

## 宽覆盖高分辨率机载相机光学系统设计

李加慧<sup>1,2,3</sup>, 谭奋利<sup>1,2,3</sup>, 曾晨欣<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** 针对机载相机广域高效航拍作业需求,采用新型级联光学成像结构,设计了一种宽覆盖高分辨率机载相机光学系统。该系统由对称前置同心物镜和中继转像透镜阵列组成,对称前置同心物镜获取剩余像差均匀的宽视场曲面像,中继转像透镜阵列对该曲面像进行视场细分、剩余像差校正及中继成像。所设计的机载相机光学系统焦距为 60 mm、 $F$  数为 3.4、视场角可达  $132^\circ$ 。基于一阶理论和像差特性,在不同飞行高度对地观测时,研究了机载相机光学系统的成像质量与宽视场曲面像的关系,获得系统在不同飞行高度实现清晰成像的方法。通过像质评价,结果表明,优化设计的系统在低空、中空及高空进行对地观测时,像面光线追迹点列图方均根半径均优于  $1.6 \mu\text{m}$ ,在奈奎斯特频率为 230 lp/mm 处,调制传递函数均达 0.4,系统成像性能优异且像质均匀。新型级联光学成像系统适用于不同飞行高度的机载相机。

**关键词** 光学设计; 级联光学成像结构; 机载相机; 宽覆盖; 高分辨率

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0222001

## Optical System Design of Wide-coverage and High-resolution Airborne Camera

Li Jiahui<sup>1,2,3</sup>, Tan Fenli<sup>1,2,3</sup>, Zeng Chenxin<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** In this study, a wide-coverage and high-resolution airborne camera optical system is designed for wide-area and efficient aerial work demand of airborne camera. The optical system adopts a novel cascade structure of optical imaging consisting of a fore monocentric symmetric objective and a relay lens array. The fore monocentric symmetric objective obtains a wide field-of-view curved surface image with uniform residual aberrations. The relay lens array simultaneously performs the field-of-view subdivision, residual aberration correction, and relay imaging for the curved surface image. The optical system in the designed airborne camera has 60 mm focal length, 3.4  $F$  number, and  $132^\circ$  field-of-view angle. The relationship between the imaging performance of the airborne camera optical system and the wide-field curved image at different flight altitudes is studied herein based on the first-order theory and aberration characteristics. A method for achieving clear imaging at different flight altitudes is also obtained. The image performance evaluation results show a good image quality when the optimized design system performed ground observation at low, hollow, and high altitudes. The modulation transfer function reaches 0.4 at

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-08-04; 录用日期: 2020-08-12

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)

\* E-mail: jiyiqun@suda.edu.cn

the Nyquist frequency of 230 lp/mm, and the root mean square radius of the system's ray tracing spot diagram is less than  $1.6 \mu\text{m}$ , verifying that the designed cascade optical imaging system is suitable for airborne cameras with different flight altitudes.

**Key words** optical design; cascade optical imaging structure; airborne camera; wide-coverage; high-resolution

**OCIS codes** 220.3620; 220.4830

## 1 引言

机载相机是获取地面信息的重要手段之一<sup>[1]</sup>,在现代战争中,战场形势瞬息万变,这对机载相机的成像测量要求逐渐提高。在进行航空成像测量时,简单的俯仰角和方位角测量信息的获取已不满足战场需要,指挥系统希望高效地对地面的可疑目标进行精确定位,这就要求机载相机具备宽覆盖、高分辨率等特点<sup>[2-3]</sup>。

然而,宽覆盖和高分辨率机载相机光学系统需同时具有大视场和大口径,而几何像差随光学系统视场和口径的增大而急剧增加,因此传统机载相机难以同时兼顾宽覆盖和高分辨率的成像需求<sup>[4-5]</sup>。目前,很多国内外学者对不同飞行高度的机载相机光学系统展开了研究。2012年,蒋宁等<sup>[6]</sup>针对  $4000 \times 4000$  的面阵数字相机,设计了一种焦距为 90 mm、视场角为  $23.15^\circ$  的相机,此相机在飞行高度为 5000 m 时的地面像元分辨率为 0.5 m。2016年,朱海滨等<sup>[7]</sup>设计了一款可见光波段折射式高分辨率小型无人机载相机,焦距为 52.5 mm,视场角为  $12^\circ$ ,在飞行高度为 1500 m 时地面像元分辨率为 0.1 m。2019年,于晓丹等<sup>[8]</sup>设计了一款无人机载大视场复眼相机,焦距为 4 mm,视场角为  $106^\circ$ ,在飞行高度为 500 m 时地面像元分辨率为 0.5 m。

针对目前机载相机宽覆盖、高分辨率、高效航拍作业的应用需求,本文采用新型级联成像结构,设计了一个宽覆盖高分辨率机载相机光学系统,该系统由前置同心物镜和中继转像透镜阵列组成<sup>[9-11]</sup>。基于一阶理论和像差特性<sup>[12]</sup>,首先研究了具有对称结构的前置同心物镜的成像机理,并优化设计了能够获取满足级联成像系统要求的宽视场曲面像的对称前置同心物镜;再基于改进型 Petzval 结构,综合考虑子通道的物理排列<sup>[13]</sup>,优化设计了放大倍率为 0.6 的中继转像透镜系统。进一步通过联合优化设计,设计了一个焦距为 60 mm、 $F$  数为 3.4、视场角达  $132^\circ$  的宽覆盖高分辨率机载相机光学系统。在不同飞行高度对地观测时,研究机载相机光学系统的成像质量与宽视场曲面像的关系,获得系统在不同飞行高度实现清晰成像的方法。通过像质评价,结果表明,优化设计

的系统在低空、中空及高空飞行高度进行对地观测时,成像性能一致且成像质量好,验证了新型级联成像系统适用于不同飞行高度的机载相机。

## 2 光学系统设计

新型级联光学成像系统的工作原理如图 1 所示,由前置同心物镜和中继转像透镜阵列组成。前置同心物镜首先获得一个剩余像差均匀的宽视场曲面像,中继转像透镜阵列再对该曲面像进行视场细分、剩余像差校正及中继成像。前置同心物镜具有视场大、集光能力强、轴外像差小等优点。在级联成像系统中,为精细校正剩余像差和获得高性能的光学像,中继转像透镜阵列各通道成像视场小,通道数多,若宽视场曲面像的剩余像差不一致,要获得具有均匀像质的子图像,中继转像透镜阵列各通道的结构复杂度和设计难度将随视场的增大而增大。因此,级联成像系统还要求宽视场曲面像具有剩余像差均匀的特点。

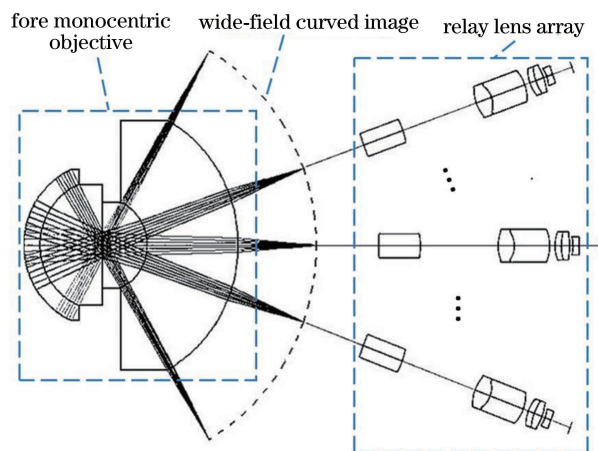


图 1 级联光学成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of cascade optical imaging system

### 2.1 对称前置同心物镜优化设计

对称前置同心物镜具有对称、同心特点,球差和色差是系统设计时主要考虑的几何像差,根据一阶理论和消像差条件<sup>[14]</sup>,可确定对称前置同心物镜的初始结构参数。借助 ZEMAX 光学设计软件<sup>[15-16]</sup>,按照物体位于无穷远,优化设计了焦距为 100 mm、视场角高达  $132^\circ$  的对称前置同心物镜,其光路结构如图 2 所示。该结构由 4 片完全对称的球面透镜组

成,光阑位于对称中心,即 4 片球面透镜的球心位置,对称前置同心物镜将无穷远的物成像在与物镜同心、半径等于物镜焦距的宽视场曲面像上。在该曲面像上进行成像性能评价,得到如图 3 所示的光

线追迹点列图和光线像差图,可见各个视场聚焦光斑均落在爱里斑内,且各种几何像差得到了平衡。所设计系统达到了全视场衍射极限且具有均匀成像的性能,满足级联成像系统设计的要求。

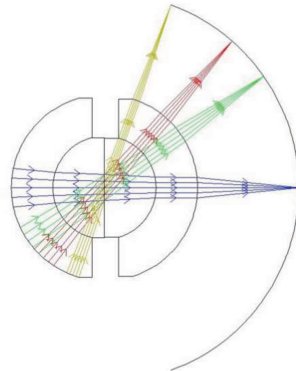


图 2 对称前置同心物镜光路结构图

Fig. 2 Optical layout of fore monocentric symmetric objective

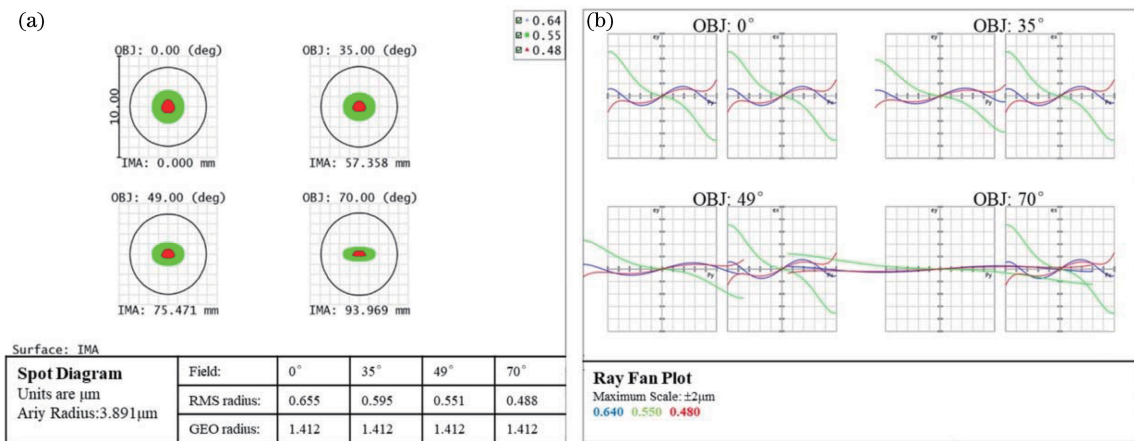


图 3 对称前置同心物镜系统的像质评价。(a)点列图;(b)光线像差图

Fig. 3 Image quality evaluation of fore monocentric symmetric objective system. (a) Spot diagram; (b) ray aberration diagram

### 2.2 中继转像透镜优化设计

根据对称前置同心物镜的设计结果和级联成像系统的设计要求,对单通道中继转像透镜系统进行优化设计。对称前置同心物镜获取的宽视场曲面

像经中继转像透镜系统成像到平面探测器上,故场曲是系统设计时需要考虑的像差之一。因此采用 Petzval 结构<sup>[17]</sup>作为系统的初始结构,通过建立合理的优化函数<sup>[18]</sup>进行优化设计,得到如图4所示的

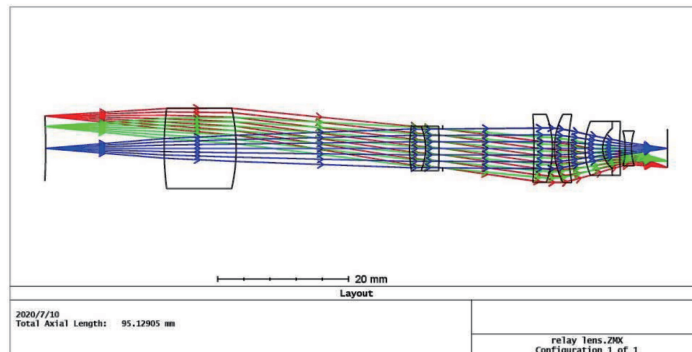


图 4 中继转像透镜系统光路结构图

Fig. 4 Optical layout of relay lens system

改进型 Petzval 结构设计结果。其由 8 片透镜组成,其中有 2 组双胶合透镜组,光阑位于第 3 片透镜后。系统的焦距为 20.37 mm,物高为 10.34 mm,放大率为 0.6。图 5(a)和图 5(b)分别

为系统的光线追迹点列图和光线像差图,可见,各个视场聚焦光斑的方均根半径均小于  $2.3 \mu\text{m}$ ,表明各种几何像差得到了平衡,中继转像透镜系统成像质量好。

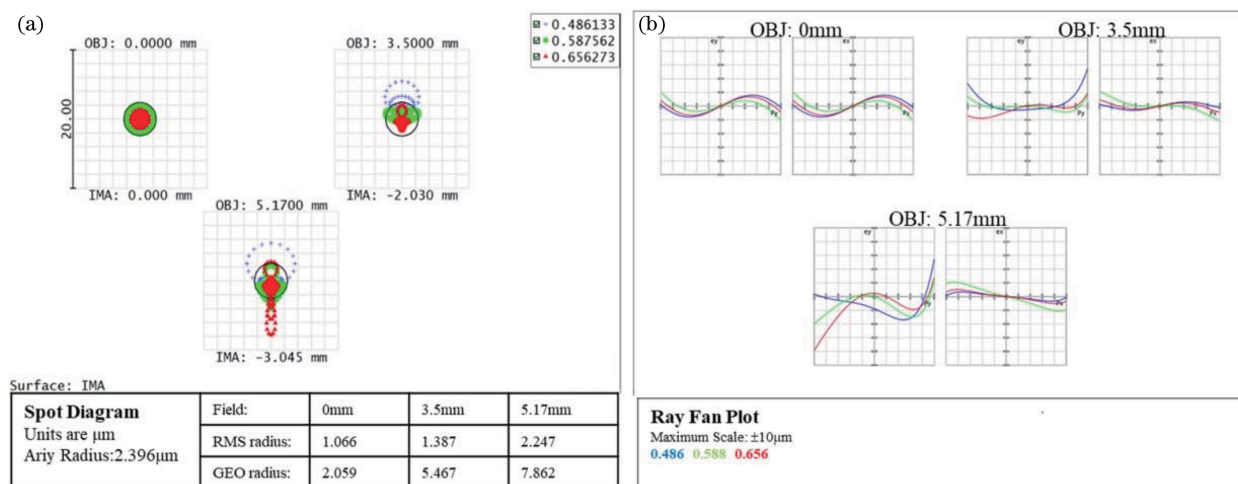


图 5 中继转像透镜系统的像质评价。(a)点列图;(b)光线像差图

Fig. 5 Image quality evaluation of relay lens system. (a) Spot diagram; (b) ray aberration diagram

### 2.3 级联成像系统优化设计

基于光瞳匹配原则<sup>[19]</sup>, 对称前置同心物镜和中继转像透镜进行联合优化设计。为了使级联成像系统在全视场范围获得均匀的照度,将孔径光阑设置在中继转像透镜系统阵列中。在第 1 组双胶合透镜前增加 1 片正透镜,一方面降低入射

光线在中继转像透镜上的入射高度,有效缩小中继转像透镜的口径;另一方面,提高系统的结构对称性,有利于更好地校正畸变<sup>[12,20]</sup>。经优化设计得到的级联成像系统单通道光路如图 6 所示,焦距为 60 mm,视场为  $5.92^\circ$ , $F$  数为 3.4,筒长小于 245 mm。

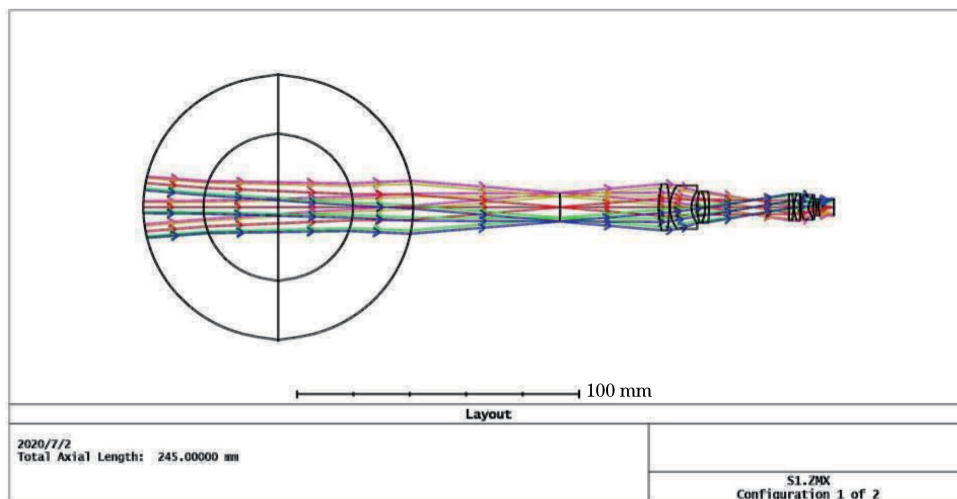


图 6 级联光学系统单通道成像光路结构图

Fig. 6 Single-channel imaging optical layout of cascade optical system

对联联合优化设计得到的级联成像系统单通道进行像质评价,得到像面上的光线追迹点列图,如图 7(a)所示,聚焦光斑的方均根半径均优于  $1.6 \mu\text{m}$ 。调制传递函数(MTF)曲线如图 7(b)所示,在奈奎斯特频率为 230 lp/mm 处,全视场 MTF

值达 0.4。图 7(c)为系统的场曲和畸变曲线,可见,场曲小于  $0.025 \text{ mm}$ ,畸变小于  $0.1\%$ 。图 7(d)为光线像差图,各几何像差均得到平衡,表明所设计系统的成像性能优异且全视场一致均匀。

要在子午方向达到  $0^\circ \sim 133^\circ$  的成像范围,须设

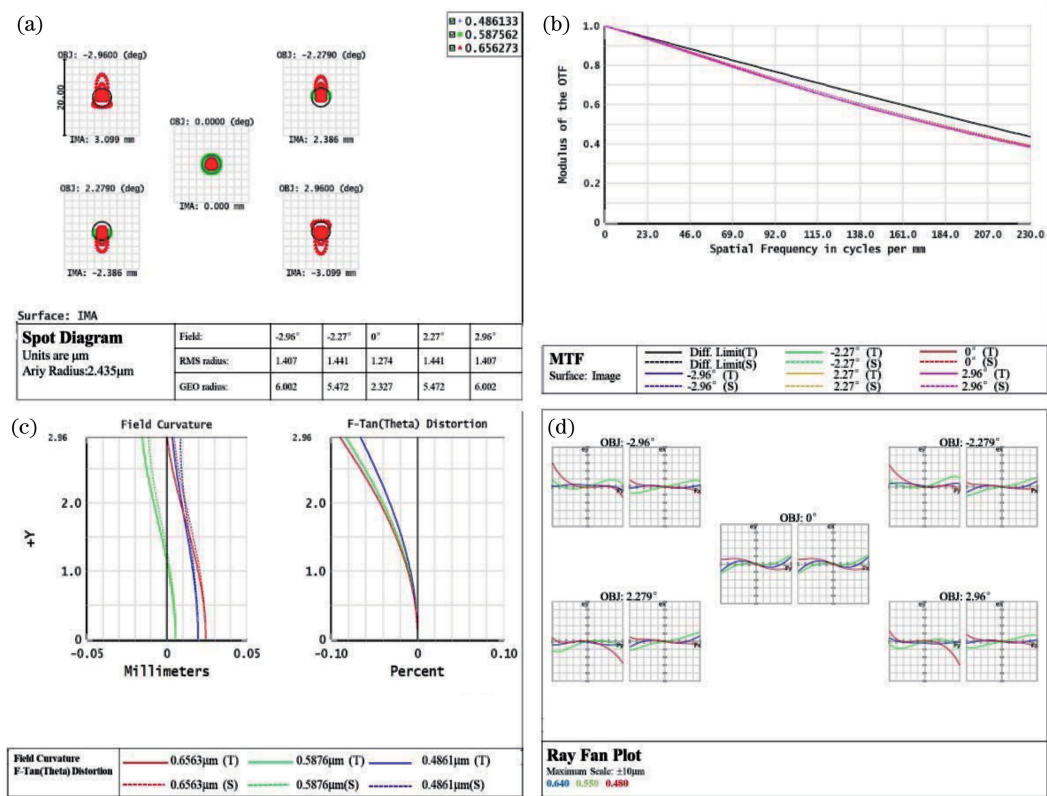


图 7 级联光学成像系统单通道像质评价曲线。(a)点列图;(b) MTF 曲线;(c)场曲/畸变曲线;(d)光线像差图

Fig. 7 Single-channel image quality evaluation curves of cascade optical imaging system.

(a) Spot diagram; (b) MTF curve; (c) field curvature/distortion curve; (d) ray aberration diagram

计如图 8 所示的 29 个成像通道来实现。为满足高分辨率全景图像的获取要求,相邻子通道之间的视场重叠度须不小于 13%。

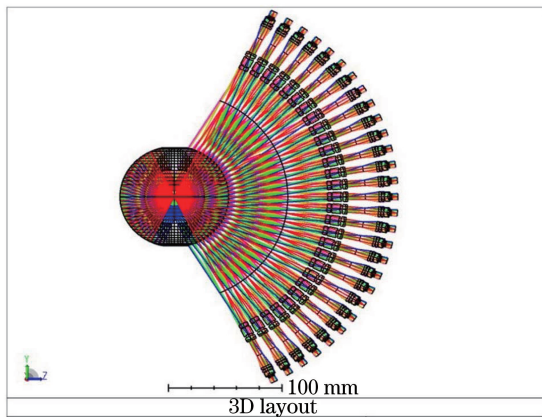


图 8 级联光学系统多通道成像光路结构图

Fig. 8 Multi-channel imaging optical layout of cascade optical system

### 3 不同飞行高度条件下机载相机的成像性能研究

所设计机载相机光学系统在 8000 m 以上的高空对地观测时,机载相机光学系统的像面光线追迹

点列图和 MTF 曲线分别如图 9(a)和图 9(b)所示。可见:其聚焦光斑方均根半径优于 1.45  $\mu\text{m}$ ;在奈奎斯特频率为 230 lp/mm 处,MTF 达 0.4,成像性能优。根据像差理论和高斯公式<sup>[10]</sup>,计算得到此时对称前置同心物镜所获取的宽视场曲面像是一个与前置同心物镜同心、曲率半径等于对称前置同心物镜焦距 100 mm 的球面。

当机载相机工作于中空飞行高度(1000 ~ 8000 m)时,将与前置同心物镜同心、曲率半径等于对称前置同心物镜焦距 100 mm 的球面作为前置同心物镜获取宽视场曲面像,发现,此时机载相机光学成像质量随飞行高度降低而缓慢下降。图 10(a)和图 10(b)分别为飞行高度为 1000 m 时系统像面光线追迹点列图和 MTF 曲线,可见,边缘视场聚焦光斑方均根半径增大至 1.8  $\mu\text{m}$ ,MTF 值下降至 0.35。

当机载相机工作于低空飞行高度(低于 1000 m)时,仍将与前置同心物镜同心、曲率半径等于对称前置同心物镜焦距 100 mm 的球面作为前置同心物镜获取宽视场曲面像,发现,此时成像质量随飞行高度降低而急剧下降。图 11 是飞行高度为 100 m 时机载相机光学系统的像质评价结果,此时

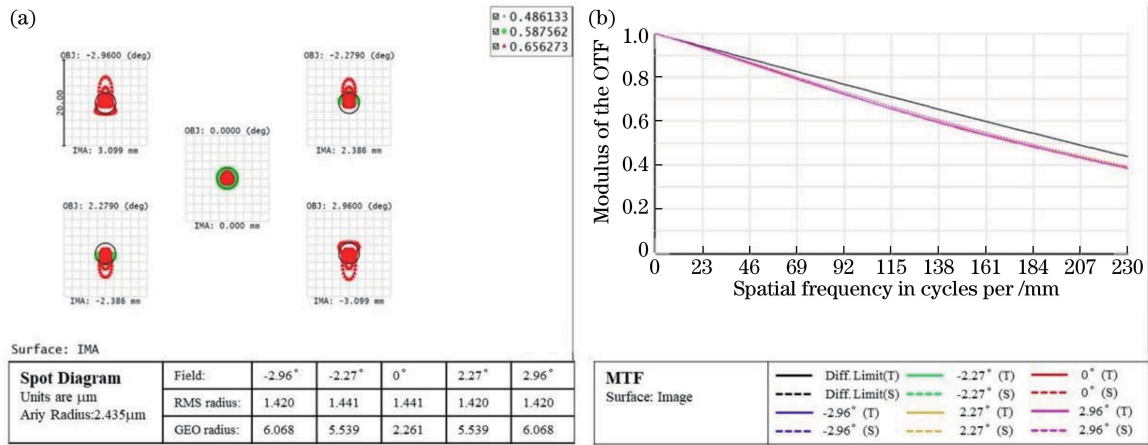


图 9 飞行高度为 8000 m 以上时,机载相机光学系统的像质评价。(a)点列图;(b) MTF 曲线

Fig. 9 Image quality evaluation of optical system in airborne camera at flight altitude above 8000 m.

(a) Spot diagram; (b) MTF curve

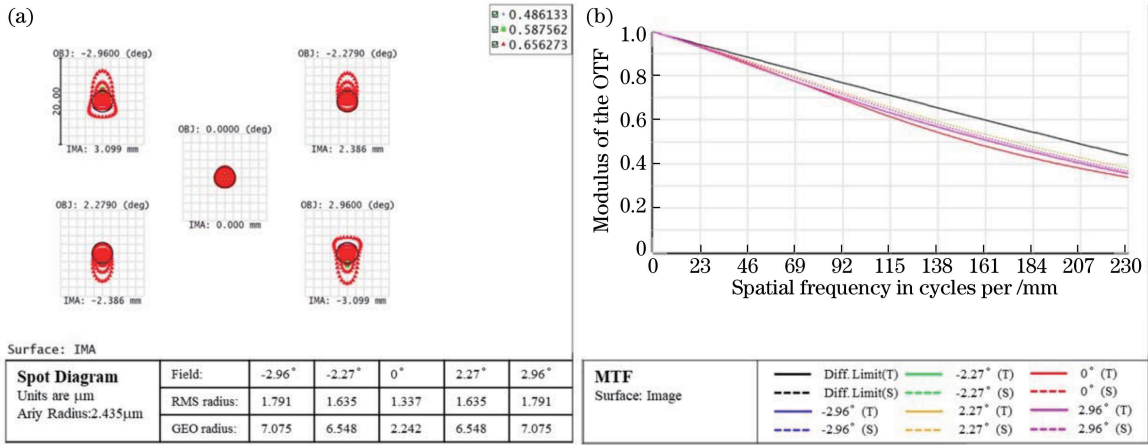


图 10 飞行高度为 1000 m 时,机载相机光学系统的像质评价。(a)点列图;(b) MTF 曲线

Fig. 10 Image quality evaluation of optical system in airborne camera at flight altitude of 1000 m.

(a) Spot diagram; (b) MTF curve

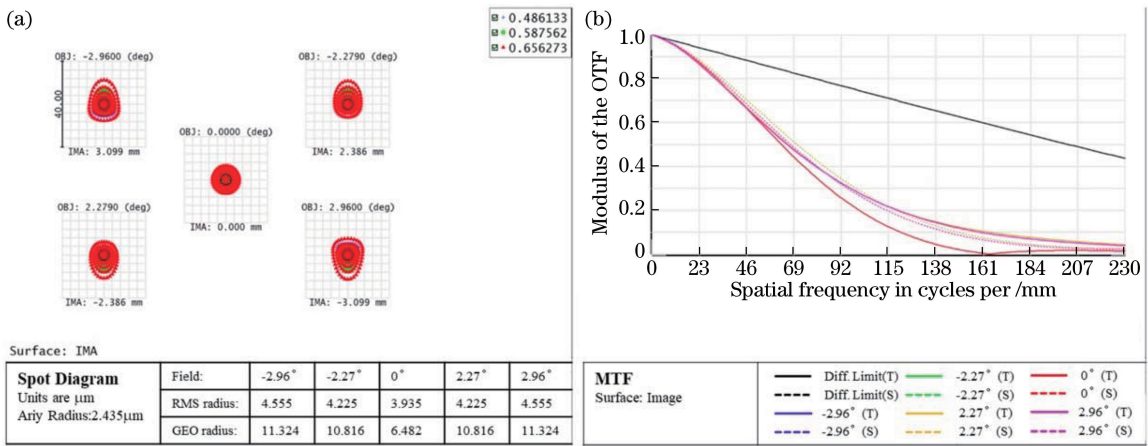


图 11 飞行高度为 100 m 时,机载相机光学系统的像质评价。(a)点列图;(b) MTF 曲线

Fig. 11 Image quality evaluation of optical system in airborne camera at flight altitude of 100 m.

(a) Spot diagram; (b) MTF curve

系统边缘视场聚焦光斑方均根半径增大至  $11\ \mu\text{m}$ , MTF 曲线剧烈下降, 在奈奎斯特频率为  $230\ \text{lp/mm}$  处 MTF 值趋于 0。下面研究对称前置同心物镜获取的宽视场曲面像的面型和位置对级联成像系统成像性能的影响。对称前置同心物镜成像光路如图 12 所示, 图 12(a) 和图 12(b) 分别是  $8000\ \text{m}$  以上飞行高度和  $8000\ \text{m}$  以下飞行高度对地观测时的成像光路。其中,  $f'$  为对称前置同心物镜的焦距;  $d$  为飞行高度;

$H_1$  和  $H_2$  分别是  $8000\ \text{m}$  以上飞行高度对地观测时轴上点和视场角为  $\beta$  的物点, 对应像点  $H'_1$  和  $H'_2$  分别位于像面  $I_H$  上;  $I_H$  是与前置同心物镜同心、曲率半径等于对称前置同心物镜焦距  $100\ \text{mm}$  的球面;  $M_1$  和  $M_2$  分别是  $8000\ \text{m}$  以下飞行高度对地观测时轴上点和视场角为  $\beta$  的物点, 对应像点  $M'_1$  和  $M'_2$  分别位于像面  $I_M$  上;  $\Delta z(\beta)$  是像面  $I_H$  与像面  $I_M$  的径向位移量,  $\Delta z'(\beta)$  是像面  $I_H$  与像面  $I_M$  的轴向位移量。

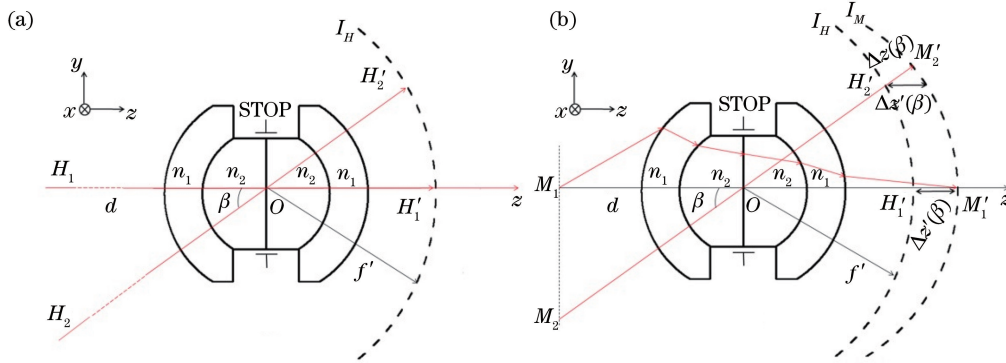


图 12 对称前置同心物镜成像光路图。(a)  $8000\ \text{m}$  以上飞行高度;(b)  $8000\ \text{m}$  以下飞行高度  
Fig. 12 Optical imaging diagram of fore monocentric symmetric objective. (a) Flight altitude above  $8000\ \text{m}$ ;  
(b) flight altitude below  $8000\ \text{m}$

基于像差理论和高斯公式<sup>[8,19-20]</sup>, 在  $8000\ \text{m}$  以下飞行高度对地观测时, 对称前置同心物镜获取的宽视场曲面像面  $I_M$  与在  $8000\ \text{m}$  以上飞行高度对地观测时曲面像面  $I_H$  之间存在径向位移量  $\Delta z(\beta)$ 。径向位移量  $\Delta z(\beta)$  与飞行高度  $d$  的关系为

$$\Delta z(\beta) = \frac{f'^2 \cos \beta}{d - f' \cos \beta} = \frac{f'^2}{\frac{d}{\cos \beta} - f'} \quad (1)$$

可见, 径向位移量  $\Delta z(\beta)$  随着视场角  $\beta$  的变化而变化。轴向位移量  $\Delta z'(\beta)$  是径向位移量  $\Delta z(\beta)$  沿轴方向的投影, 表达式为

$$\Delta z'(\beta) = \frac{\Delta z(\beta)}{\cos \beta} = \frac{f'^2}{d - f' \cos \beta} \quad (2)$$

(2) 式中, 由于飞行高度  $d \gg f'$ , 故  $\Delta z'(\beta) = \frac{f'^2}{d}$ , 轴向位移量  $\Delta z'(\beta)$  与视场角  $\beta$  无关, 随飞行高度  $d$  的降低而增大, 宽视场曲面像面  $I_M$  仍是曲率半径等于对称前置同心物镜焦距的球面, 但与同心物镜不同心。研究表明, 飞行高度高于  $8000\ \text{m}$  时, 对称前置物镜获取的宽视场曲面像面  $I_H$  沿轴向位移  $\frac{f'^2}{d}$ , 机载相机光学系统在不同飞行高度即可实现清晰成像。

基于上述研究结果, 将像面  $I_H$  沿轴向位移  $0.01\ \text{mm}$ , 可得到  $1000\ \text{m}$  飞行高度对称前置同心物镜的宽视场曲面像, 同理, 将  $I_H$  沿轴向位移  $0.1\ \text{mm}$ , 得到  $100\ \text{m}$  低空飞行高度宽视场曲面像位置。在此基础上, 优化对应宽视场曲面像, 得到  $1000\ \text{m}$ 、 $100\ \text{m}$  飞行高度机载相机光学系统成像质量评价结果, 分别如图 13、14 所示, 聚焦光斑方均根半径优于  $1.45\ \mu\text{m}$ , 在奈奎斯特频率为  $230\ \text{lp/mm}$  处, MTF 值达 0.4。可见, 在  $100\ \text{m}$ 、 $1000\ \text{m}$  及  $8000\ \text{m}$  以上的飞行高度, 机载相机光学系统的成像质量一致, 验证了所设计的新型级联光学成像系统可适用于不同飞行高度的机载相机。

## 4 结 论

针对目前机载相机实时广域高效航拍作业需求, 基于一阶理论和像差特性, 采用新型级联光学成像结构, 设计了一种适用于不同飞行高度的宽覆盖高分辨率机载相机光学系统, 焦距为  $60\ \text{mm}$ 、 $F$  数为 3.4、全视场角为  $132^\circ$ 。在不同飞行高度对地观测时, 通过研究机载相机光学系统成像质量与宽视场曲面像的关系, 获得系统在不同飞行高度实现清晰成像的方法, 并对系统进行像质评价。结果表明,

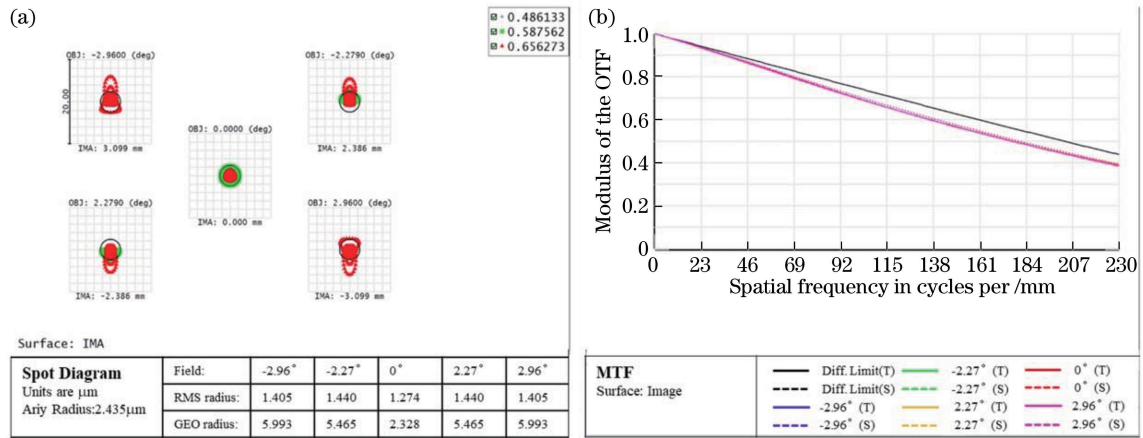


图 13 飞行高度为 1000 m 时,优化宽视场曲面像后的机载相机光学系统的像质评价。(a)点列图;(b) MTF 曲线  
Fig. 13 Image quality evaluation of optical system in airborne camera at flight altitude of 1000 m after optimizing wide-field curved image. (a) Spot diagram; (b) MTF curve

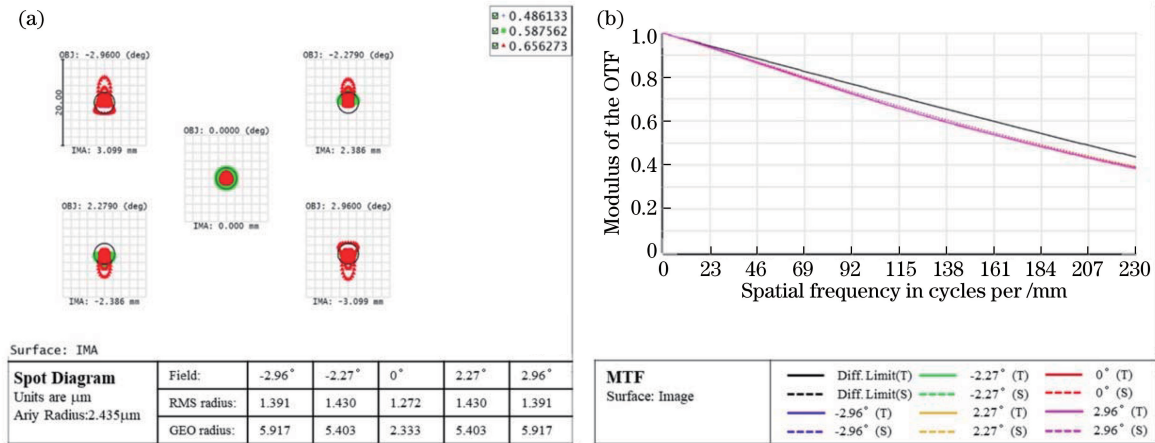


图 14 飞行高度为 100 m 时,优化宽视场曲面像后的机载相机光学系统的像质评价。(a)点列图;(b) MTF 曲线  
Fig. 14 Image quality evaluation of optical system in airborne camera at flight altitude of 100 m after optimizing wide-field curved image. (a) Spot diagram; (b) MTF curve

新型级联成像系统可同时实现宽覆盖和高分辨率光学成像,并且适用于不同飞行高度的机载相机,在广域监视和目标定位等军事领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 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.  
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.  
[2] Cui Z Y. Design of airborne variable resolution dual channel optical system and research on image separation algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 1-3.

崔自跃. 机载变分辨率双通道光学系统设计及图像分离算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 1-3.  
[3] Ren Z G, Li X Y, Ni D W. Compact space optical system design with large relative aperture and field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0922001.  
任志广, 李旭阳, 倪栋伟. 大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0922001.  
[4] 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.  
[5] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 52-89.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 52-89.



- [6] Jiang N, Jia J Q, Jin C Q, et al. Design for optical lens of the UAV plane array digital camera on the aircraft[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2012(6): 35-37.  
蒋宁, 贾继强, 金灿强, 等. 无人机载面阵数字相机光学镜头设计[J]. *装备制造技术*, 2012(6): 35-37.
- [7] Zhu H B, Zhang Y J, Zhu D L, et al. Design of high resolution objective on small UAV[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2016, 31(3): 4-8.  
朱海滨, 张远健, 朱大略, 等. 小型无人机载高分辨率物镜设计[J]. *光电技术应用*, 2016, 31(3): 4-8.
- [8] Yu X D, Zhang Y J, Wang Y Y, et al. Optical design of a compound eye camera with a large-field of view for unmanned aerial vehicles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7): 0722003.  
于晓丹, 张远杰, 王元元, 等. 小型无人机载大视场复眼相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2019, 48(7): 0722003.
- [9] Wu X X, Wang X R, Yuan Y, et al. Design of sub-imaging system based on monocentric multiscale dual resolution imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2644-2650.  
吴雄雄, 王晓蕊, 袁影, 等. 同心多尺度成像模式下的高分辨子成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2644-2650.
- [10] Marks D L, Llull 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): 54-57.
- [11] Nakamura T, Kittle D S, Youn S H, et al. Autofocus for a multiscale gigapixel camera [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(33): 8146-8147.
- [12] Zhang Y M. *Applied optics*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 170-230.  
张以谟. *应用光学*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 170-230.
- [13] Marks D L, Son H S, Kim J, et al. Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 083202.
- [14] Cui Q F. Realization of three-color achromats with binary optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994: 877-881.  
崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差[J]. *光学学报*, 1994: 877-881.
- [15] Yuan X C. *Optical design* [M]. Beijing: Beijing Institute 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.
- [16] Mao W W. *Modern optical lens design methods and examples*[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 2-57.  
毛文炜. *现代光学镜头设计方法与实例*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 2-57.
- [17] Wang Z Q, Zhang Y N, Fu N L, et al. Design of hybrid refractive-diffractive petzval objective in visible band[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1): 1-4.
- [18] Huang Z Y, Lu C L, Yu J J. *Optical design tutorials based on ZEMAX software* [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2013: 97-108.  
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: 97-108.
- [19] Pan J H. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1475-1478.  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. *光学学报*, 2003, 23(12): 1475-1478.
- [20] Born M, Wolf E. *Principles of optics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1980: 149-176.