optics*[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2015: 170-230.  
张以谟. *应用光学*[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 170-230.
- [21] Lobb D R. Theory of concentric designs for grating spectrometers[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(13): 2648-2658.
- [22] Yuan X C. *Optical design*[M]. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 1988: 20-55.  
袁旭沧. *光学设计*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 20-55.
- [23] Mao W W. *Modern optical lens design methods and examples*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017: 2-57.  
毛文炜. *现代光学镜头设计方法与实例*[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 2-57.