

光学学报

机载多尺度广域高分辨率成像系统设计

李江勇^{1,2}, 冯位欣¹, 刘飞¹, 魏雅喆¹, 邵晓鹏^{1*}

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

²中国电子科技集团公司第十一研究所光电系统技术研究部, 北京 100015

摘要 针对机载光电成像系统的大视场高分辨率成像需求,设计一种基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率光学成像系统,该光学系统包括大尺度共心球透镜和小尺度次级相机阵列,具有结构紧凑的优点。根据共心球透镜所具有的球差和色差特性,并结合小尺度相机对像差进行进一步校正以分割视场,可以实现大视场高分辨率成像。全系统在受力以及高、低温的条件下进行实验,实验结果表明该成像系统具有良好的稳定性,且全视场范围内的调制传递函数值恒接近于系统的衍射极限,弥散斑半径的方均根值小于探测器的像元尺寸,说明该系统的成像效果良好。所提系统可以有效解决传统机载成像系统难以同时满足大视场和高分辨率的问题,为光学成像系统设计提供一种新思路。

关键词 几何光学; 光学系统设计; 多尺度成像; 计算成像; 球透镜

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0208002

Design of Airborne Multi-Scale Wide-Field-of-View and High-Resolution Imaging System

Li Jiangyong^{1,2}, Feng Weixin¹, Liu Fei¹, Wei Yazhe¹, Shao Xiaopeng^{1*}

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²Department of Electro-Optics System, China Electronics Technology Group Corporation Nerieo, Beijing 100015, China

Abstract Aiming at the wide-field-of-view and high-resolution imaging requirements of the airborne photoelectric imaging systems, we design a multi-scale wide-field-of-view and high-resolution optical imaging system based on a concentric spherical lens. The optical system includes a large-scale concentric spherical lens and a small-scale secondary camera array, and it has the advantage of compact structure. According to the spherical aberration and chromatic aberration of the concentric spherical lens, in combination with the small-scale cameras, the aberration is further corrected for the segmentation of the field of view, achieving wide-field-of-view and high-resolution imaging. Furthermore, the whole system is subjected to experiments under stress and at high and low temperatures. The experimental results show that the imaging system has good stability. Besides, the value of modulation transfer function in the full field of view is always close to the diffraction limit of the system, and the square root of the speckle radius is smaller than the pixel size of the detector, indicating good imaging effect of the system. In conclusion, the traditional airborne imaging system cannot satisfy both wide-field-of-view and high resolution at the same time, and provides a new idea for optical imaging system design.

Key words geometric optics; optical system design; multi-scale imaging; computational imaging; spherical lens

OCIS codes 080.3620; 080.6755

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-08-01; 录用日期: 2020-08-19

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2017M613063)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JQ6010)、陕西省博士后科学基金(30102180048)、中央高校基本科研业务费(XJS190502, XJS200505)

* E-mail: xpshao@xidian.edu.cn

1 引言

机载光电成像系统作为人们俯瞰世界的“眼睛”,广泛应用在航空侦察、生态检测、地形测绘、海上救援、森林防护、安防监控、赛事直播和航空测绘等领域^[1-7],而且该系统可以更有效地获取大空间范围以及容易忽略的重要信息。

受到透镜设计与加工和光电探测器等工业水平的限制,使得机载光电成像系统难以获取大视场高分辨率的信息。传统的大视场高分辨率成像系统通常采用小视场高分辨率扫描成像和鱼眼透镜超半球凝视成像等方式^[1,8-9],虽然该系统容易获得大视场高分辨率图像,但存在机构复杂、可靠性低及实时性差等一系列问题,这严重制约着机载广域成像范围内高分辨率信息的获取。

针对传统机载广域高分辨率光电成像系统中存在的不足,Leininger 团队^[6]设计了 ARGUS-IS (Autonomous Real-time Ground Ubiquitous Surveillance-Imaging System) 多孔径光电成像系统,该系统采用包含 4 个子孔径的镜头对同一区域进行成像,但是在实现大视场高分辨率成像的同时存在设计复杂和容错率低的问题;以色列的“SkEye”全景观察系统^[10]集成了多个摄像机以实现大视场高分辨率成像,但增大视场势必会存在载荷体积和质量增大的问题;Brady 团队^[11-14]研发的 AWARE (Architecture for Image Reconstruction and Exploitation) 系列均采用基于共心球透镜的多尺度成像方式,虽然该架构可以实现大视场高分辨率成像,但不适用于高空环境的成像;中国科学院航空光学成像与测量重点实验室^[15]设计的大视场三线阵航空测绘相机采用了双高斯复杂化失对称准像方远心光学系统结构,该相机可以实现大视场、高分辨率且低畸变成像,但结构复杂且设计难度大。综上所述,现有的光电成像系统存在结构复杂、可靠性低、实时性差、设计难度大、容错率低和机载环境适应性差等问题。

针对上述问题,本文设计一种机载多尺度广域高分辨率成像系统。该系统综合考虑大尺度共心球透镜与基于球型分布的小尺度次级微相机阵列的分布特点进行设计,可以在实现广域和高分辨率机载实时成像的同时降低光学系统的设计难度,并且可以有效降低机械结构的复杂程度。针对空中环境变化,对机载共心多尺度广域高分辨率计算成像系统的受力以及温度变化所导致的透镜曲率、折射率以

及同轴度的变化情况进行研究,并分析成像效果。实验结果表明,该机载成像系统不仅可以实现大视场和高分辨率的统一,而且具有良好的成像稳定性。

2 机载共心多尺度广域计算成像系统的设计

2.1 机载共心多尺度光学成像系统的原理

共心多尺度光学成像系统基于透镜系统的比例法则^[11,16-22]校正像差。对光学系统的尺寸进行量化处理,并采用性能饱和度 γ 来描述信息传递能力与光学孔径的关系, γ 定义为实际空间带宽积(SBP)与最大空间带宽积的比值,表达式为

$$\gamma = \frac{x_{\text{SBP}}}{x_{\text{SBP,max}}}, \quad (1)$$

式中: $x_{\text{SBP,max}}$ 为最大空间带宽积。SBP 表示一个给定视场(FOV)的光学系统在像面上可以清晰分辨的点数 N ^[17]。

对于衍射受限的光学系统,小视场范围内弥散斑的直径 $\sigma = 2.44\lambda F$ ^[16],成像面的直径 $D = 2f \tan(x_{\text{FOV}}/2)$,其中 λ 为主波长, F 为光学系统的 F 数, f 为光学系统的焦距,因此 $x_{\text{SBP,max}}$ 可表示为

$$x_{\text{SBP,max}} = \frac{\pi(D/2)^2}{\pi(\sigma/2)^2} \approx \frac{0.67A^2}{\lambda^2} \tan^2\left(\frac{x_{\text{FOV}}}{2}\right), \quad (2)$$

式中: A 为光学系统的入瞳直径。令 $x_{\text{SBP}} = N$,则 γ 可以表示为

$$\gamma = \frac{N\lambda^2}{0.67A^2 \tan^2(x_{\text{FOV}}/2)}. \quad (3)$$

当 $\gamma = 1$ 时,表示光学系统的信息传递无损耗,即光学系统的像差为 0;当 $\gamma = 0$ 时,理论上光学系统无信息传递;因此, γ 值越大表示光学系统的信息传递效率越高,但实际情况中 γ 值随着 A 值的增加呈单调下降的趋势。根据 Lohman^[16]提出的透镜比例法则,对放缩 M 倍的 γ 进行修正。假设将光学系统的尺寸缩放 M 倍,则衍射极限弥散斑的尺寸只与波长和 F 数有关,且不随着 M 值的变化而变化。考虑衍射和几何像差的弥散斑半径 ϵ 为

$$\epsilon = \sqrt{1.22^2 \lambda^2 F^2 + M^2 \xi_1^2}, \quad (4)$$

式中: ξ_1 为 $M=1$ 的几何弥散斑半径。

当 $M=1$ 时,像面直径为 D_1 ,那么光学系统在像面上可以清晰分辨的点数为

$$N \approx \frac{M^2 D_1^2}{4(3\lambda^2 F^2/2 + M^2 \xi_1^2)}. \quad (5)$$

当 M 值很小时,(5)式可表示为

$$N \approx \frac{M^2 D_1^2}{6\lambda^2 F^2} \quad (6)$$

当 M 值很大时, (5) 式可表示为

$$N \approx D_1^2 / 4\xi_1^2 \quad (7)$$

小尺度的情况下, N 与 M 的平方成比例; 大尺度的情况下, N 与 M 无关。将 (5) 式代入 (3) 式, 可以得到将 γ 作为尺度的函数^[19], 表达式为

$$\gamma \approx \frac{1}{1 + M^2 (\xi_1 / 1.22\lambda F)^2} \quad (8)$$

当 $\xi_1 = 0$ 时, $\gamma = 1$, 此时几何像差被完全校正, 说明 γ 与 M 无关; 当 $\xi_1 > 0$ 时, $M < 1.22\lambda F / \xi_1$ 情况下的 γ 值接近 0.5, $M > 1.22\lambda F / \xi_1$ 情况下的 γ 与 M^2 成反比, 说明比例因子越大, 系统的信息传递效率越低。

综上所述, 采用增大光学孔径的方法可以提高成像系统的分辨率, 在增大 M 值的同时可以校正几何像差, 从而提高衍射极限系统的成像质量。因此, $M\xi_1 / \lambda F$ 与 M 必须成反比, 实现方法如下。减小视场以减小与视场相关的几何像差, 增加系统的复杂度以校正由尺度增加带来的像差, 根据 M 值适当增大 F 数。

多尺度光学系统采用扩大视场以收集光能的设计方法, 小尺度光学系统采用分割视场以校正残余像差的设计方法, 这可以突破传统透镜比例法则的限制, 从而实现 $M\xi_1 / \lambda F$ 与 M 成反比的新思路。

多尺度光学系统是由大尺度主光学系统与多个小尺度光学系统结合而成的, 大尺度光学系统用于尽可能多地收集光能和校正初步像差, 多个小尺度光学系统用于分割大尺度光学系统所成的中间像面并在小孔径范围内校正残余像差。多尺度光学系统是在大视场成像的条件下设计的, 利用大、小尺度变化可

以很好地校正光学像差, 从而实现高分辨率成像。

针对上述问题, 基于 AWARE-2 结构的特点设计一种机载多尺度广域高分辨率成像系统, 该系统结合大尺度共心球透镜光学系统和小尺度相机阵列。共心球透镜所有的光学球面共心并具有旋转对称性, 这可以使其忽略与视场相关的像差, 只需考虑球差、色差以及色球差, 所以共心多尺度光学系统可以很好地解决大视场光学系统中不同视场像差不同的问题。由于共心球透镜具有旋转对称性, 因此一次像面中不同视场的像差基本相同, 即小尺度相机阵列中小相机的光学系统完全相同, 这可以极大地简化光学系统的结构, 降低加工成本和装调难度。采用非完全对称结构, 即球心两侧透镜结构的曲率半径和厚度近似而非相同的结构形式, 这会增加焦距, 但可以提高系统的成像质量。小尺度相机阵列可以将共心球透镜的一次像面中部分视场缩放并成像于探测器上, 再对共心球透镜的残余像差进行校正, 从而将相邻相机的视场重叠拼接为大视场高分辨率图像。

大视场多尺度成像光学系统的结构如图 1 所示, 该系统集成球透镜的大视场收集能力和小尺度相机的局部视场校正能力。光线从物方入射到主成像光学系统中, 共心球透镜将大视场的场景成像在一次像面上, 相机阵列以其所具有的缩放成像能力将一次像面的部分视场成像在探测器上, 相邻的探测器视场间存在重叠, 通过后期的图像拼接处理可获得无缝的大视场高分辨图像。次级光学系统作为小尺度光学系统, 具有更强的像差校正能力, 可以进一步校正主光学系统中存在的残余像差^[9]。次级光学系统所具有的缩放能力是保证相邻子光路视场存在重叠的重要条件, 这便于探测器阵列的排布以及后期图像的配准融合。

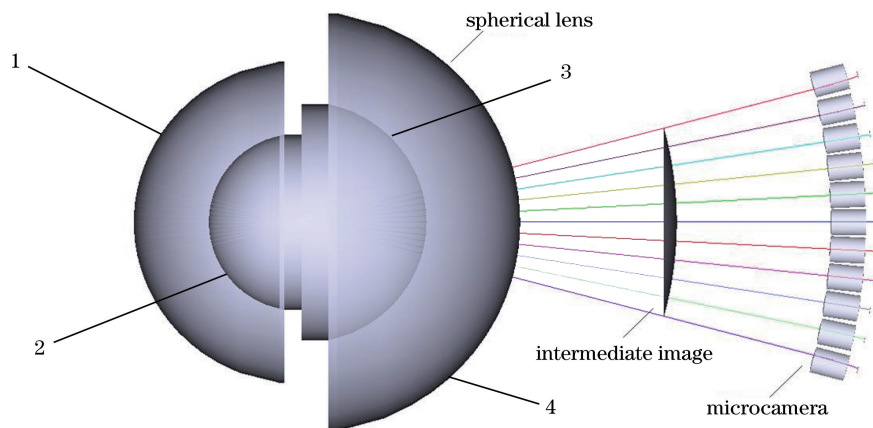


图 1 大视场多尺度成像光学系统的模拟结构

Fig. 1 Simulation structure of large-field multi-scale imaging optical system

2.2 光学系统的优化设计

主成像光学系统由共心球透镜构成,共心球透镜是指其所有光学表面的曲率中心均位于球心的光学系统。球透镜的孔径光阑位于球心所在的平面,通过球心的任意一条光线均可以将其看作光轴。

双层共心球透镜的焦距^[10]为

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{r_1} \left(2 - \frac{2}{n_1} \right) + \frac{1}{r_2} \left(\frac{2}{n_1} - \frac{2}{n_2} \right), \quad (9)$$

式中: r_1 和 n_1 分别为外层玻璃的曲率半径和折射率; r_2 和 n_2 分别为内层玻璃的曲率半径和折射率。

双层共心球透镜的消色差条件^[23]为

表 1 共心球透镜的初始结构参数

Table 1 Initial structural parameters of concentric spherical lens

Numerical order	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Glass	Radius /mm
1	62.229	27.160	H-ZF12	60
2	35.069	35.069	H-BAK8	35
STO	Infinity	35.069	H-BAK8	30
4	-35.069	27.160	H-ZF12	35
5	-62.229	37.771		60

根据表 1 数据并对其进行优化,得到的光学系统结构如图 2 所示。次级光学系统结构将共心主透镜的视场均分为若干个等大的子视场,采用子视场叠加的方法来实现广域高分辨率成像,其中关键问题为避免成像系统存在视场盲区以及残余像差的校正。通过调整优化次级光学系统对一次像面的放大

$$\frac{n_2 - 1}{n_2 \nu_2} \frac{1}{r_2} = \frac{n_1 - 1}{n_1 \nu_1} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right), \quad (10)$$

式中: ν_1 和 ν_2 分别为外层和内层玻璃材料的阿贝数。

在可见光波段,双层共心球透镜的 f 为 100 mm, F 数为 3.3,FOV 为 120° 。为了消除共心球透镜的球差和色差,选用成都光明玻璃库中高折射率且高色散的火石玻璃,并将其作为共心球透镜的外层玻璃材料,低色散且低折射率的冕牌玻璃作为共心球透镜的内层玻璃材料,初始结构参数如表 1 所示,其中 STO 为光阑。

倍率,可以有效地避免视场盲区的存在;考虑到球透镜残差与视场的不相关性,每个子视场内的像差可以通过调整优化对应次级光学系统来实现校正,同时保证对相邻子视场不产生影响。综上可知,视场中的残余像差与视场角无关,故使用相同的次级微相机阵列来校正残差。

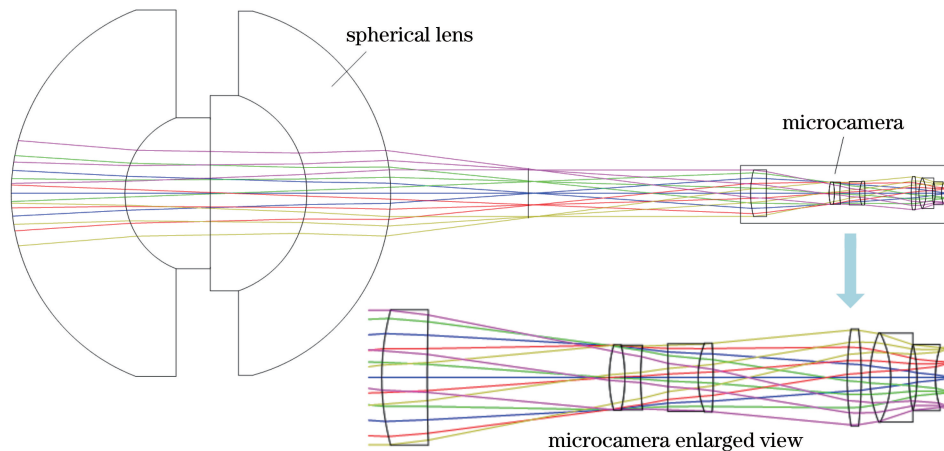


图 2 共心球透镜光学系统的结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of concentric spherical lens optical system

MTF(Modulation Transfer Function)作为最典型的光学系统评价参数,其可以表征像与物的调制之比,即光学系统对物体不同频率成分的传递能力。机载共心多尺度广域计算成像系统的

MTF 曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看到,当空间频率为 357.0 cycle/mm 时,MTF 值约为 0.2;系统的零度视场、半视场和全视场的 MTF 曲线变化趋势一致并接近系统衍射极限,说明各视场的成

像质量良好。系统的点列图如图 4 所示,其中 OBJ 表示物面,IMA 表示像面。从图 4 可以看到,全波段下系统弥散斑半径的方均根(RMS)的最大值为 $1.145 \mu\text{m}$,小于探测器的像元尺寸($1.4 \mu\text{m}$),说明该系统满足与探测器匹配的要求。

采用场曲和畸变曲线进一步分析所设计系统的成像性能,结果如图 5 所示,其中图 5(a)纵坐标表示像面位置,横坐标表示场曲偏离大小,图 5(b)纵坐标表示像面位置,横坐标表示为畸变的百分比,S 表示孤矢方向,T 表示子午方向。从图 5 可以看到,系统整体的场曲值在 0.05 mm 以内,畸变值保持在 -0.5% 以内,二者都控制在光学系统所设计的有效范围内。

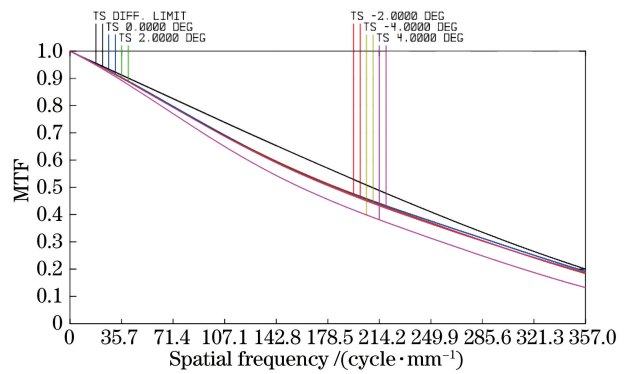


图 3 共心多尺度广域计算成像系统的 MTF 曲线
Fig. 3 MTF curves of concentric multi-scale wide-area computational imaging system

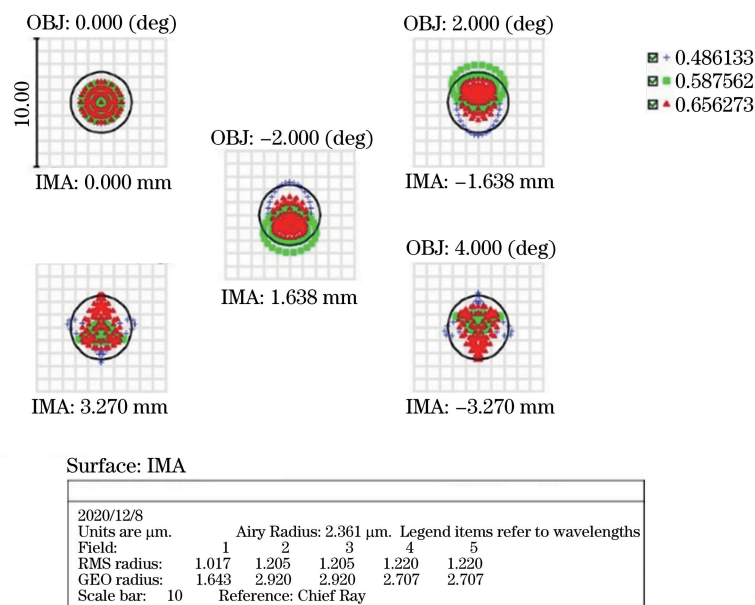


图 4 共心多尺度广域计算成像系统的点列图

Fig. 4 Spot diagram of concentric multi-scale wide-area computational imaging system

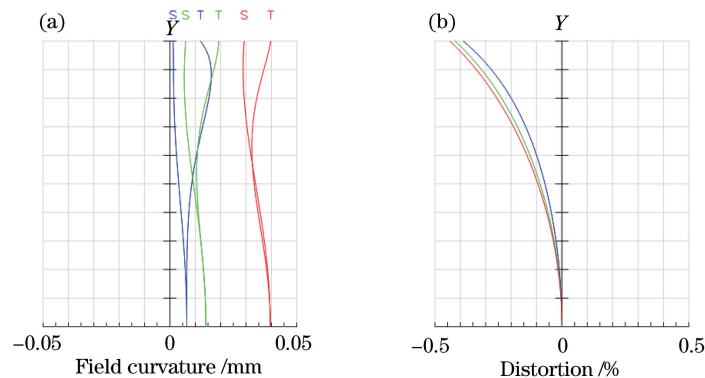


图 5 共心多尺度广域计算成像系统的性能曲线。(a)场曲;(b)像散曲线

Fig. 5 Performance curves of concentric multi-scale wide-area computing imaging system.

(a) Field curvature; (b) astigmatic curve

3 机载共心多尺度广域成像系统结构的稳定性分析

3.1 机载共心多尺度广域计算成像系统的结构设计

机载共心多尺度广域计算成像系统在实际应用中会受到自身重力(静态力)以及气流产生的震颤(动态力)等影响,这对光学系统的同轴度、匹配度甚至成像质量造成较大的影响,因此结合光学系统的共心特性将共心球透镜作为主动装配部件,将球型微相机阵列作为被动转配部件。

由于该系统的共心球透镜具有完全对称性,综合考虑系统的成像稳定性将其设计为共心球透镜支架结构,该结构可以通过三个轴向和三个横向的螺丝分别控制轴向和横向的位移,从而实现精确的三维定位。为了方便微相机阵列的装调和后期的改进替换,设计由具有独立封装的圆筒状单元组成的球型微相机阵列支架结构,且支架的曲率中心与主物镜共心。综合考虑支架所受的自身重力、小相机的重力和装配预紧力以及其所带来的形变,使用 31 mm 厚的 TA6 钛合金作为球型阵列相机支架并经过时效处理来消除加工应力。

机载共心多尺度广域计算成像系统在实际应用中受到静态力和动态力等不同量级且不同频段的机械振动影响,这些振动通常是随机振动,主要具有两个特点^[23]。1) 振动频段宽,一般范围为 10 ~

2000 Hz;2) 振动量级大,振动加速度的 RMS 值通常约为 10g,因此有必要确定工作环境对光学系统同轴度、匹配度以及成像质量的影响,其中 g 表示重力加速度。

3.2 受力影响分析

考虑到系统的自身特点以及应用条件,重点分析系统的自身重力及动态冲击力对系统成像质量的影响。由于次级光学系统由包含多个子孔径的微相机阵列构成,所以子孔径数量多且分布集中,而且整体质量较大,这对分析力学特性的影响较大。采用有限元分析的方法来研究系统的自身重力对系统结构形变的影响,球型阵列相机支架所能承受的最大应力为 $4.04 \times 10^4 \text{ N/m}^2$,支架材料的屈服应力为 $1.93 \times 10^8 \text{ N/m}^2$,远大于支架所能承受的最大应力,因此支架不会产生由重力作用引起的不可逆形变或断裂,仅会产生微小的形变位移。球型阵列相机支架和系统支架在垂直重力作用后的应力和应变位移,如图 6 和图 7 所示,其中图 6(a)和图 6(b)分别是在屈服应力为 $4.35 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 和 $3.257 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 下得到的,图 7(a)是在屈服应力为 $4.35 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 的情况下得到的。从图 6 和图 7 可以看到,球型阵列相机支架在重力作用后的最大静态位移为 $2.076 \times 10^{-5} \text{ mm}$,该量级的位移对系统成像效果的影响将在第 4 节具体分析。

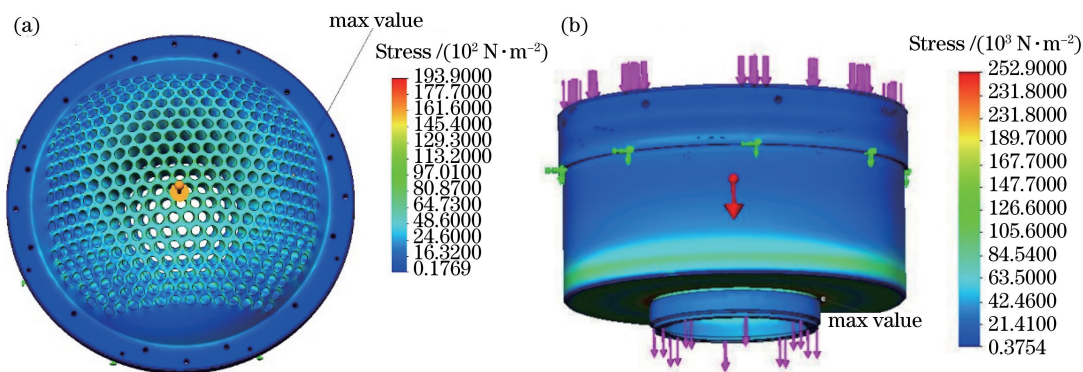


图 6 不同结构在重力作用下的应力。(a)球型阵列相机支架;(b)系统支架

Fig. 6 Stress of different structures under gravity. (a) Spherical array camera support; (b) system support

除了受到重力等静态力的影响,由于机载平台的特殊应用需求和工作环境会产生由飞行器颠簸造成的动态冲击力,这可能会引起系统形变甚至导致共心球透镜与微相机间产生相对位移,造成离焦及视场错位。根据常规的飞行条件,当飞行器颠簸时,设定的加速度为 98 m/s^2 ,其是重力加速度的 10 倍。图 8 和图 9 分别为系统受到垂直冲击力和水平

冲击力后的应力和应变位移。从图 8 和图 9 可以看到,系统在不同方向冲击后的最大应力分别为 $1.03 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 和 $1.389 \times 10^6 \text{ N/m}^2$,均远远小于材料的屈服应力 $3.257 \times 10^6 \text{ N/m}^2$;在此冲击力下,系统所产生的最大应变位移分别为 $3.43 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 和 $4.84 \times 10^{-4} \text{ mm}$,位移对成像效果的影响分析见第 4 节。

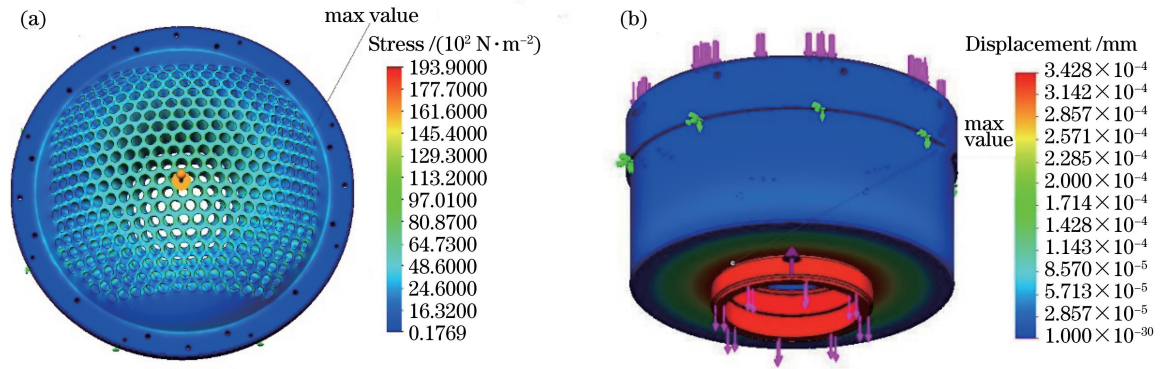


图 7 不同结构在重力作用下的应变位移。(a)球型阵列相机支架;(b)系统支架

Fig. 7 Strain displacement of different structures under gravity. (a) Spherical array camera support; (b) system support

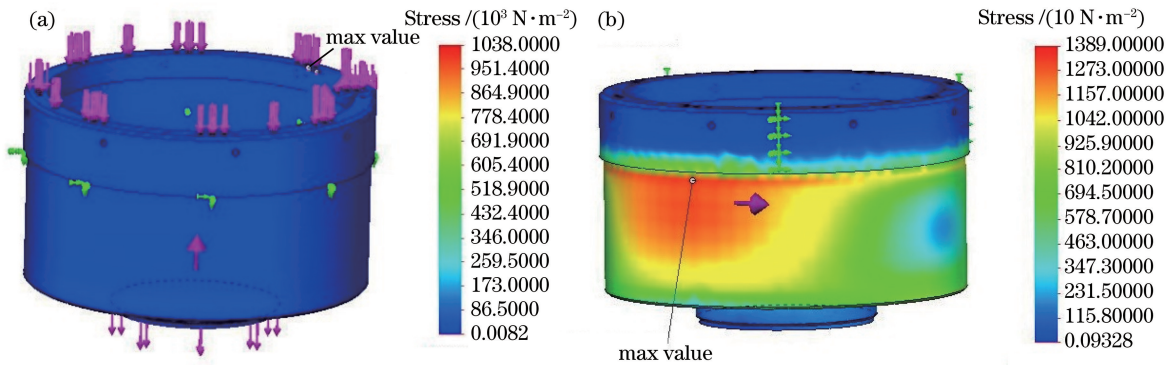


图 8 系统在不同方向冲击后的应力。(a)垂直冲击力;(b)水平冲击力

Fig. 8 Stress of system after impact in different directions. (a) Vertical impact; (b) horizontal impact

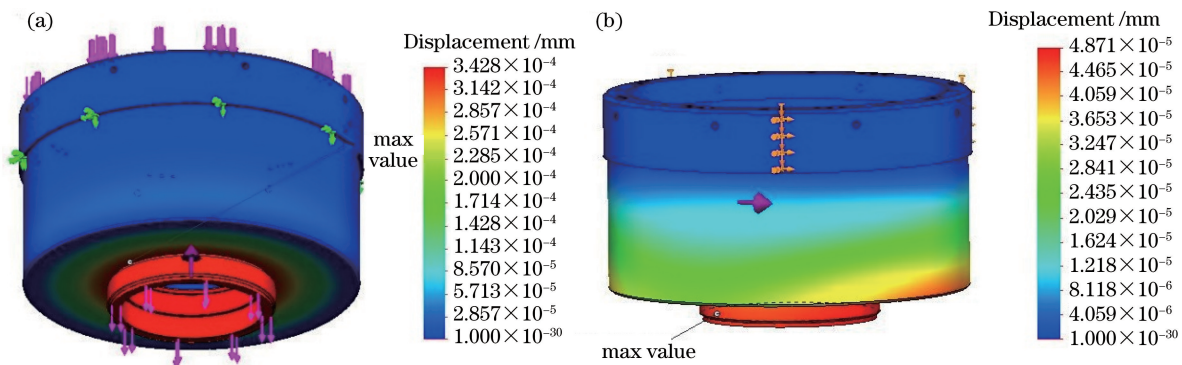


图 9 系统在不同方向冲击后的应变位移。(a)垂直冲击力;(b)水平冲击力

Fig. 9 Strain displacement of system after impact in different directions. (a) Vertical impact; (b) horizontal impact

3.3 温度影响分析

机载共心多尺度广域计算成像系统受到工作环境的限制会产生一定的温度变化,考虑到共心球透镜和微相机阵列夹持结构之间,材料的热膨胀系数不同且径向尺寸较大,这在不同的温度环境中易导致共心球透镜与微相机阵列存在共光轴难的问题,从而影响成像系统的分辨率。在低温 240 K 和高温 330 K 的环境中,对系统的应变位移进行分析研究,结果如图 10 和图 11 所示。图 10 为微相机阵列及共心球透镜支架在低温 240 K 环境下的应变位移情

况。从图 10 可以看到,微相机阵列支架有正向 1.316×10^{-2} mm 长的位移,共心球透镜支架有正向 1.710×10^{-2} mm 长的位移,其极限变化距离为 3.026×10^{-2} mm。图 11 为微相机阵列和共心球透镜支架在高温 330 K 环境下的应变位移情况。从图 11 可以看到,受到温度的影响,微相机阵列和共心球透镜支架分别有负向 8.437×10^{-2} mm 和正向 1.096×10^{-2} mm 长的位移,其极限变化距离为 9.533×10^{-2} mm。

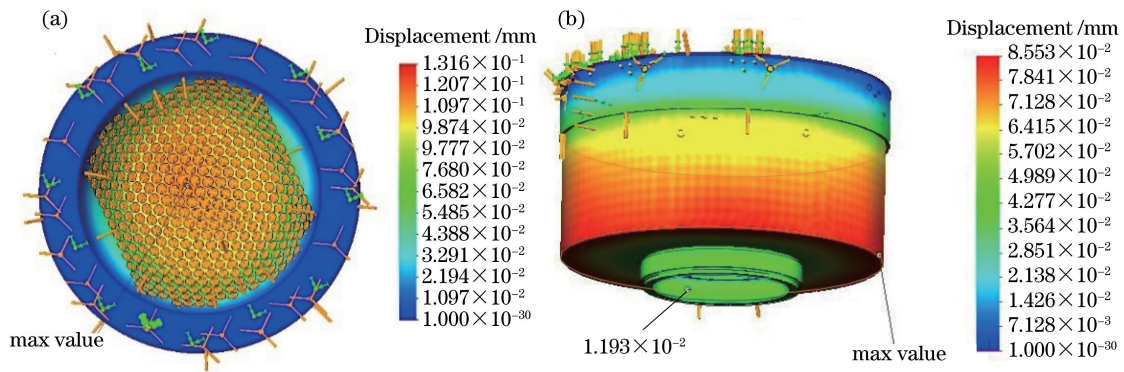


图 10 不同结构在低温 240 K 下的应变位移。(a)微相机阵列;(b)共心球透镜支架

Fig. 10 Strain displacement of different structures under low temperature 240 K.

(a) Microcamera array; (b) concentric ball lens holder

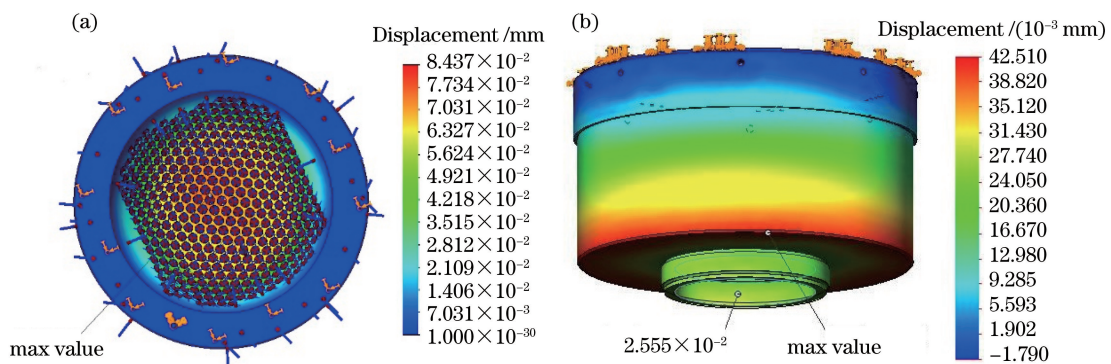


图 11 不同结构在高温 330 K 下的应变位移。(a)微相机阵列;(b)共心球透镜支架

Fig. 11 Strain displacement of different structures under high temperature 330 K.

(a) Microcamera array; (b) concentric ball lens holder

4 成像效果分析

由 3.2 节和 3.3 节分析可知,因机载平台具有特殊的工作环境,所以会影响中共心球透镜和球型微相机阵列的相对间距及同轴度,造成成像质量较差。因此,综合考虑环境温度、机械受力、玻璃折射率、透镜曲率及元件间距变化等因素,对机载共心多尺度广域计算成像系统的成像稳定性进行分析。

共心多尺度广域成像系统在低温 240 K 环境下的 MTF 曲线如图 12 所示。从图 12 可以看到,当系统的空间频率为 357 cycle/mm 时,MTF 值约为 0.1,MTF 曲线在全波段范围内的变化趋势一致并接近衍射极限,说明系统整体的成像效果良好。共心多尺度广域成像系统在低温 240 K 环境下的场曲和像散曲线如图 13 所示。从图 13 可以看到,系统的场曲值不超过 0.05 mm,畸变控制在 -0.5% 以内。共心多尺度广域成像系统在低温 240 K 环境下的点列图如图 14 所示。从图 14 可以看到,全波段

范围内的弥散斑半径的 RMS 的最大值为 1.352 μm,小于探测器像元的尺寸,但仍然满足系统的成像要求。共心多尺度广域成像系统在低温 240 K 环境下的球差及像散的校正效果较好,无离焦现象;彗差光线呈反抛物线形状,子午和弧矢方向都不存在类似的曲线,说明彗差的校正效果较好。

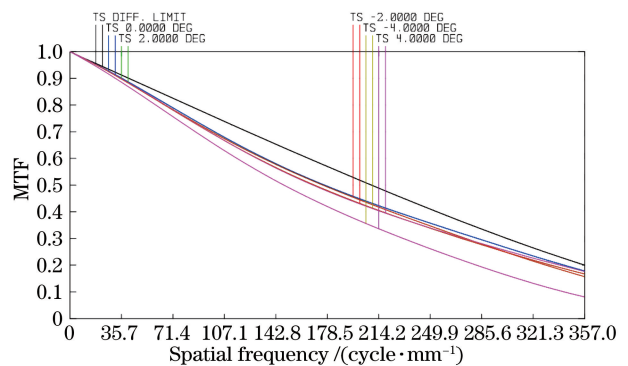


图 12 共心多尺度广域成像系统在低温 240 K 下的 MTF 曲线

Fig. 12 MTF curves of concentric multi-scale wide-area imaging system under low temperature 240 K

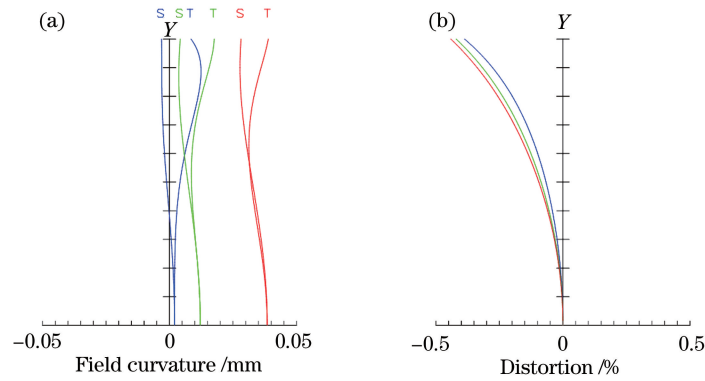


图 13 共心多尺度广域成像系统在低温 240 K 环境下的性能曲线。(a)场曲;(b)像散曲线

Fig. 13 Performance curves of concentric multi-scale wide-area imaging system under low temperature 240 K.

(a) Field curvature; (b) astigmatic curve

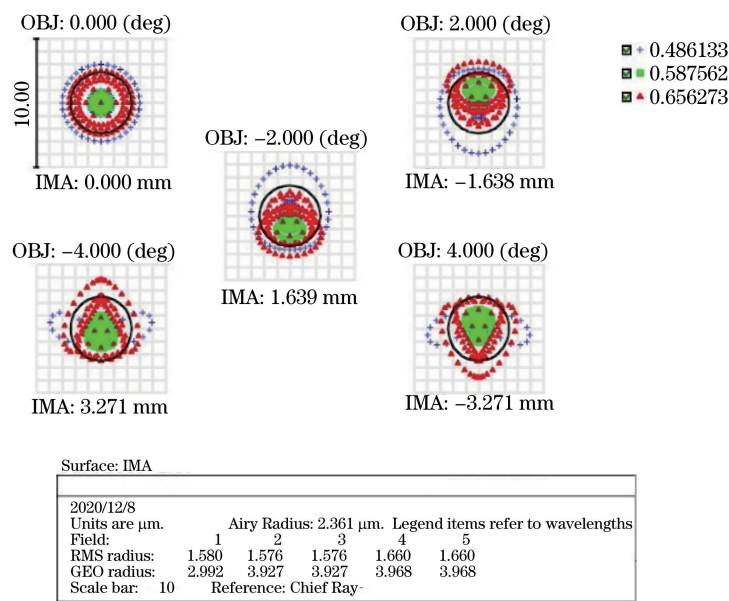


图 14 共心多尺度广域成像系统在低温 240 K 下的点列图

Fig. 14 Point diagram of concentric multi-scale wide-area imaging system under low temperature 240 K

共心多尺度广域成像系统在高温 330 K 环境下的 MTF 曲线、场曲、像散曲线、点列图和光线像差, 如图 15~17 所示。从图 15~17 可以看到, 当环境温度为 330 K 时, 由温度变化导致主透镜与微透镜阵列之间的间距减小 9.533×10^{-2} mm; 由各项结果表明, 该系统在高温的条件下也能够保证良好的成像效果。

5 结 论

为了适应机载大视场和高分辨率实时成像探测的需求, 以及解决传统机载光电成像探测系统难以同时满足大视场和高分辨率的问题, 根据共心球透镜成像的完全对称性提出一种新型机载共心多尺度广域成像系统。该系统可以有效地消除与视场有关的像差, 结合基于球形分布的次级微相机阵列可以

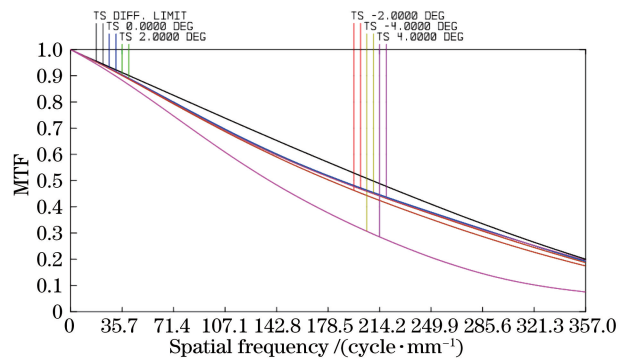


图 15 共心多尺度广域成像系统在高温 330 K 下的 MTF 曲线

Fig. 15 MTF curves of concentric multi-scale wide-area imaging system under high temperature 330 K

有效地消除残余像差。高、低温和受力分析结果表明, 机载共心多尺度广域计算成像系统在空间频率

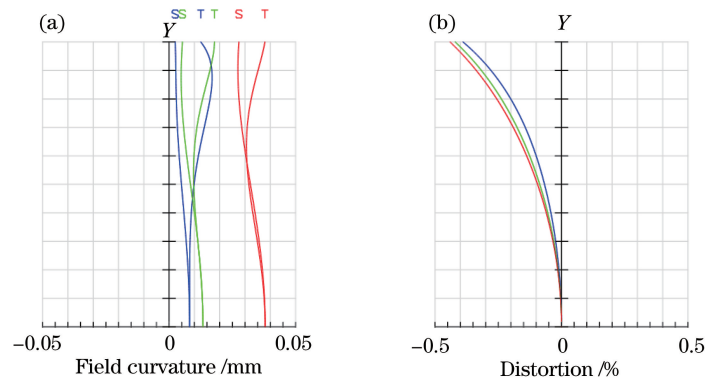


图 16 共心多尺度广域成像系统在高温 330 K 下的性能曲线。(a)场曲;(b)像散曲线

Fig. 16 Performance curves of concentric multi-scale wide-area imaging system under high temperature 330 K.

(a) Field curvature; (b) astigmatic curve

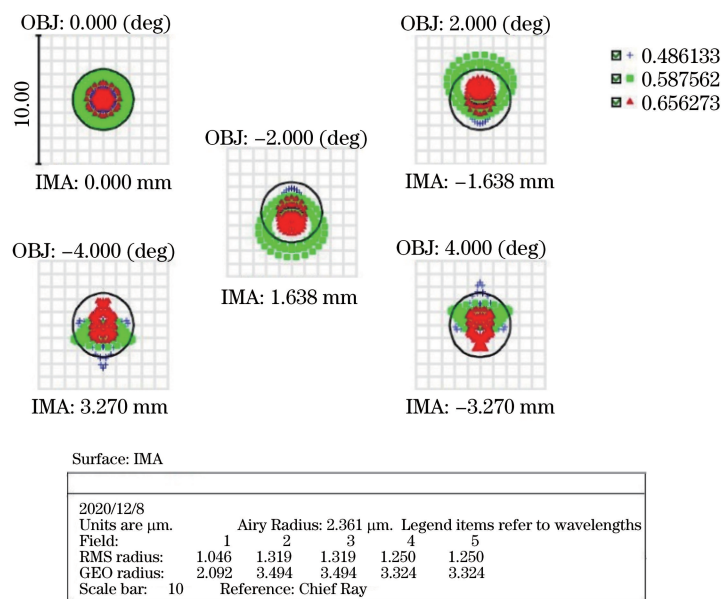


图 17 共心多尺度广域成像系统在高温 330 K 下的点列图

Fig. 17 Point diagram of concentric multi-scale wide-area imaging system under high temperature 330 K

为 357 cycle/mm 处接近衍射极限,弥散斑半径的 RMS 值小于探测器的像元尺寸,满足设计要求。综上所述,机载共心多尺度广域计算成像系统具有结构稳定性好和成像效果优良的优点,可以获得大视场高分辨率图像,这在一定程度上为大视场、超高分辨率成像与探测的发展奠定理论和技术基础。所提系统虽已完成结构的设计,但若搭载在飞行器的平台中,仍需要进一步解决海量数据的快速处理、硬件电路的数据接口以及飞行器的平台对接等问题。

参 考 文 献

[1] Yan A, Yang J F, Cao J Z, et al. Optical system design of space fisheye camera [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1022004.
闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 等. 航天鱼眼相机光学系

统设计的研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022004.

[2] Wu X X, Wang X R, Guo B T, et al. Analysis on detection capability of airborne optoelectronic system based on monocentric multiscale imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0422001.
吴雄雄, 王晓蕊, 郭冰涛, 等. 基于同心多尺度成像的机载光电系统探测能力分析 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0422001.

[3] van der Meij B, Kooistra L, Suomalainen J, et al. Remote sensing of plant trait responses to field-based plant-soil feedback using UAV-based optical sensors [J]. Biogeosciences, 2017, 14(3): 733-749.

[4] Zhou G, Zhai L P, Wang D J, et al. Research of scanning angle of panoramic aerial camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2473-2478.

- 周刚, 翟林培, 王德江, 等. 全景式航空相机的扫描角研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2473-2478.
- [5] Mei G, Zhai Y, Miao J Y, et al. Design of a high resolution and wide field space infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222004.
梅贵, 翟岩, 苗健宇, 等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222004.
- [6] Leininger B, Edwards J, Antoniadis J, et al. Autonomous real-time ground ubiquitous surveillance-imaging system (ARGUS-IS) [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6981: 69810H.
- [7] Xu F G. Research on design of wide field of view high resolution imaging optical system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
徐奉刚. 大视场高分辨率成像光学系统设计研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2017.
- [8] Wang S Z, Heidrich W. The design of an inexpensive very high resolution scan camera system [J]. Computer Graphics Forum, 2004, 23(3): 441-450.
- [9] Wang M, Zhou S D, Li J S, et al. On real-time panoramic imaging equipment onboard UAVs [J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(11): 81-83.
王敏, 周树道, 李济生, 等. 微型无人机载实时全景成像设备研究[J]. 电光与控制, 2015, 22(11): 81-83.
- [10] Keck M, Galup L, Stauffer C. Real-time tracking of low-resolution vehicles for wide-area persistent surveillance [C] // 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), January 15-17, 2013, Tampa, FL, USA. New York: IEEE, 2013: 441-448.
- [11] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, et al. Multiscale gigapixel photography [J]. Nature, 2012, 486(7403): 386-389.
- [12] 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): C54-C63.
- [13] Llull P, Bange L, Phillips Z, et al. Characterization of the AWARE 40 wide-field-of-view visible imager [J]. Optica, 2015, 2(12): 1086.
- [14] Marks D L, Son H S, Kim J, et al. Engineering a gigapixel monocentric multiscale camera [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 083202.
- [15] Yao Y, Xu Y S, Ding Y L, et al. Optical-system design for large field-of-view three-line array airborne mapping camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(9): 2334-2343.
姚园, 许永森, 丁亚林, 等. 大视场三线阵航空测绘相机光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2334-2343.
- [16] Lohmann A W. Scaling laws for lens systems [J]. Applied Optics, 1989, 28(23): 4996-4998.
- [17] Milojkovic P, Mait J N. Space-bandwidth scaling for wide field-of-view imaging [J]. Applied Optics, 2012, 51(4): A36-A47.
- [18] 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.
- [19] Nakamura T, Kittle D S, Youn S H, et al. Autofocus for a multiscale gigapixel camera [J]. Applied Optics, 2013, 52(33): 8146-8153.
- [20] Brady D J, Hagen N. Multiscale lens design [J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10659-10674.
- [21] Liu F, Wei Y Z, Han P L, et al. Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 084201.
刘飞, 魏雅喆, 韩平丽, 等. 基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 084201.
- [22] Nichols J M, Judd K P, Olson C C, et al. Range performance of the DARPA AWARE wide field-of-view visible imager [J]. Applied Optics, 2016, 55(16): 4478-4484.
- [23] Gao Z J. Research on vibration characteristics of airborne photoelectric platform measurement technique [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
高紫俊. 机载光电平台振动特性测量技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.