

# 移动地面站宽温度跟瞄系统信标接收镜头

李响\*, 柳鸣, 王超, 李小明, 张家齐, 白杨杨, 孟立新, 张立中  
(长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:**为了保证移动地面站光电跟瞄系统在野外复杂环境下具有稳定的跟踪精度,针对 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽工作温度范围下信标接收镜头成像光斑弥散的问题,进行了光学系统与光机结构的设计,提出了一种以步进电机驱动补偿镜组的温度补偿方案。分析了极限温度条件下光学系统性能的改变以及不同温度补偿方案的效果,针对光电跟瞄系统的指标要求,设计了光机结构并进行了力学、光学性能的分析。分析结果表明,系统一阶模态为 $370\text{ Hz}$ ;补偿镜组向前移动 $0.695\text{ mm}$ 能够补偿 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时光学系统成像光斑的弥散,令中心视场光斑尺寸由 $73\text{ }\mu\text{m}$ 降为 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ ,边缘视场光斑尺寸由 $77\text{ }\mu\text{m}$ 降为 $15.7\text{ }\mu\text{m}$ ;向后移动 $0.8856\text{ mm}$ 能够补偿 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时成像光斑的弥散,令中心视场光斑尺寸由 $94\text{ }\mu\text{m}$ 降为 $3.9\text{ }\mu\text{m}$ ,边缘视场光斑尺寸由 $96\text{ }\mu\text{m}$ 降为 $21.8\text{ }\mu\text{m}$ ;使用ZYGO干涉仪对光学系统的像质进行检测,波像差RMS值(均方根值)为 $0.061\lambda$ ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),PV值(峰谷值)为 $0.466\lambda$ ,能够满足跟瞄系统指标要求。

**关键词:**激光通信;移动地面站;跟瞄系统;信标接收镜头

中图分类号:TN929.13 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20181105.0790

## Wide temperature range beacon receiver lens for tracking and aiming system of mobile ground station

LI Xiang\*, LIU Ming, WANG Chao, LI Xiao-ming, ZHANG Jia-qi,  
BAI Yang-yang, MENG Li-xin, ZHANG Li-zhong

(National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics  
Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: abelfeel@163.com

**Abstract:** In order to ensure the stable tracking accuracy of the photoelectric tracking and aiming system of the mobile ground station in the complex environment in the field, the optical system and optical structure are designed to solve the problem of imaging spot dispersion of the beacon receiving lens under the working temperature width of  $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A temperature compensation scheme for driving the compensation lens group with a stepping motor is proposed. The change of optical system performance under extreme temperature conditions and the effect of different temperature compensation schemes are analyzed. According to the requirements of photoelectric tracking and aiming system, the opto-mechanical structure is designed and the mechanical and optical properties are analyzed. The analysis results show that the first-order mode of the system is  $370\text{ Hz}$ ; the compensation lens group moves forward by  $0.695\text{ mm}$  to compensate the dispersion of the optical system ima-

收稿日期:2017-11-29;修订日期:2018-01-16

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(No. 91338116)

Supported by Major Research Projects of National Natural Science Foundation(No. 91338116)

ging spot at  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the central field spot size is reduced from  $73\text{ }\mu\text{m}$  to  $3.2\text{ }\mu\text{m}$  and the edge field spot size is reduced from  $77\text{ }\mu\text{m}$  to  $15.7\text{ }\mu\text{m}$ ; moving back  $0.8856\text{ mm}$  can compensate for the dispersion of the imaging spot at  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , reducing the central field spot size from  $94\text{ }\mu\text{m}$  to  $3.9\text{ }\mu\text{m}$ , and the edge field spot size from  $96\text{ }\mu\text{m}$  to  $21.8\text{ }\mu\text{m}$ . The image quality of the optical system is also detected using a ZYGO interferometer. The RMS (root mean square) value of the wave aberration is  $0.061\lambda$  ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ ), and the PV (peak-to-valley) value is  $0.466\lambda$ , which can satisfy the index requirements of the tracking and aiming system.

**Key words:** laser communication; mobile ground station; tracking and aiming system; wide temperature range; beacon receiver lens

## 1 引言

随着空间光学的不断发展,光学遥感器的分辨率越来越高,星地下行通信链路的速率需求也逐渐提高到 Gbps 量级,接近射频通信速率的理论极限,因此空间无线激光通信技术已经成为了当前空间光学研究的热点之一。星地激光通信地面激光接收系统是开展星地激光通信链路不可或缺的重要组成部分,并常采用移动式地面站的方式来满足激光通信星地链路高可通率的要求。由于野外环境较为复杂,在环境温度发生改变时会使光学系统产生离焦,最终导致光电跟瞄系统跟踪精度的降低,影响整个激光通信链路。在移动地面站的研制过程中,迫切需要一种可在较宽温度范围内工作的跟踪镜头,为移动地面站光电跟瞄系统的研制提供先期技术基础。

目前广泛使用的温度补偿方式有3种,分别是机械被动式、光学被动式以及机电主动式<sup>[1]</sup>。机械被动式温度补偿技术<sup>[2-3]</sup>利用特定温度性能的机械材料以热胀冷缩的原理来移动元件,使元件的位移与温度效应互相补偿以实现无热化设计。该方式只能调整较小的位移,由于材料种类有限,一般并不能完全达到补偿的预期效果。光学被动式温度补偿技术<sup>[4-9]</sup>是利用光学材料本身温度特性的差异以及光学特性,选择不同光学和温度特性的材料进行匹配,使系统的光学性能和热性能满足要求,缺点是某种特性的光学材料可能并不存在,使光学被动式方法产生了局限性。机电主动式温度补偿技术<sup>[10]</sup>通过驱动光学元件产生位移实现温度补偿,移动范围大、原理比较简单,实际应用中更容易实现。

针对移动地面站光电跟瞄系统的自身特点,设计了一种用于较宽工作温度范围的信标接收镜头,采用机电主动温度补偿方式消除了野外复杂温度环境对于光学系统产生的不利影响,保证了光电跟瞄系统所接收信标光的成像质量,通过有限元分析软件 ANSYS、光学设计软件 CODE V 进行了仿真,验证了该系统的可行性和有效性。

## 2 原理

### 2.1 光学系统设计

根据移动地面站跟瞄系统的指标要求,信标接收光学系统的通光口径为  $150\text{ mm}$ ,视场(跟踪视场)为  $5\text{ mrad}$ ,选用分辨率  $1024 \times 1024$ ,像元尺寸  $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$  的相机,单个像元的角分辨率可达到  $5\text{ }\mu\text{rad}$ ,通过以下公式可以计算出光学系统的焦距:

$$f = \frac{p \cdot n}{\omega}, \quad (1)$$

式中, $f$ 为光学系统焦距; $p$ 为像元大小; $n$ 为像元数量; $\omega$ 为信标接收光学系统视场角。

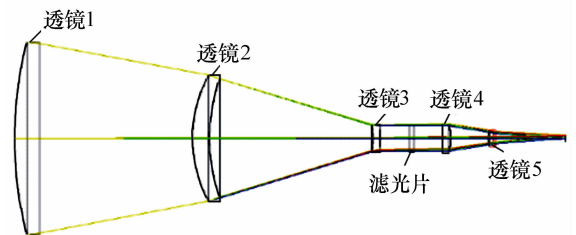


图1 光学设计图

Fig. 1 Diagram of optical design

通过公式(1)可以计算出光学系统的焦距为  $1024\text{ mm}$ ,光学设计如图1所示,光学系统点列图

如图 2(a) 所示,最大光斑尺寸为  $5.18 \mu\text{m}$ ,能够  
满足光斑尺寸小于  $5 \times 5$  个像元( $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ )

的指标要求。光学系统的 MTF 曲线如图 2(b) 所  
示,接近衍射极限像质能够满足要求。

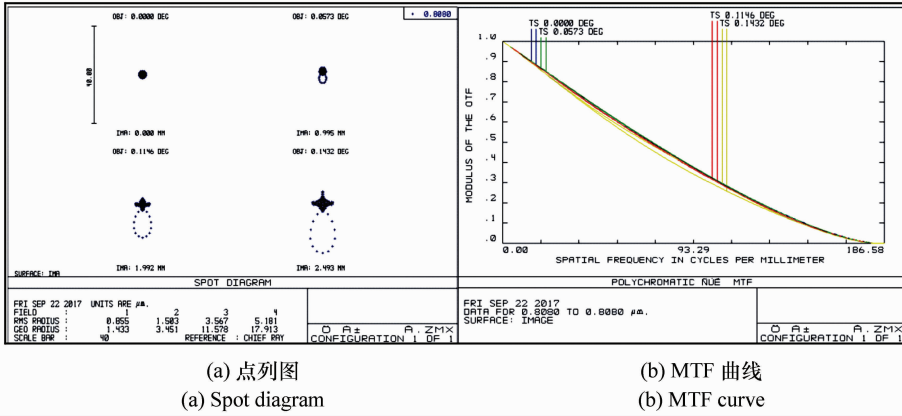


图 2 光学系统点列图以及 MTF 曲线

Fig. 2 Spot diagram and MTF curve of optical system

## 2.2 温度补偿方案

移动地面站主要在野外进行工作,工作环境  
相对恶劣,要求系统的工作温度在  $-20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  范  
围内。由于系统中多种材料的热学性能存在差  
异,导致镜片的折射率、曲率半径、厚度以及间  
隔都会发生改变(见公式(2)~(5)),令光学系统  
产生离焦。

$$n_{\text{rel}}(\lambda, T) = n_{\text{rel}}(\lambda_0, T_0) + \frac{dn_{\text{rel}}(\lambda, T)}{dT}(T - T_0), \quad (2)$$

$$R' = R + R \cdot \alpha_0 \cdot dT, \quad (3)$$

$$D' = D + D \cdot \alpha_0 \cdot dT, \quad (4)$$

$$L' = L + L \cdot \alpha_0 \cdot dT, \quad (5)$$

其中: $T_0$ 为参考温度,通常为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T$ 为实际温  
度; $\lambda$ 为信标光波长; $n_{\text{rel}}(\lambda, T_0)$ 为参考温度下光  
学材料的相对折射率; $dn_{\text{rel}}(\lambda, T)/dT$ 为材料的相  
对折射率温度系数; $R$ 为参考温度下透镜曲率半  
径; $R'$ 为实际温度下透镜曲率半径; $D$ 为参考温度  
下透镜中心厚度; $D'$ 为实际温度下透镜中心厚度;  
 $L$ 为参考温度下支撑元件长度; $L'$ 为实际温度下支  
撑元件长度; $\alpha_0$ 为材料的热膨胀系数; $dT$ 为温度  
变化量。

根据本系统的特点,选择机电主动式温度补  
偿方式消除温度对于光学系统性能的影响。由于  
相机体积较大,高精度位置调整较难实现,因此采  
用移动镜组的方法对温度进行补偿,如图 3 所示。

如图 1 所示,透镜 1、透镜 2 尺寸较大不合作  
为运动镜组。若移动透镜 3 进行温度补偿,由于透  
镜 2 到透镜 3 段光路明显收窄导致轴向透镜间隔  
公差较严,运动机构的执行精度会对补偿效果产  
生直接影响;而透镜 5 前后都为非平行光路,移动  
会令光学系统产生额外像差。因此透镜 4 作为移  
动镜或透镜 4、透镜 5 作为移动镜组较为合适。

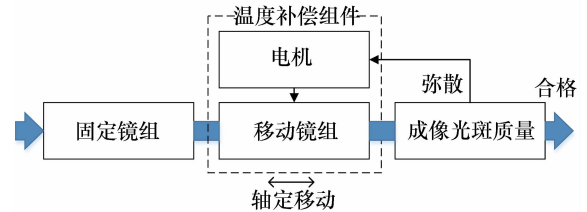


图 3 机电主动式温度补偿方式原理框图

Fig. 3 Block diagram of electromechanical active temperature compensation method

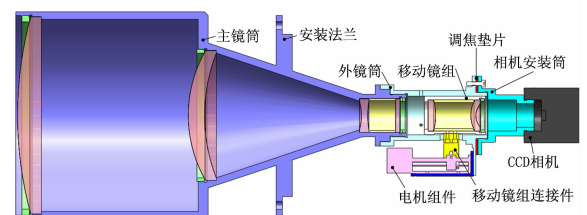


图 4 信标接收系统结构图

Fig. 4 Structure of beacon receiver system

### 2.3 光机结构方案

根据温度补偿方案,对系统的光机结构进行了设计,具体结构如图4所示。

信标接收系统主要由三部分组成,分别为固定镜组、补偿镜组、以及成像组件。固定镜组主要由主镜筒、透镜1~3以及滤光片组成。如图4所

示,其中主镜筒为本系统的主要承力元件,通过安装法兰与移动地面站光电跟瞄转台连接。采用45号钢作为主镜筒的材料,其线膨胀系数与光学玻璃相差不大(如表1所示),刚度较高,能够满足移动地面站复杂工作环境的力学要求。

表1 材料参数表

Tab.1 Table of material parameter

名称	弹性模量/GPa	密度/g·cm <sup>3</sup>	热导率/W·(m·K) <sup>-1</sup>	线膨胀系数/10 <sup>-8</sup> /K
钢(45)	200	7.81	48.1	4.25
铝合金(2A12)	68.2	2.68	167	8.64
玻璃(H-K9L)	79.2	2.52	1.1	2.78

$$\Delta_L = \Delta t(\alpha_s - \alpha_o)L, \quad (6)$$

其中: $\Delta_L$ 为温度变化引起的不同材料间的尺寸变化差异; $\Delta t$ 为温度变化量; $\alpha_s$ 为结构元件材料线膨胀系数; $\alpha_o$ 为光学元件材料线膨胀系数; $L$ 为元件尺寸。

主镜筒中最大透镜直径为150 mm,极限工作温度与基础温度最大温差为40℃,因此通过公式(6)可以计算出主镜筒与透镜之间预留的最大间隙应为0.03 mm(计算值为0.024 mm,留余量取值0.03 mm),能够保证光学镜片在-20~40℃温度范围内的安全使用。

补偿镜组包括外镜筒、移动镜组、电机组件以及移动镜组连接件等。如图4所示,外镜筒通过螺纹与固定镜组中的主镜筒连接。移动镜组包含两片透镜(在下文进行分析),通过步进电机驱动能够在外镜筒内进行高精度轴向移动,补偿由于温度变化导致的成像光斑弥散。补偿镜组采用铝合金(2A12)作为材料,重量轻,经济性较好。移动镜组中透镜直径仅为25 mm,根据公式(6)可以计算出镜筒与透镜需留有0.02 mm间隙(计算值0.016 mm,留余量取0.02 mm)以满足系统使用要求。

### 3 仿真分析

使用ANSYS有限元分析软件对系统结构进行了有限元建模,如图5所示,有限元模型共有

232 695个节点、131 967个单元。

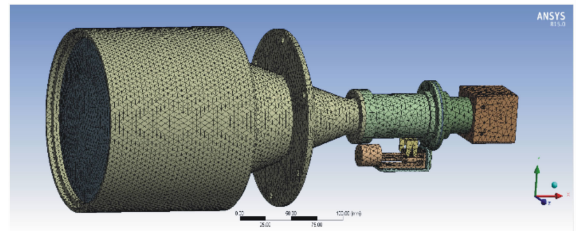


图5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

对系统进行了模态分析,结果如图6所示,一阶模态为370 Hz,动态刚度较好,能够满足移动地面站在野外复杂环境下工作的需求。

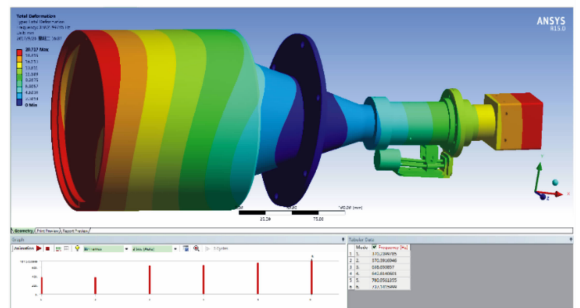


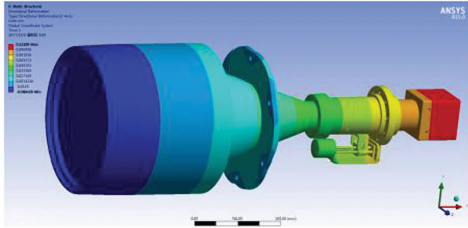
图6 模态分析结果

Fig.6 Results of model analysis

当环境温度降低至-20℃时,对信标接收系统进行了有限元分析,系统轴向变形量云图如图7(a)所示,透镜间隔变化量如表2所示。透

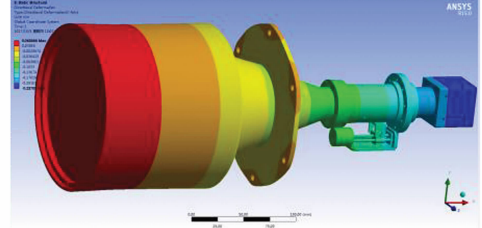
镜 1 与透镜 2 间距减小了 0.068 4 mm, 透镜 2 与透镜 3 间距减小了 0.065 8 mm, 透镜 3 与透镜 4 间距减小了 0.042 3 mm, 透镜 4 与透镜 5 间距减小了 0.033 0 mm。当环境温度升高至 40 °C 时, 系统轴向变形量云图如图 7(b) 所示, 各镜片间隔

变化量如表 2 所示, 透镜 1 与透镜 2 间距增加 0.032 9 mm, 透镜 2 与透镜 3 间距增加 0.031 1 mm, 透镜 3 与透镜 4 间距增加 0.020 4 mm, 透镜 4 与透镜 5 间距增加 0.015 4 mm。



(a) -20 °C 下系统轴向变形云图

(a) Diagram of system axial deformation at -20 °C



(b) 40 °C 下系统轴向变形云图

(b) Diagram of system axial deformation at 40 °C

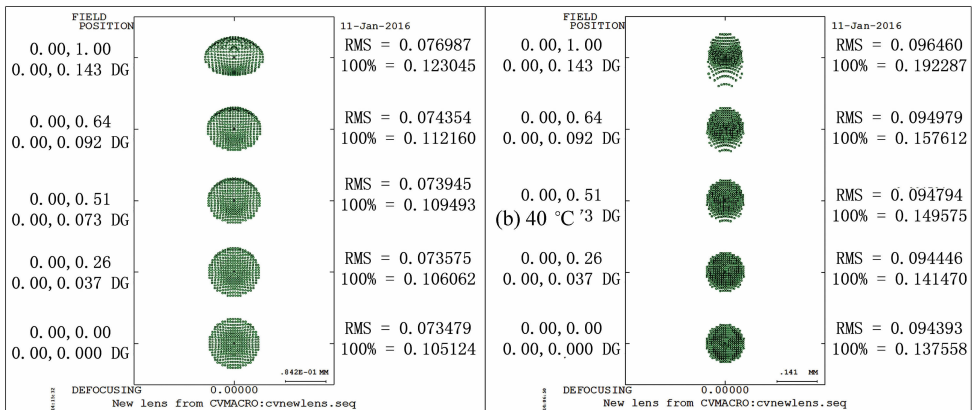
图 7 不同温度下信标接收系统的有限元分析结果

Fig. 7 Finite element analysis results of beacon receiver system at different temperatures

表 2 各透镜间距变化(单位:mm)

Tab. 2 Distance changes between lenses( Unit: mm)

透镜	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5
-20 °C	-0.068 4	-0.065 8	-0.042 3	-0.033 0
40 °C	0.0329	0.031 1	0.020 4	0.015 4



(a) -20 °C

(b) 40 °C

图 8 不同温度下光学系统点列图

Fig. 8 Spot diagram of optical system at different temperatures

将上述透镜位置的变化量输入 CODE V 光学设计软件中, 对不同工作温度下光学系统的性能进行仿真, 当环境温度降至 -20 °C 时, 如图 8(a) 所示, 该光学系统点列图最大光斑尺寸为 77 μm (边缘视场 5 mrad); 当环境温度升至 40 °C 时, 如

图 8(b) 所示, 该光学系统点列图最大光斑尺寸为 96 μm (边缘视场 5 mrad)。由仿真结果可知, 在工作温度范围内 (-20 ~ 40 °C), 信标接收系统无法满足跟瞄系统所要求的光斑尺寸不大于 5 × 5 像元 (25 μm × 25 μm) 的技术要求, 因此需要进行

温度补偿,并分别针对2.2节中两种温度补偿方案进行仿真。

当以透镜4作为移动镜时,向前移动0.1548 mm时,能够补偿环境温度-20℃时光学系统成像光斑的弥散情况,如图9(a)所示,中心视场光斑尺寸为2.2 μm,边缘视场光斑尺寸为16.7 μm,考虑透镜移动的位置误差(0.02 mm),如图9(b)所示,中心视场光斑尺寸为10.1 μm,边缘视场光斑尺寸为19.5 μm。透镜向后移动0.1936 mm可以补偿环境温度40℃时光学系统成像光斑的弥散现象,结果如图9(c)所示,中心视场光斑尺寸为1.6 μm,边缘视场光斑尺寸为15.7 μm,考虑透镜移动的位置误差(0.02 mm),如图9(d)所示,中心视场光斑尺寸为10.8 μm,边缘视场光斑尺寸为18.2 μm。

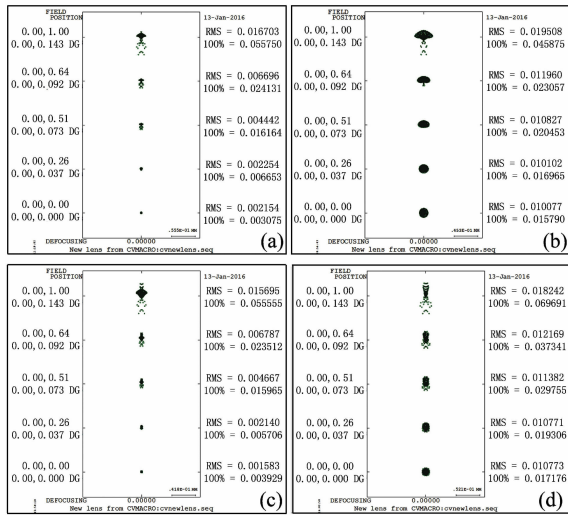


图9 透镜4的补偿效果

Fig. 9 Compensation effect of lens 4

当以透镜4、透镜5作为移动镜组时,当镜组向前移动0.695 mm时,可以补偿-20℃时光学系统成像光斑的弥散,如图10(a)所示,中心视场光斑尺寸为2.9 μm,边缘视场光斑尺寸为15.4 μm,考虑镜组移动的位置误差(0.02 mm),如图10(b)所示,中心视场光斑尺寸为3.2 μm,边缘视场光斑尺寸为15.7 μm。镜组向后移动0.8856 mm能够补偿40℃时光学系统成像光斑的弥散,如图10(c)所示,中心视场光斑尺寸为1.9 μm,边缘视场光斑尺寸为22.1 μm,考虑补偿镜组移动的位置误差(0.02 mm),如图10(d)所

示,中心视场光斑尺寸为3.9 μm,边缘视场光斑尺寸为21.8 μm。

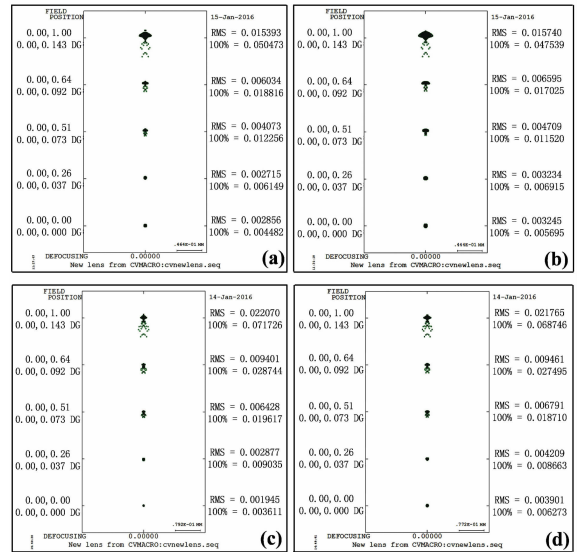


图10 透镜4,5的补偿效果

Fig. 10 Compensation effect of lens 4, 5

通过以上分析结果可知,移动透镜4或透镜4,5均可以补偿由于环境温度变化产生的成像光斑弥散,补偿后的光斑尺寸也均能满足系统指标要求,但是透镜4移动的位置误差对成像光斑的尺寸影响更大,极易导致光斑尺寸超出指标要求,因此采用透镜4,5作为移动镜组更加可行。

### 4 实验验证

使用ZYGO干涉仪以及标准平面镜对信标接

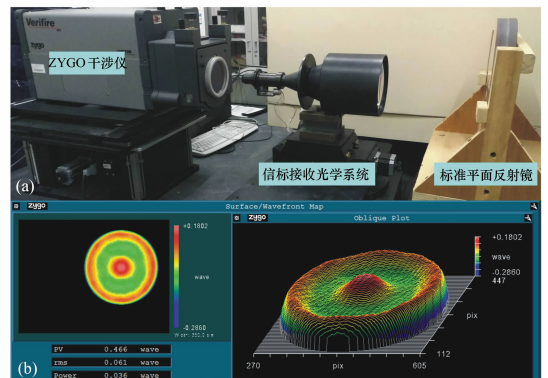


图11 信标接收镜头像质检测

Fig. 11 Image quality test of beacon receiver lens 收光学系统的波像差进行检测,如图11所示,检

测结果表明信标接收光学系统波像差 RMS 值为  $0.061\lambda$  ( $\lambda/16.39$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ), PV 值为  $0.466\lambda$  ( $\lambda/2.14$ ), 能够满足光电跟瞄系统信标接收镜头波像差 RMS 优于  $\lambda/15$  的指标要求。

## 5 结 论

本文对宽温度范围下工作的激光通信移动地面站信标接收镜头进行了研究, 采用理论计算与仿真分析相结合的方法, 进行了光学与光机结构的设计, 对  $-20 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  温度条件下信标接收光学系统的成像特性进行了分析, 确定了以步进电机驱动的第 4、5 片透镜为移动镜组的机电主动式补偿方案, 保证了宽工作温度范围下信标接收光学

系统较为稳定的光学性能。使用 ANSYS 有限元分析软件对系统进行了模态分析, 结果表明系统的一阶模态为  $370 \text{ Hz}$ , 动态刚度较好。通过 CODE V 与 ANSYS 进行联合仿真表明, 环境温度降低到  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 经过温度补偿后光学系统中心视场光斑尺寸为  $3.2 \text{ }\mu\text{m}$ , 边缘视场光斑尺寸为  $15.7 \text{ }\mu\text{m}$ 。环境温度升高到  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 经过温度补偿后光学系统中心视场光斑尺寸为  $3.9 \text{ }\mu\text{m}$ , 边缘视场光斑尺寸为  $21.8 \text{ }\mu\text{m}$ , 可以满足系统指标要求。使用 ZYGO 干涉仪对信标接收光学系统的像质进行了检测, 结果表明系统波像差 RMS 值  $0.061\lambda$ , 能够满足系统波像差小于  $\lambda/15$  的指标要求。

## 参考文献:

- [1] 吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 572-576.  
WU X J, MENG J H. Approach of athermalizing infrared optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 572-576. (in Chinese)
- [2] 王子威. 机械被动式温度自适应红外镜头热补偿分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014: 9-30.  
WANG Z W. Thermal compensation analysis of infrared lenses with mechanical passive temperature adaption[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014: 9-30. (in Chinese)
- [3] 王平, 张国玉, 王伟, 等. 航空变焦距镜头被动消热设计[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 258-264.  
WANG P, ZHANG G Y, WANG W, et al. Passive athermal design of aerial zoom lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 258-264. (in Chinese)
- [4] 奚晓, 李晓彤, 岑兆丰. 被动式红外光学系统无热设计[J]. 光学仪器, 2005, 27(1): 42-46.  
XI X, LI X T, CEN Z F. Passive infrared optical system without thermal design[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(1): 42-46. (in Chinese)
- [5] 林琳, 门克内木乐, 解晓蓬, 等. 大相对孔径非制冷红外光学系统无热化设计[J]. 光学仪器, 2015, 37(4): 319-323.  
LI L, MEN K N M L, XIE X P, et al. The optical design of the uncooled infrared thermal detection device[J]. *Optical instruments*, 2015, 37(4): 319-323. (in Chinese)
- [6] 徐大维. 基于车载红外系统的无热化设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2012: 1-50.  
XU D X. Optical design of athermalized vehicle-based infrared system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 1-50. (in Chinese)
- [7] 徐大维, 向阳, 王健, 等. 折衍混合车载红外镜头无热化设计[J]. 红外技术, 2011, 33(8): 460-464.  
XU D X, XIANG Y, WANG J, et al. Design on athermal refractive-diffractive hybrid vehicular infrared lens[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(8): 460-464. (in Chinese)
- [8] 杨建峰, 阮萍, 常凌颖, 等. 高温电视摄像镜头设计[J]. 光子学报, 2005, (7): 1081-1085.  
YANG J F, RUAN P, CHANG L Y, et al. Design of high-temperature TV camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, (7): 1081-1085. (in Chinese)
- [9] 杨小儒, 张良, 王希军, 等. 一种高分辨率短波红外宽温度范围被动消热差光学系统[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 129-132.  
YANG X R, ZHANG L, WANG X J, et al. A high resolution shortwave infrared passive athermalization system with wide temperature range[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 129-132. (in Chinese)

- [10] 沈宏海,王国华,王林杰,等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用[J]. 光学精密工程,2010,18(3):593-600.  
SHEN H H, WANG G H, WANG L J, *et al.*. Active compensation without thermalization technology in the application of the airborne infrared optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):593-600. (in Chinese)
- [11] 程志峰,李明,程欣. 可见光变焦镜头结构优化设计[J]. 中国光学,2012,5(02):154-160.  
CHENG ZH F, LI M, CHENG X. Optimal structure design of visible zoom lens[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2):154-160. (in Chinese)
- [12] 瞿伟,刘卫林,刘银辉. 长焦距变焦镜头的温度分析及补偿[J]. 应用光学,2015,36(5):717-722.  
ZHAI W, LIU W L, LIU Y H. Thermal analysis and compensation of long zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(5):717-722. (in Chinese)
- [13] 徐新行,李莹. 可见光电视用高精度小体积调焦平台的设计[J]. 光学精密工程,2017,25(6):1526-1533.  
XU X X, LI Y. Design of focusing mechanism with high precision and small volume for visible light television system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6):1526-1533. (in Chinese)
- [14] 王红,田铁印. 5倍变焦距光学系统小型化设计[J]. 中国光学,2014,7(2):315-319.  
WANG H, TIAN T Y. Miniature design of 5 x zoom optical system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2):315-319. (in Chinese)
- [15] 范磊,张景旭,赵勇志,等. 中型主镜的柔性半运动学支撑[J]. 光学精密工程,2016,24(8):1965-1972.  
FAN L, ZHANG J X, ZHAO Y Z, *et al.*. Flexible semi-kinematic support for middling primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8):1965-1972. (in Chinese)
- [16] 王忠素,吴清文,郭权峰,等. 空间光学载荷探测器组件抗冲击隔振设计[J]. 光学精密工程,2017,25(8):2098-2105.  
WANG ZH S, WU Q W, GUO Q F, *et al.*. Design of anti-shock vibration isolation for detector module of space optics load [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8):2098-2105. (in Chinese)

#### 作者简介:



李响(1986—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事光学有效载荷光学精密机械结构的设计与优化方面的研究。E-mail: abelfeel@163.com