

机载新颖连续变焦中波红外光学系统设计

付艳鹏¹, 金宁¹, 李训牛¹, 王海洋¹, 张元², 李力¹, 李林¹

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 总装备部防化驻昆明地区军事代表室, 云南 昆明 650221)

摘要:针对制冷式 640×512 元凝视焦平面阵列探测器, 设计了结构紧凑的高性能机械补偿30倍连续变焦光学系统. 该系统采用新颖的三组元变焦形式和三次成像方法设计. 工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, $F/\# = 4$, 变焦范围 $750 \sim 25 \text{ mm}$. 首先利用光学设计软件给出了系统的光学外形结构图; 然后, 进行了像质评价分析, 变焦曲线分析, 温度环境适应性分析和冷反射分析; 最后, 介绍了该系统应用微扫描成像技术提高分辨率的方法. 结果表明, 该光学系统在空间频率 30 lp/mm 处的光学传递函数(MTF)值均接近衍射极限, 弥散斑直径的均方根(RMS)值均小于 $15 \mu\text{m}$. 变焦曲线平滑, 且移动组最大行程小于 71 mm . 移动组透镜的轴向移动可完成系统调焦及温度补偿. 光学系统满足 100% 冷光阑效率, 在 $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内均有良好的像质. 同时, 满足新一代机载前视红外(FLIR)系统的要求.

关键词: 红外连续变焦; 三组元变焦; 三次成像

中图分类号: TN216 文献标识码: A

Airborne novel design for MWIR continuous zoom optical system

FU Yan-Peng¹, JIN Ning¹, LI Xun-Niu¹, WANG Hai-Yang¹, ZHANG Yuan², LI Li¹, LI Lin¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. Military Representation Office of General Armaments Department in Kunming Area, Kunming 650221, China)

Abstract: A compact, high-performance optical system with mechanical compensation was designed with a 30 times continuous zoom for a 640×512 -element cooled staring focal plane array detector. The system was designed using the novel three-group zoom in the form and thrice imaging methods. The system operates in the waveband of $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$. $F/\# = 4$. The zoom ranges from 750 mm to 25 mm . First, gives the schematic drawing of the optical system was obtained with the optical design software. Then, the optical design software has the analysis of the image quality evaluation, the zoom curve analysis, the temperature environment adaptability analysis, and the Narcissus were analyzed with the same software. Finally, the paper proposed a way to improves the resolution of the system using micro-scan imaging technology. The results show that the modulation transfer function (MTF) of the optical system is close to the diffraction limit at a spatial frequency of 30 lp/mm and the root-mean-square value of its diffusion spot diameter is less than $15 \mu\text{m}$. Zoom curve is smooth and the maximum displacement of the move group is less than 71 mm . The focusing and the temperature compensating of the system were achieved via the axially moving of the mobile group lens. The optical system satisfies 100% cold-shield efficiency and has good image quality in the temperature range of $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Meanwhile the optical system meets the requirements of the new generation of airborne forward looking infrared (FLIR) system.

Key words: infrared continuous zoom; three-group zoom; thrice imaging

PACS: 07.57.-c, 42.15.Eq

引言

新一代机载红外光电设备的发展方向主要集中在大变倍比、高分辨力、小型化方面^[1]. 随着红外探测器材料、集成电路快速发展和有关算法的改进, 大

大提高了红外探测器的性能. 利用红外被动探测的特点, 在强电子干扰的条件下, 对隐形机、无人机、导弹等有较强探测、识别能力. 机载红外热像系统已经成为机载光电设备中的重要组成部分. 因此, 研究满足大变倍比、长焦距、结构紧凑的红外热像光学系统

收稿日期: 2012-03-26, 修回日期: 2012-10-29

基金项目: 预研项目支持

Foundation items: Supported by pre-research project

作者简介 (Biography): 付艳鹏 (1982-), 男, 黑龙江人, 博士研究生, 工程师, 主要从事红外光学系统设计方面的研究. E-mail: yanpengfu@163.com

Received date: 2012-03-26, revised date: 2012-10-29

具有重要意义. 采用机械补偿连续变焦的光学系统具有变倍比大, 能实现大视场搜索和窄视场对目标瞄准、跟踪的优点. 但现有国内文献报道的红外连续变焦光学系统变倍比不大于 20 倍, 长焦距不大于 550 mm, 且变焦移动组行程较长. 文献均为针对 320×240 元 $30 \mu\text{m}$ 或 640×512 元 $20 \mu\text{m}$ 探测器的设计^[2-6], 而采用 640×512 元 $15 \mu\text{m}$ 制冷型探测器的 30 倍连续变焦光学系统国内还未见报道. Yoram Aron 等^[7]报道的 30 倍连续变焦系统和 Mark C. Sanson 等^[8]报道的 30 倍连续变焦系统, 系统 F/# 分别为 4.7 和 4.5, 应用于 F/# 为 4 的探测器存在局限性.

针对上述问题, 本文采用三组元变焦、三次成像方法设计了应用于 640×512 元 $15 \mu\text{m}$ 中波红外制冷型探测器的 30 倍连续变焦光学系统. 光学系统采用新颖的三组元变倍形式: 一次成像组变倍比 15 倍, 二次成像组 2 倍, 有效解决 30 倍变倍比情况下移动组透镜行程过长的问题(移动组最大行程小于 71 mm). 通过在光路的二次成像组前、后加入两个反射镜, 使系统具有紧凑的结构, 以满足小型化需求. 系统 F/# 为 4, 在 750 ~ 25 mm 焦距范围内具有优良的像质. 设计结果对今后大变倍比连续变焦系统设计具有一定的参考和应用价值.

1 设计实例

1.1 光学设计指标

光学系统设计指标如表 1 所示. 采用制冷型 640×512 元凝视焦平面阵列探测器, 但在中波红外连续变焦光学系统的设计中, 使用了 640×480 元. 设计波长按探测器响应波长范围 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 设置. 像面大小 $4.8 \times 3.6 \text{ mm}$ (640×480 元, $15 \mu\text{m}$). 焦距从 750 ~ 25 mm 连续变化, 对应视场由 $0.73^\circ \times 0.55^\circ \sim 22.5^\circ \times 16.9^\circ$ 连续变化. 由于光学系统长焦距 750 mm, 在尽量减小第一片大物镜口径且满足系统 F/#4 不变, 保证系统冷光阑效率 100% 的情况下, 选用机械补偿三组元变焦、三次成像光学系统结构.

表 1 设计指标

Table 1 Parameters of optical design

Wavelength Band	3.7 ~ 4.8 μm
Focal Length	750 ~ 25 mm
F-number	4
0.7 field MTF (30 lp/mm)	$\geq 30\%$ (Design)
RMS of spot diameter	$\leq 15 \mu\text{m}$ (Design)
Temperature Range	$-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$
Transmission	$> 60\%$
Dimensions (L \times W \times H)	350 mm \times 240 mm \times 250 mm

1.2 设计结果

最终的系统设计结果如图 1 所示. 在系统设计中一次成像组采用了“+、-、+、-”光焦度分配形式; 二次成像组采用“+、-、-”光焦度分配形式; 三次成像组采用“+、-、-”光焦度分配形式. 光学系统中共使用了 10 个透镜, 其中 3 个非球面, 1 个衍射面, 其余均为球面. 使用了 Si、Ge 和 ZnSe 三种材料. 估算光学系统透过率为 66%, 满足系统设计要求. 图 1 (a) 中所示, Zoom Lens 1、Zoom Lens 2、Zoom Lens 3 分别为变焦组、补偿组和二次成像变倍组.

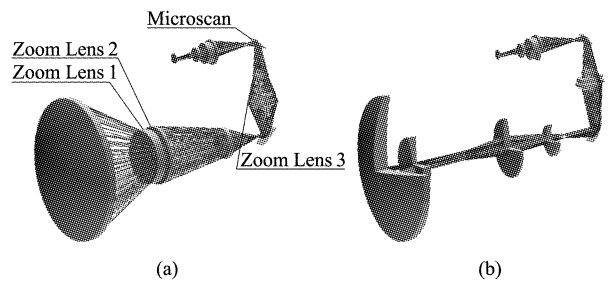


图 1 光学系统外形 3D 图 (a) 超窄视场, (b) 宽视场
Fig. 1 3D layout drawing of optical system (a) SNFOV, and (b) WFOV

通过三组元透镜的移动, 实现系统焦距 750 ~ 25 mm 的连续变化, 其 Zoom Lens 1 行程 70.86 mm, Zoom Lens 2 行程 33.37 mm, Zoom Lens 3 行程 17.97 mm. 可通过对 Zoom Lens 3 透镜的轴向微动, 实现光学系统的温度补偿和系统调焦. 采用两片反射镜对光路进行折转, 系统光学外形尺寸为 310 mm \times 190 mm \times 230 mm (长 \times 宽 \times 高), 满足系统小型化设计的尺寸要求.

2 系统分析

2.1 像质评价

如图 2 所示, 系统超窄视场 (SNFOV)、窄视场 (NFOV)、中视场 (MFOV) 和大视场 (WFOV) 四个状态下, 轴上视场的 MTF 性能接近衍射极限. 0.7 视场在 30 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.3. 宽视场的传递函数值在全视场有显著的下降, 但仍处在允许的范围内, 其余各视场的传递函数曲线均较好. 系统传递函数理想值焦距变化过程中各位置的弥散斑的均方根值均小于 $15 \mu\text{m}$, 典型位置的数据如表 2 所示.

2.2 变焦曲线分析

图 3 是连续变焦透镜组运动轨迹图. 横坐标为系统焦距, 纵坐标为移动透镜组相对于第一面大物

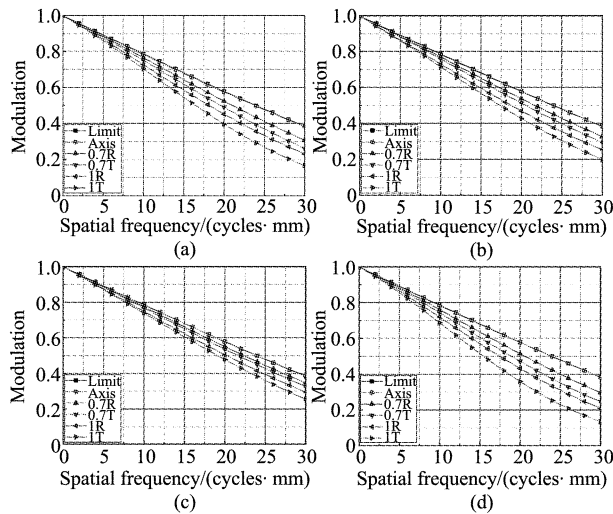


图2 MTF 曲线图(a)超窄视场(EFL = 750 mm), (b)窄视场(EFL = 600 mm), (c)中视场(EFL = 320 mm), (d)宽视场(EFL = 25mm)

Fig. 2 MTF curves of zoom optical system(a) SNFOV (EFL = 750 mm), (b) NFOV (EFL = 600 mm), (c) MFOV (EFL = 320 mm), (d) WFOV (EFL = 25 mm)

镜移动的距离. 焦距 EFL = 750 mm 时, Zoom lens 1 位置为 105.91 mm, Zoom lens2 位置为 109.97 mm, Zoom lens3 位置为 246.43 mm; 在焦距 EFL = 600.73mm 时, Zoom lens1 位置为 103.96 mm, Zoom lens2 位置为 110.65 mm, Zoom lens3 位置为 250.34 mm; 在焦距 EFL = 494.11mm 时, Zoom lens1 位置为 101.37 mm, Zoom lens2 位置为 111.39 mm, Zoom lens3 位置为 252.70 mm; 在焦距 EFL = 408.82mm 时, Zoom lens1 位置为 98.40 mm, Zoom lens2 位置为 111.93 mm, Zoom lens3 位置为 254.55 mm; 在焦距 EFL = 320 mm 时, Zoom lens1 位置为 94.43 mm, Zoom lens2 位置为 112.31 mm, Zoom lens3 位置为 256.81 mm; 在焦距 EFL = 195.59 mm 时, Zoom lens1 位置为 88.51 mm, Zoom lens2 位置为 115.82 mm, Zoom lens3 位置为 260.40 mm; 在焦距 EFL = 110.29 mm 时, Zoom lens1 位置为 81.94 mm, Zoom lens2 位置为 125.72 mm, Zoom lens3 位置为 262.68 mm; 在焦距 EFL = 46.32 mm 时, Zoom lens1 位置为 60.09 mm, Zoom lens2 位置为 137.38 mm, Zoom lens3 位置为 263.95 mm; 在焦距 EFL = 25 mm 时, Zoom lens1 位置为 35.05 mm, Zoom lens2 位置为 143.34 mm, Zoom lens3 位置为 264.40 mm. 从图 3 中可以看出, 三组变焦透镜组的运动轨迹是平滑的.

变焦系统采用高精密度导轨与伺服电机进行精密控制, 利用位移传感器进行位置坐标反馈. 按焦距均

表 2 弥散斑的均方根值(微米)

Table 2 Root-mean-square value of dispersed speckle (μm)

EFL/mm	Axial	0.7 FOV	1 FOV
750	6	9	13
600	6	10	12
510	6	8	14
427	4	9	13
320	4	8	11
225	4	4	7
158	2	4	5
110	2	5	8
77	2	6	10
54	3	8	12
38	5	9	14
25	6	10	15

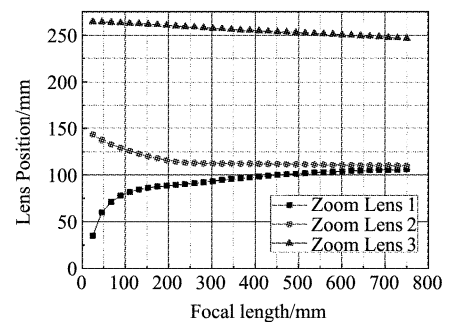


图3 变焦透镜组运动轨迹图

Fig. 3 Zoom lens track

匀变化采集 200 个焦距位置状态下, 移动组透镜的位置坐标值、温度补偿量值和系统调焦值, 列表存储于 EEPROM. 系统在不同使用环境中通过软件提取数据列表值和修正值反馈给伺服控制系统, 控制精度 ± 0.005 , 从而实现全焦距范围内清晰成像.

2.3 环境适应性分析

红外材料光学特性受温度影响变化较大. 透镜材料的折射率、曲率半径、厚度在温度变化时发生改变, 造成系统像面离焦. 该系统采用高精密度导轨和电机伺服控制移动组透镜轴向移动, 补偿温度变化引起的像面离焦, 使系统在 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围内可以清晰成像. 通过调整移动透镜组 Zoom Lens 3 沿光轴方向的移动, 补偿温度造成的系统离焦. 在超窄视场状态下进行温度补偿, Zoom Lens 3 移动量为 1.37 mm. 在宽视场状态下进行温度补偿, Zoom Lens 3 移动量为 0.39 mm. 图 4 为超窄视场和宽视场时, 在 -40°C 和 60°C 状态下的 MTF 曲线图. 从图 4 可以看出, 在 -40°C 和 60°C 温度时, 光学系统 MTF 曲线变化不大, 且在 30 lp/mm 频率处, 轴上传函均接近衍射极限. 0.7 视场虽有所下降, 但仍大于 0.2, 满

足系统设计要求。

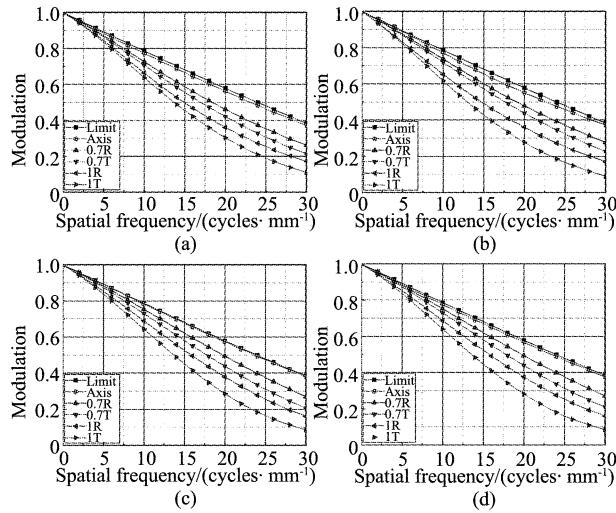


图4 不同温度和视场下的MTF曲线图(a)超窄视场-40℃MTF曲线,(b)超窄视场60℃MTF曲线,(c)宽视场-40℃MTF曲线,(d)宽视场60℃MTF曲线
Fig.4 MTF curves for different field of view and Temperature(a) MTF curves for SNFOV at temperature -40℃, (b) MTF curves for SNFOV at temperature 60℃, (c) MTF curves for WFOV at temperature -40℃, (d) MTF curves for WFOV at temperature 60℃

2.4 冷反射分析

通常,采用制冷式红外探测器的红外光学系统受冷反射影响较大.因此,对系统进行冷反射分析是十分必要的.本文分析了在SNFOV (EFL = 750 mm)、MFOV (EFL = 320 mm)、WFOV (EFL = 25 mm)三个状态下所有透镜表面的相对冷反射强度比率.从图5中可以看出,WFOV状态下第1、4、7、8面的冷反射强度比率为1,但是反射方向是由探测器指向镜头方向,因此不会在探测器靶面形成冷反射现象.只有WFOV状态下第2面冷反射强度最大,其值为0.47.因此,该面增透膜的反射率应控制在0.3%以内.

2.5 微扫描成像技术

探测器单元之间存在间隙,因此,欠采样频率混淆(欠采样噪声)是红外焦平面成像系统普遍存在且难以避免的问题^[9].微扫描作为一种有效抑制欠采样频率谱混淆的技术,能出色的提高红外焦平面成像的分辨率,因而大大提高系统性能.典型的微扫描模式如图6所示.考虑到系统的复杂性,本系统选用2×2微扫描模式,图1(a)中Microscan为微扫描器.过采样数为1,水平和垂直采样步长分别为 Δ_h

$$= \frac{P_h}{2}, \Delta_v = \frac{P_v}{2}.$$

其中,探测器的水平间隔尺寸 P_h ,垂

直间隔尺寸 P_v .在本系统中,微扫描反射摆镜的二维微动角为 $0.16'$.

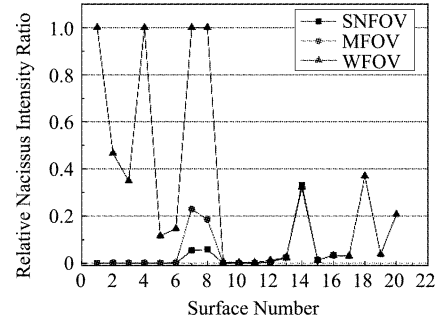


图5 系统所有表面的相对冷反射强度比率
Fig.5 Narcissus intensity ratio on all surfaces of the zoom optics

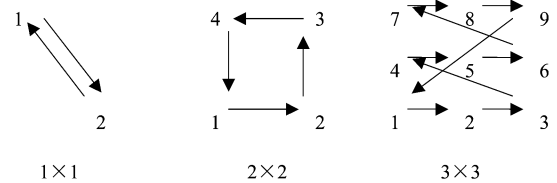


图6 典型微扫描模式
Fig.6 Typical micro-scan mode

3 结论

设计的机载新颖连续变焦中波红外光学系统, F/# = 4, 工作波段 3.7 ~ 4.8 μm . 采用三组元、三次成像设计, 系统实现焦距从 750 ~ 25 mm 的连续变焦, 变倍比 30 倍. 通过像质分析、变焦曲线分析、环境适应性分析可以得出: 在 40 ~ 60℃ 温度范围内, 系统在 30 lp/mm 处轴上 MTF 值均大于 0.3, 且像质变化不大. 变焦曲线平滑, 移动组最大行程小于 71 mm. 微扫描技术的应用, 提高了系统分辨率. 该系统具有变倍比大、分辨率高、结构紧凑等特点. 因此, 可以广泛应用于机载红外光学系统.

REFERENCES

[1] LIU Xun, WANG Guo-Hua, MAO Da-Peng, et al. Developing trend and technological analysis of warplane optoelectronic platforms [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics* (刘润, 王国华, 毛大鹏, 等. 军用飞机光电平台的研发趋势与技术剖析. *中国光学与应用光学*), 2009, 2 (4): 269 - 288.

[2] GAO Hong-Yun, XIONG Tao, YANG Chang-Cheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. *Opt Precision Eng.* (郜洪云, 熊涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统. *光学精密工程*), 2008, 16(10): 1891 - 1894.

(下转第 324 页)

3 结论

提出并实现了一种基于迭代的小光斑 LiDAR 波形分解方法. 主要创新点在于: 通过比较滤波前后波形数据的峰值差, 准确估计了任意波形的噪声; 提出了通过层层剥离的策略, 进行波形分量特征参数初值的预估, 克服了传统方法中查找波形特征点的难点; 引入 L-BFGS 算法, 优化了波形分量特征参数的初始预估. 文中方法能准确分解出复杂重叠高斯分量及微弱高斯分量, 提高了测距的分辨率和精度. 未来的研究包括如何有效利用波形分量的特征参数对地物分类及生成数字高程模型等.

REFERENCES

- [1] Blair J, Rabined D, Hofton M. The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, **54** (2-3): 115 - 122.
- [2] LI Qi, MA Hong-Chao. The study of point-cloud production method based on waveform laser scanner data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (李奇, 马洪超. 基于激光雷达波形数据的点云生产. *测绘学报*), 2008, **37** (3): 349 - 354.
- [3] Reitberger J, Krzystek P, Stilla U. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29** (5): 1407 - 1431.
- [4] Hofton M A, Minster J B, Blair J B. Decomposition of laser altimeter waveforms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38** (4): 1989 - 1996.
- [5] Jutzi B, Stilla U. Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, **61** (2): 95 - 107.
- [6] Roncat A, Wagner W, Melzer T, et al. Echo detection and localization in full-waveform airborne laser scanner data using the averaged square difference function estimator [J]. *Photogrammetric Journal of Finland*, 2008, **21** (1): 62 - 72.
- [7] Zwally H, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice atmosphere, ocean, and land [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, **34** (3): 405 - 445.
- [8] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, **60** (2): 100 - 112.
- [9] Taubin G. A signal processing approach to fair surface design: Proceedings of the 22nd Annual ACM Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1995 [C]. New York: ACM, 1995: 351 - 358.
- [10] Lin Y, Mills J, Smith-Voysey S. Rigorous pulse detection from full-waveform airborne laser scanning data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31** (5): 1303 - 1324.
- [11] Xue Yi. *Numerical analysis and scientific computation* [M]. Beijing: Science Press (薛毅. *数值分析与科学计算*. 北京: 科学出版社), 2001.
- [3] ZHANG Ting-Cheng, LIU Li-Ping, CHANG Jun, et al. Design of infrared zoom system with 4 reflective mirrors [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (张庭成, 刘莉萍, 常军, 等. 四反射镜红外变焦距系统设计. *红外与毫米波学报*), 2010, **29** (3): 196 - 200.
- [4] CHEN Lu-Ji, LI Ping, MA Ling. Compact MWIR zoom system. [J]. *Infrared Technology* (陈吕吉, 李萍, 马琳. 紧凑中波红外连续变焦光学系统设计. *红外技术*), 2010, **32** (10): 652 - 666.
- [5] XU Zhao-Dong, LIU Xin, DONG Tao. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J]. *Infrared and laser engineering* (许照东, 刘欣, 董涛. 机载高分辨率连续变焦红外热像仪设计. *红外与激光工程*), 2007, **36** (5): 619 - 621.
- [6] ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. *Journal of applied optics* (张良. 中波红外变焦距系统的光学设计. *应用光学*), 2006, **27** (1): 1038 - 1043.
- [7] Aron Y, Boubis I, Shavit R. Topaz: a novel design of a high magnification athermalized 1:30 zoom in the MWIR [J]. *SPIE*, 2004, 5406: 97 - 106.
- [8] Sanson M C, Cornell J. MWIR continuous zoom with large zoom range [J]. *SPIE*, 2010, 7660: 76601X1 - 12.
- [9] ZHANG Jian-Qi, WANG Xiao-Rui. *Photoelectric imaging system modeling and performance evaluation theory* [M]. Xian: Xidian University Press (张建奇, 王晓蕊. *光电成像系统建模及性能评估理论*, 西安: 西安电子科技大学出版社), 2010: 66 - 68.

(上接 312 页)