

激光与光电子学进展

超轻小宽视场高分辨无人机机载相机光学系统设计

曾晨欣^{1,2,3}, 李加慧^{1,2,3}, 谭奋利^{1,2,3}, 季轶群^{1,2,3*}¹苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;²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;³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 针对无人机光学载荷宽视场、高分辨、轻小型、实时成像等需求,基于级联光学结构设计了一种折叠式级联相机光学系统。该光学系统主要由前置折叠同心物镜和中继转像透镜阵列组成。前置折叠同心物镜获取宽视场中间像,位于前置折叠同心物镜的同心球面上。中继转像透镜阵列对同心球面上的宽视场中间像进行视场细分、剩余像差精细校正和中继成像。优化设计得到了全视场角为 109.6° 、瞬时视场为 $7.8''$ 、筒长仅为 107 mm 的折叠式级联结构相机光学系统。在全视场范围内,像面上各处光线追迹点列图的均方根半径均小于 $1.1\ \mu\text{m}$,在空间频率 230 lp/mm 处,各视场调制传递函数值大于 0.4 ,系统成像质量接近衍射极限。这种折叠式级联结构无人机机载相机光学系统视场大、分辨率高、结构紧凑,可用于无人机遥感领域,在大视场范围内获得高分辨率光学像的同时,还可实现光学系统的小型化和轻量化,具有广阔的应用前景。

关键词 光学设计; 折叠式级联光学系统; 无人机机载; 宽视场; 高分辨率; 轻小型

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220743

Optical Design of an Airborne Light Weight Camera with Wide Field of View and High Resolution

Zeng Chenxin^{1,2,3}, Li Jiahui^{1,2,3}, Tan Fenli^{1,2,3}, Ji Yiqun^{1,2,3*}¹School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;²Jiangsu Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;³Key Laboratory of Modern Optical Technologies, Ministry of Education, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract For the demands of light weight and small size, wide field of view (FOV), high resolution, and real-time imaging of the unmanned aerial vehicle (UAV) optical payload, we designed an optical system suitable for the UAV camera using a folding cascade optical structure. The basic components of this system are a front monocentric folding objective and a relay imager. The front monocentric folding objective captures a spherical intermediate image with a wide FOV that is located in the monocentric sphere of the front monocentric folding objective. The relay imager array completes field subdivision, fine correction of residual aberration, and a high resolution relay image on the spherical intermediate image. After optimization, we obtained a folding cascade optical camera system with a full FOV angle of 109.6° , an instantaneous FOV of $7.8''$, and a tube length of only 107 mm . In the full FOV, the root mean square radii of ray tracing points on the image plane are all less than $1.1\ \mu\text{m}$. At the spatial frequency of 230 lp/mm , the values of the modulation transfer function are greater than 0.4 , and the image quality of the system is close to the diffraction limit. The folding cascade structure UAV airborne camera optical system has a wide FOV, high resolution and compact structure, and can be used in the field of UAV remote sensing. While obtaining a high resolution optical image in a wide FOV, it can also realize the miniaturization and weight reduction of the optical system, which has broad application prospects.

Key words optical design; folding cascade optical structure; unmanned aerial vehicle payload; wide field of view; high resolution; light weight

收稿日期: 2022-01-15; 修回日期: 2022-02-19; 录用日期: 2022-03-03; 网络首发日期: 2022-03-13

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

1 引言

无人机遥感因其机动、快速、经济等优势,已广泛应用到了科研和民用的诸多领域。近年来,随着无人机航拍技术在各领域的不断深化,人们对无人机的有效载荷的要求越来越严格,光学系统在满足宽视场、高分辨实时成像的同时,还需具有结构紧凑、重量轻、体积小等特点^[1-6]。

传统的单孔径光学系统很难同时兼顾宽视场和高分辨光学性能,更无法进一步同时实现轻小结构。如全景鱼镜头虽能实现宽视场成像,但获取的光学像几何畸变大、分辨率低^[7]。机械推扫型成像系统通常采用小视场的高分辨系统,通过逐帧扫描来扩大系统的拍摄范围,从而实现宽视场和高分辨成像,这种成像方式实时性差、机械结构复杂,难以满足无人机载荷实时精确捕捉动态信息和小型化、轻量化的需求^[8-11]。

2009年,杜克大学Brady等^[12-13]提出了基于级联结构的光学系统成像思想,这种结构主要由前置同心物镜和中继转像透镜阵列组成,前置同心物镜用于获取宽视场高分辨率的球面中间像,再由中继转像透镜阵列对球面中间像进行视场细分和剩余像差校正。2014年,Marks等^[14]报道的AWARE-10相机光学系统即采用此级联结构的成像思想,视场(FOV)达到100°,瞬时视场为5",筒长约为286 mm,实现了宽视场和实时高分辨成像。2017年,Pang等^[15]提出一种不含实际中间像面的伽利略型级联光学结构,该相机光学系统能有效缩短筒长并减轻重量,但在全视场范围存在多个均匀分布的盲区,需至少三个相同的相机光学系统同时拍摄以互补盲区,体积大、结构复杂。2019年,Schuster等^[16]基于级联光学结构设计了级联光场相机光学系统,该系统使用微透镜阵列作为中继转像透镜阵列从而有效缩短筒长,但在视场细分后各子图像边缘处出现视场缺失的情况,影响相邻子图像间的拼接。2021年,李江勇等^[17]报道了基于级联成像结构设计的一款机载广域高分辨率成像系统,完成了机载稳定性分析,该系统在机载飞行时能完成120°视场范围内实时成像,筒长约为300 mm。同年,李加慧等^[18]针对低空、中空和高空对地观测,设计并报道了基于同心级联成像思想的宽覆盖高分辨机载相机光学系统,瞬时视场为7.9",筒长仅为245 mm,通过微调前置同心物镜与中继转像透镜阵列的距离,该系统在不同飞行高度均能实现高达132°的宽视场高分辨实时成像。

针对现有级联系统体积较大、难以满足无人机有效载荷重量与体积小要求的问题,本文基于级联成像系统,提出折叠式级联光学结构的设计思想,在保证级联成像系统宽视场和高分辨的同时,实现系统的轻小型化,为无人机高性能和轻小型有效载荷提供技术基础。

折叠式级联光学结构主要由前置折叠同心物镜和中继转像透镜阵列组成。首先,基于像差理论开展前置折叠同心物镜的初始结构确定和优化设计方法研究,优化设计得到了宽视场的折叠同心物镜。然后,通过分析中继转像透镜阵列的成像特点,优化设计了低畸变、平像场的中继转像透镜阵列。最后,根据光瞳匹配原则,将折叠同心物镜与中继转像透镜阵列进行联合优化设计,通过构建级联系统简化模型优化折叠同心物镜与中继转像透镜阵列的位置关系,得到了焦距为53 mm、 F 数为3.0、视场角为110°、瞬时视场为7.8"、筒长仅为107 mm的宽视场、高分辨、超轻小的折叠级联结构无人机机载相机光学系统(以下简称折叠级联光学系统),在无人机航拍领域有重要应用价值。

2 宽视场折叠同心物镜的光学设计

折叠同心物镜是一个半球型双胶合透镜组,其结构如图1(a)所示,透镜组所有球面表面共曲率中心,后表面为平面且紧贴平面反射镜(第一平面反射镜)。该结构具有共光路、轻小的特点,成像光线从前表面入射,经第一平面反射镜反射后再由前表面出射并成像。如图1(b)所示,由于这种结构具有同心的特点,所有通过半球球心的直线均可以视为系统的光轴,因此能获得宽视场范围内像差分布均匀的球面像。

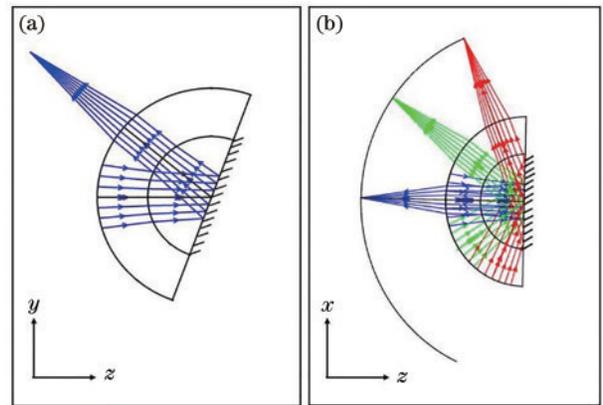


图1 折叠同心物镜光路结构图。(a)侧视图;(b)俯视图
Fig. 1 Structure of optical layout of folding monocentric objective. (a) Side view; (b) top view

折叠同心物镜的初始结构为同心对称的球形透镜^[19]。双层同心球形透镜示意图如图2所示,由一阶理论得到双层同心球形透镜的焦距^[20]为

$$f = \frac{n_1 r_1}{2(n_1 - 1) + \frac{n_1 r_1}{r_2} \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right)}, \quad (1)$$

式中: r_1 和 n_1 分别为外层材料的曲率半径与折射率; r_2 和 n_2 分别为内层材料的曲率半径和折射率。由于球面中间像的剩余球差可以很好地被中继转像透镜阵列二次成像时校正,因此在设计双层同心球形透镜时,优

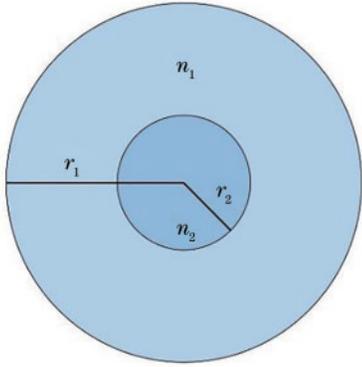


图 2 双层同心球形透镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double monocentric ball lens

先平衡色差。双层同心球形透镜的消色差条件公式^[20]为

$$\frac{n_2 - 1}{n_2^2 v_2} \frac{1}{r_2} = \frac{n_1 - 1}{n_1^2 v_1} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right), \quad (2)$$

式中： v_1 和 v_2 分别为外层材料和内层材料的阿贝数。

选用成都光明 ZLAF3、H-FK61 玻璃分别作为球形透镜外层材料与内层材料,结合式(1)、(2),计算得到初始结构参数 r_1 、 r_2 。设定物距为无穷远,基于初始结构参数并借助 ZEMAX 光学设计软件优化设计了焦距为 107 mm、相对孔径 F 数为 4、视场角为 140° 的双层

同心球形透镜系统。优化后系统外层透镜曲率半径 $r_1=51.629$ mm,内层透镜曲率半径 $r_2=28.805$ mm,其光路结构如图 3 所示,像面光线追迹点列图如图 4 所示。在优化设计同心球型透镜时孔径光阑被置于球镜中心处,各视场处存在照度不均匀的问题,因此,折叠级联系统的孔径光阑将被置于中继转像阵列中,以避免出现不同视场照度不均匀的问题。

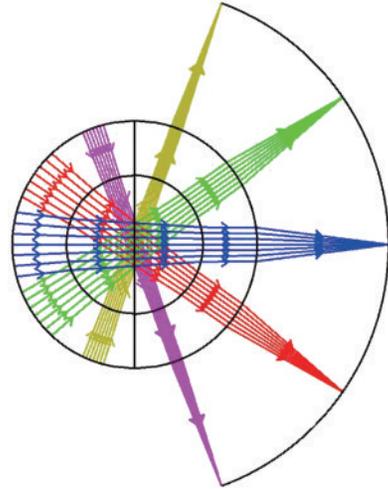
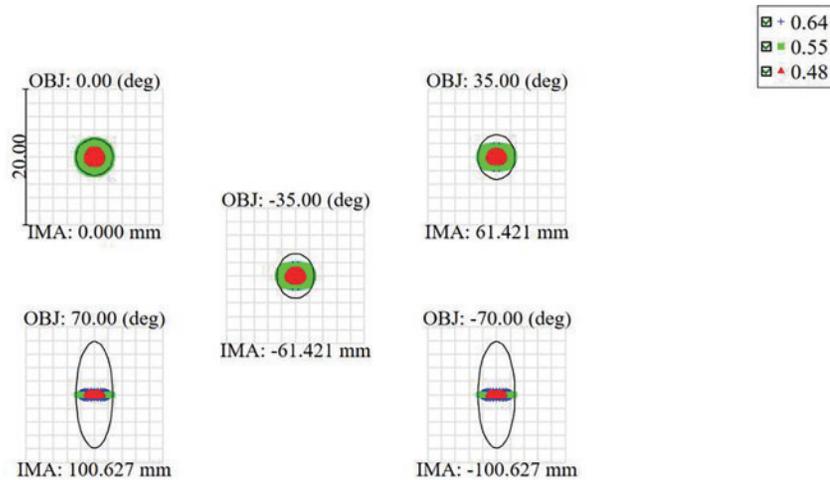


图 3 同心球形透镜光路示意图

Fig. 3 Optical layout of monocentric ball lens



Surface: IMA

Unit are μm . Airy Radius: 2.682 μm . Legend items refer to wavelengths

Field	0(deg)	35.00(deg)	-35.00(deg)	70(deg)	-70(deg)
RMS radius:	1.343	1.208	1.208	1.179	1.179
GEO radius:	2.672	2.669	2.669	2.669	2.669
Scale bar	20				
Reference	:Centroid				

图 4 同心球形透镜像面光线追迹点列图

Fig. 4 Spot diagram of monocentric ball lens

基于同心球形透镜旋转对称的特点,在优化设计后的同心球形透镜孔径光阑所在平面处引入第一平面反射镜折转光轴,得到折叠同心物镜,其保留同心球形透镜获取宽视场球面像特点的同时,减小了质量与体

积。为了进一步减小折叠级联光学系统的体积,在折叠同心物镜与球面中间像之间引入第二片平面反射镜(第二平面反射镜)折转光轴得到二次折叠后的折叠同心物镜,其模型如图 5 所示。第二平面反射镜的位置

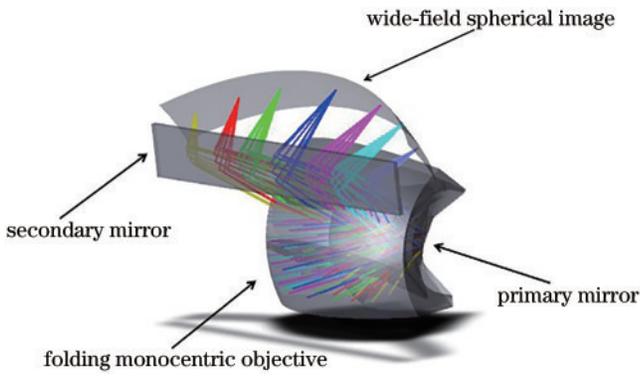


图 5 折叠同心物镜模型图

Fig. 5 Model diagram of folding monocentric objective

影响折叠级联光学系统的视场范围,其具体位置将基于中继转像透镜阵列设计结果,在折叠级联光学系统联合优化后得到。

3 中继转像透镜阵列的光学设计

中继转像透镜阵列工作原理如图 6 所示。中继转像透镜阵列由多个中继转像透镜子系统组成,且各中继转像透镜子系统的光轴均交于球面中间像的球心处。中继转像透镜阵列对折叠同心物镜获取的宽视场球面中间像进行视场细分、剩余像差校正并中继成像,得到高分辨的子图像,再经图像拼接后获得宽视场的高分辨图像。每个中继转像透镜子系统所需校正的剩余像差相同,故使用相同的中继转像透镜子系统组成阵列。

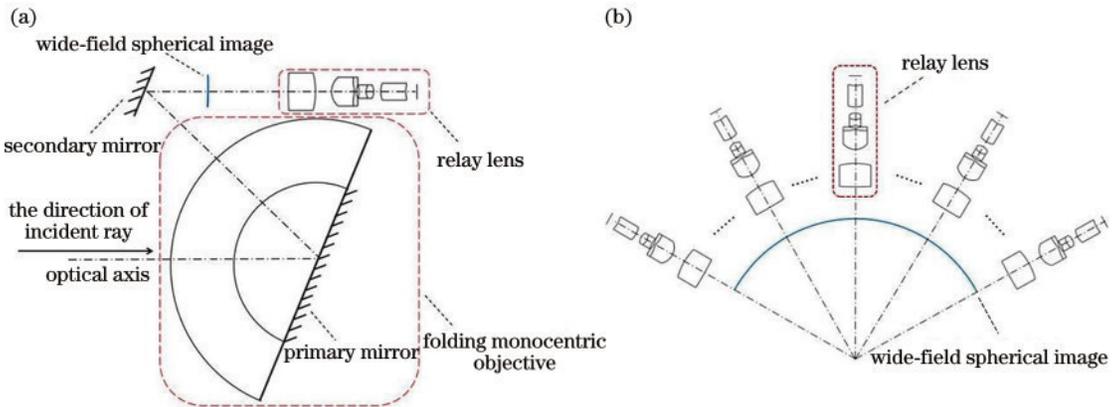


图 6 中继转像透镜阵列成像原理。(a)折叠级联光学系统单通道侧视图;(b)中继转像透镜阵列示意图

Fig. 6 Imaging principle of relay lens array. (a) Side view of single channel of folding cascade optical system; (b) schematic diagram of relay lens array

如图 7 所示,球面物 O_1 的球心为透镜中心 O ,由一阶成像理论可知,对应像面 I_1 为与 O_1 同心的球面。由于系统的轴向放大率为正,且平面物 O_2 与球面物 O_3 相对于球面物 O_1 均向左偏移,因此,像 I_2 、 I_3 向左弯曲的程度比 I_1 更严重。严重的场曲不仅会造成边缘视场成像模糊,还会引入畸变,场曲和畸变会给予图像的配准、拼接带来困难。折叠级联光学系统中的球面中间像类似于图 7 中球面物 O_3 ,因此,所设计的中继转像透镜子系统必须同时平衡场曲和畸变。

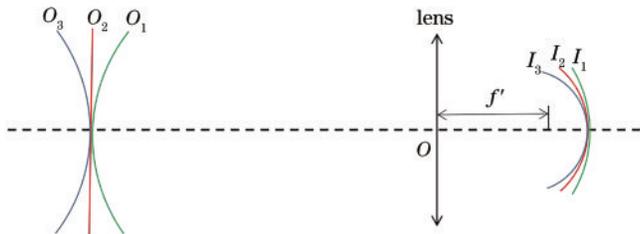


图 7 球面物近轴成像示意图

Fig. 7 Schematic diagram of paraxial imaging of spherical object

根据子图像拼接要求,中继转像透镜子系统获得的光学像的畸变需小于 0.1%,针对平衡场曲与畸变的设计需求,选用 Petzval 结构^[21]作为中继转像透镜子系

统的初始结构。为了平衡中间球面像剩余球差以及中继转像透镜子系统中存在的彗差等像差,在中继转像透镜子系统中引入非球面。然后,建立合理的优化函数^[22]进行优化设计,经多次优化后得到如图 8 所示的设计结果。该中继转像透镜子系统由 4 组共 6 片透镜组成,其中有 2 组双胶合透镜组,光阑位于第 4 片透镜与第 5 片透镜间胶合面上,共引入 2 个非球面表面,其中在光阑面引入非球面平衡球差,在第 3 片透镜后表面引入非球面同时平衡球差与彗差。该系统物方数值孔径为 0.08,像方焦距为 14.722 mm,物高为 5.233 mm,垂轴放大率为 0.496。图 8 为中继转像透镜子系统光路结构图,其中*所标注的表面为非球面。图 9 为中继转像透镜子系统像面相对照度曲线图,参考波长为 550 nm,可以看出,中继系统全视场范围内照度分布均匀。

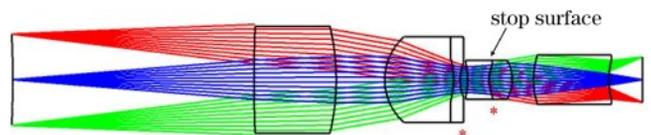


图 8 中继转像透镜子系统光路结构图

Fig. 8 Subsystem optical path structure diagram of relay imager

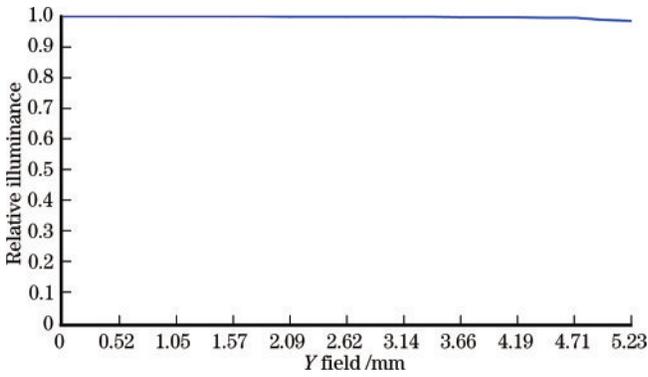


图 9 中继转像透镜子系统像面相对照度曲线图
Fig. 9 Relative illuminance curve of relay imager

4 折叠级联光学系统联合优化设计

由于孔径光阑置于中继转像透镜子系统中,成像光线在折叠同心物镜中不再具有对称性,球面中间像上存在局部轴外像差^[23],必须对折叠同心物镜和中继转像透镜进行进一步的联合优化设计。然后,建立合适的评价函数经优化设计后得到焦距为 53 mm、光学视场角为 5.6°、*F* 数为 3.0 的单通道折叠级联光学系统,其结构如图 10 所示。图 10 中,α 为第一平面反射镜与光轴的夹角, *d* 为第一平面反射镜与

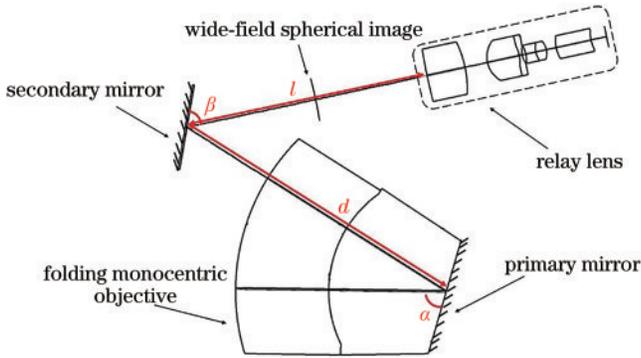
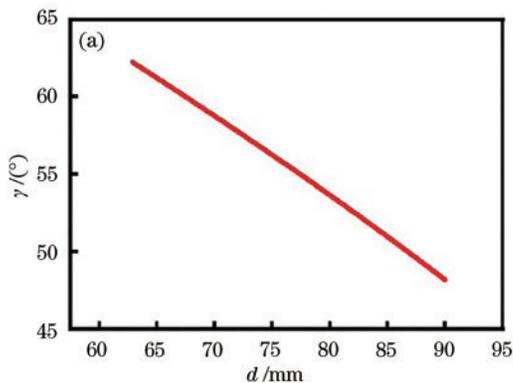


图 10 单通道折叠级联光学系统结构图
Fig. 10 Structure diagram of single channel of folding cascade optical system



第二平面反射镜的距离,β为第二平面反射镜与光轴的夹角, *l* 为第二平面反射镜与中继转像透镜的距离。

将第二平面反射镜对光轴的折叠还原后,得到如图 11 所示的折叠级联光学系统简化模型。在简化模型中,各通道子系统的光轴均交于一级平面反射镜中心处,当边缘通道接触第二平面反射镜时,其光轴与中心通道光轴的夹角 γ 即为折叠级联光学系统最大半视场。由几何关系知,此时折叠级联光学系统半视场 γ 满足如下关系:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{d}{l+d}\right) \quad (3)$$

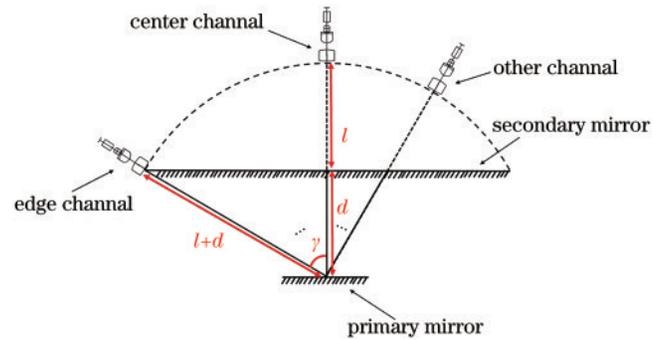


图 11 折叠级联光学系统简化模型图
Fig. 11 Simplified model diagram of folding cascade optical system

如图 12 所示, *d* 与折叠级联光学系统半视场 γ、系统总长均呈负相关关系。针对折叠级联光学系统体积小、宽视场覆盖等要求,优化距离 *d*、夹角 α、夹角 β,使得系统体积与视场范围间得到较好平衡。经联合优化后折叠级联光学系统单通道成像光路结构图如图 13 所示,系统筒长为 107 mm。

对联合优化设计得到的折叠级联光学系统进行像质评价,得到像面光线追迹点列图如图 14 所示,可以看出,聚焦光斑的均方根半径均小于 1.1 μm,选取探测器的像元尺寸为 2 μm,则系统的瞬时视场为

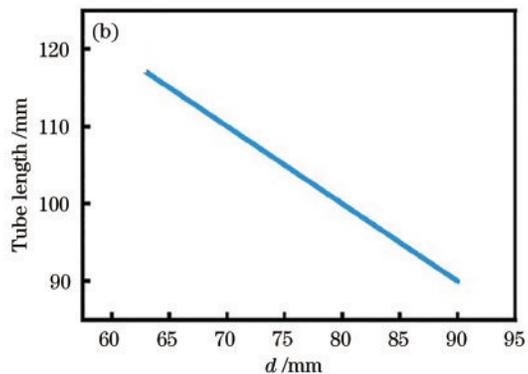


图 12 *d* 与折叠级联光学系统部分参数的关系。(a) *d* 与视场角的关系; (b) *d* 与筒长的关系
Fig. 12 Relationship between *d* and folding cascade optical system parameters. (a) Relationship between *d* and FOV; (b) relationship between *d* and tube length

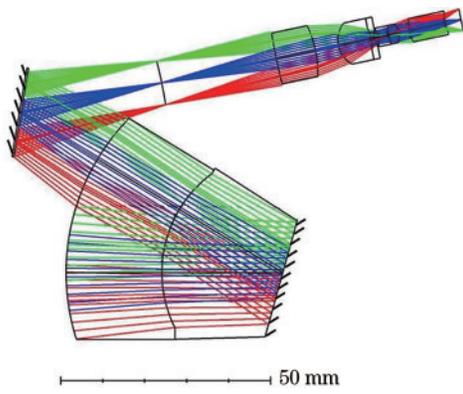


图 13 折叠级联光学系统单通道成像光路结构图

Fig. 13 Optical layout of single channel of folding cascade optical system

7.8”。调制传递函数(MTF)曲线如图 15 所示,在空间频率 230 mm/lp 处,全视场 MTF 值大于 0.4。场曲与畸变曲线如图 16 所示,可以看出,场曲小于 0.045 mm,畸变小于 0.1%。各像质评价指标表明,该系统中各种几何像差均得到较好平衡,成像性能接近衍射极限,满足高分辨成像需求与图像配准、拼接需求。

折叠级联光学系统多通道成像光模拟图如图 17 所示,为满足图像配准、拼接需求^[24-25],相邻中继转像透镜子系统之间应具有一定的视场重叠^[20],按照宽视场成像范围要求,设计共 21 个成像通道实现 109.6°宽视场覆盖,视场重叠比例为 14.3%。具体的视场相关参数如表 1 所示。

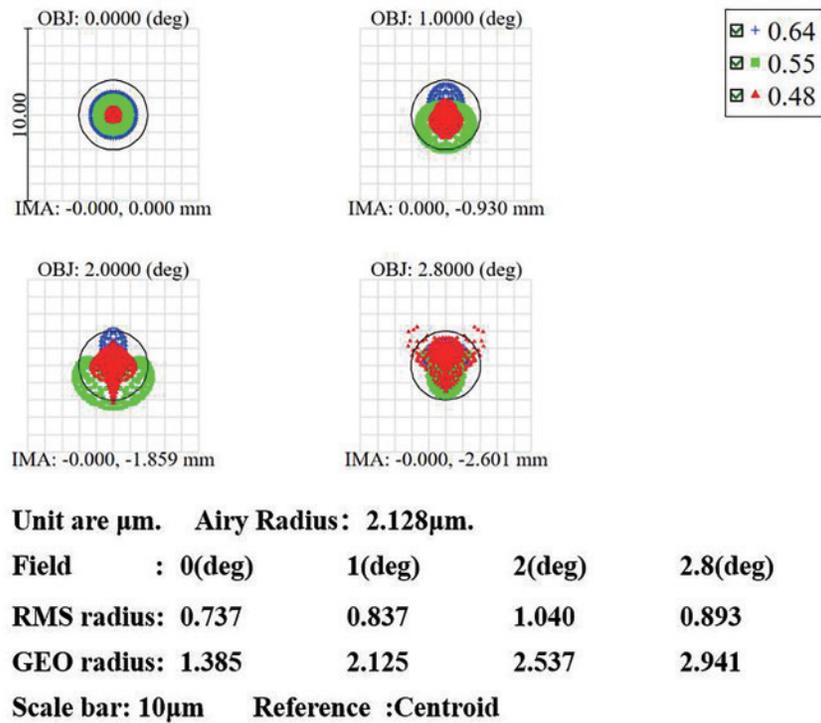


图 14 折叠级联光学系统像面光线追迹点列图

Fig. 14 Spot diagram of folding cascade optical system

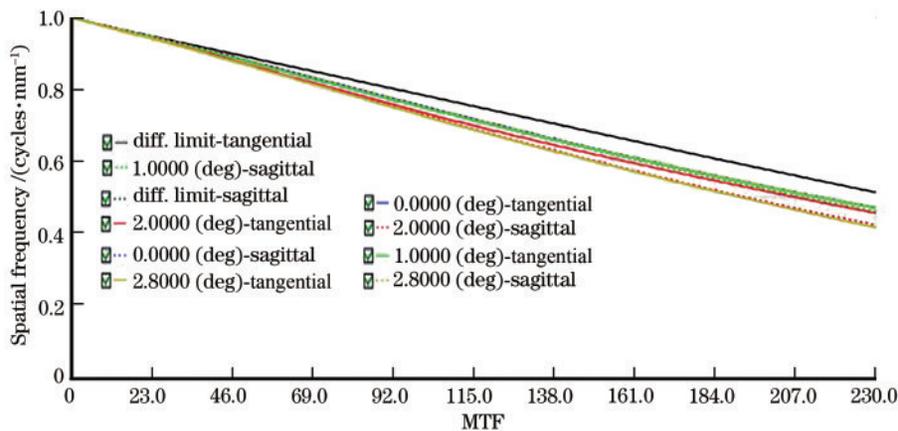


图 15 折叠级联光学系统 MTF 曲线图

Fig. 15 MTF curves of folding cascade optical system

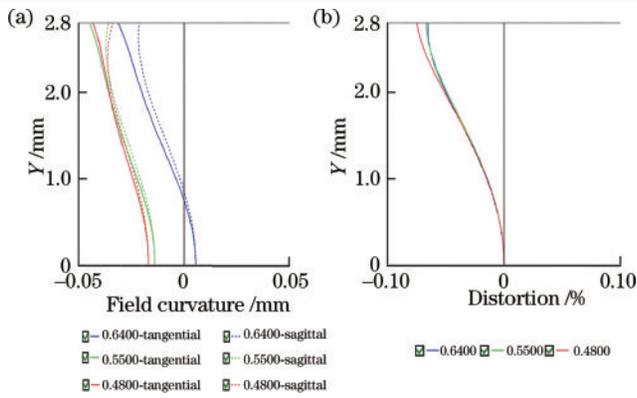


图 16 折叠级联光学系统性能曲线。(a)场曲;(b)畸变曲线
Fig. 16 Performance curves of folding cascade optical system.
(a) Field curvature; (b) distortion curve

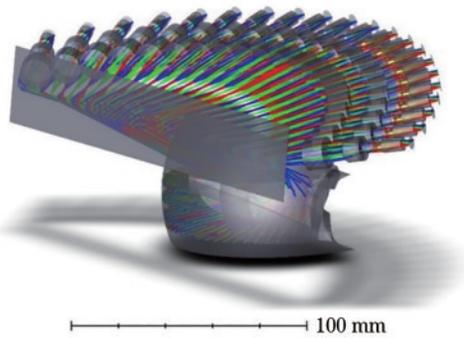


图 17 多通道折叠级联光学系统成像模拟图
Fig. 17 Imaging simulation map of multi-channel folding cascade optical system

表 1 多通道折叠级联光学系统参数表

Table 1 Parameters of multi-channel folding cascade optical system

Item	Specification
FOV of full channels / (°)	109.6
FOV of one channel / (°)	5.6
Number of channels	21
Cone angle of a relay imager / (°)	5.2
Overlap FOV for neighboring relay imagers / (°)	0.4
Overlap rate / %	14.3

5 结 论

针对目前无人机机载相机实时广域高分辨遥感拍摄需求,本文研究了一种折叠式级联光学结构的无人机机载相机光学系统,其焦距为 53 mm、 F 数为 3.0、全视场角为 109.6°、筒长为 107 mm,成像性能接近衍射极限。该系统充分利用了折叠同心物镜视场大体积小、中继转像透镜阵列分辨率高、折叠式级联结构紧凑的特点,在保持结构紧凑和小体积的同时实现了宽视场和高分辨率实时成像。该系统可为无人机机载相机光学系统的研制提供理论参考,在无人机遥感领域将有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 郑小梅, 方俊永, 张保辉, 等. 基于变焦镜头的机载相机监控系统设计及试验[J]. 光学技术, 2015, 41(6): 548-553. Zheng X M, Fang J Y, Zhang B H, et al. Design and experiment of airborne surveillance system based on zoom lens camera[J]. Optical Technique, 2015, 41(6): 548-553.
- [2] Liu Y K, Li C R, Ma L L, et al. Land surface reflectance retrieval from optical hyperspectral data collected with an unmanned aerial vehicle platform[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7174-7195.
- [3] 韩昌元. 光电成像系统的性能优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 1-9. Han C Y. Performance optimization of electro-optical imaging systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 1-9.
- [4] 李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 无人机载超低空宽覆盖遥感相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1422001. Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Design of optical system for UAV-borne ultralow-altitude wide-coverage remote sensing camera[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1422001.
- [5] Oettershagen P, Melzer A, Mantel T, et al. Design of small hand-launched solar-powered UAVs: from concept study to a multi-day world endurance record flight[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(7): 1352-1377.
- [6] Lima-Cueto F J, Blanco-Sepúlveda R, Gómez-Moreno M L, et al. Using vegetation indices and a UAV imaging platform to quantify the density of vegetation ground cover in olive groves (*olea europaea* L.) in southern Spain [J]. Remote Sensing, 2019, 11(21): 2564.
- [7] Fan L R, Lu L J. Design of a simple fisheye lens[J]. Applied Optics, 2019, 58(19): 5311-5319.
- [8] 张宗存, 丁学专, 杨波, 等. 超大幅宽低畸变成像系统设计与分析[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(6): 732-738. Zhang Z C, Ding X Z, Yang B, et al. Design and analysis of super large width and low distortion imaging system[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(6): 732-738.
- [9] Kopf J, Uyttendaele M, Deussen O, et al. Capturing and viewing gigapixel images timelapse[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 1-10.
- [10] Kopf J. 360° video stabilization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(6): 195.
- [11] Ben-Ezra M. A digital gigapixel large-format tile-scan camera[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2011, 31(1): 49-61.
- [12] Brady D J, Hagen N. Multiscale lens design[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10659-10674.
- [13] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. Multiscale gigapixel photography[J]. Nature, 2012, 486(7403): 386-389.
- [14] Marks D L, Lull P R, Phillips Z, et al. Characterization of the AWARE 10 two-gigapixel wide-field-of-view visible imager[J]. Applied Optics, 2014, 53(13): C54-C63.
- [15] Pang W B, Brady D J. Galilean monocentric multiscale optical systems[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20332-

- 20339.
- [16] Schuster G M, Dansereau D G, Wetzstein G, et al. Panoramic single-aperture multi-sensor light field camera[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37257-37273.
- [17] 李江勇, 冯位欣, 刘飞, 等. 机载多尺度广域高分辨率成像系统设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0208002.
Li J Y, Feng W X, Liu F, et al. Design of airborne multi-scale wide-field-of-view and high-resolution imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0208002.
- [18] 李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 宽覆盖高分辨率机载相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0222001.
Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Optical system design of wide-coverage and high-resolution airborne camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0222001.
- [19] Stamenov I, Agurok I P, Ford J E. Optimization of two-glass monocentric lenses for compact panoramic imagers: general aberration analysis and specific designs[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7648-7661.
- [20] 吴雄雄. 基于多尺度成像原理的宽视场高分辨光学系统设计与研制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Wu X X. Design and development of wide FOV high resolution optical system based on multisacle imaging principle[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [21] 王肇圻, 张轶楠, 郭欢庆. 折/衍混合可见光波段 Petzval 物镜设计[C]//2005 年中国光学学会全息与光学信息处理专业委员会年会暨建会 20 周年纪念会. 北京: 中国光学学会, 2005: 60-67.
Wang Z Q, Zhang Y N, Guo H Q. Design of hybrid refractive-diffractive Petzval objective in visible band[C]//2005 Annual Meeting of the Holographic and Optical information Processing Professional Committee of the Chinese Optical Society and the 20th Anniversary Meeting of the Founding of the Association. Beijing: Chinese Optical Society, 2005: 60-67.
- [22] 黄振永, 卢春莲, 俞建杰. 基于 ZEMAX 的光学设计教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2013: 17-18.
Huang Z Y, Lu C L, Yu J J. Optical design tutorials based on ZEMAX software[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2013: 17-18.
- [23] Huang Y H, Fu Y G, Zhang G Y, et al. Modeling and analysis of a monocentric multi-scale optical system[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32657-32675.
- [24] 赵迪迪, 李加慧, 谭奋利, 等. 基于分布度量和显著性信息的遥感图像拼接[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 0410007.
Zhao D D, Li J H, Tan F L, et al. Remote sensing image mosaic based on distribution measure and saliency information[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0410007.
- [25] 赵迪迪, 李加慧, 谭奋利, 等. 基于平滑约束和聚类分析的图像配准算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12): 1210010.
Zhao D D, Li J H, Tan F L, et al. Image registration algorithm based on smoothness constraint and cluster analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1210010.