

doi: 10.3788/gzxb20164501.0111002

# 空间碎片天基光学探测系统离焦问题分析

曾德贤<sup>1</sup>, 胡炳梁<sup>2</sup>, 宋海军<sup>3</sup>

(1 装备学院, 北京 101416)

(2 中科院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

(3 中科院西安光学精密机械研究所 科技与管理部, 西安 710119)

**摘要:**从相对距离、大气压力、温度变化三个方面分析了天基光学探测系统离焦产生的原因及离焦变化情况, 提出通过离焦调制传递函数模型分析离焦对系统性能影响的方案, 仿真分析了不同离焦量下系统等效调制传递函数的变化及其对成像质量的影响。结果表明, 随着离焦量的增加, 图像质量逐渐下降, 相对距离变化导致的离焦为正值, 大气压力变化导致的离焦为负值, 温度变化导致的离焦在中心温度左右有正有负, 三者导致的离焦量可部分抵消。该研究为天基光学探测系统的设计、补偿措施的制定以及性能评估提供了数据支持。

**关键词:**光学探测; 成像质量; 调制传递函数; 离焦; 空间环境

中图分类号: P412; V476

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0111002-5

## Analysis of Defocus in Space Based Space Optical Debris Detection

ZENG De-xian<sup>1</sup>, HU Bing-liang<sup>2</sup>, SONG Hai-jun<sup>2</sup>

(1 *Equipment Academy, Beijing 101416, China*)

(2 *Key Laboratory of Spectral Imaging, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(3 *Department of Science and Technology and Management, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

**Abstract:** The reasons of the generation of defocus were discussed and the defocus change was analysed from the relative distance, atmospheric pressure and temperature change. The modulation transfer function model was proposed to study the image quality influenced by defocus. Then different defocus value leading image blurry was simulated. The simulation results indicate that the positive and negative defocus value induced by the relative distance, atmospheric pressure and temperature change can be counteracted. This paper provides an effective data to spatial camera design, compensating measure establishment and performance evaluation.

**Key words:** Optical detection; Image quality; Modulation transfer function; Defocus; Space environment

**OCIS Codes:** 110.4100; 280.4788; 330.7326; 150.1488; 110.2970

## 0 引言

天基光学探测作为一种空间碎片探测的有效手段<sup>[1-3]</sup>, 引起各航天大国的高度重视<sup>[4-5]</sup>。天基光学探测系统在工作过程中, 光学焦面位置会出现前后移动, 如果探测器接收面所处的位置不能随之变化, 或者两者变化不匹配, 将产生离焦现象, 造成空间分辨率降低。

复杂的空间运行环境及高动态工作方式使得离焦成为影响天基光学探测系统性能的主要因素<sup>[6]</sup>。天基光学探测系统焦距越长, 离焦越严重, 当离焦严重时, 弥散点变大, 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 出现零值, 这一零值会造成空间频率的丢失, 从而无法传递该频率所反映的空间信息。随着装配技术和加工工艺的不断发展, 天基光学探测系统在地面研

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2014AA7041021D) 资助

第一作者: 曾德贤 (1978-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光学测量技术。Email: zengdexian@139.com

收稿日期: 2015-08-26; 录用日期: 2015-10-30

<http://www.photon.ac.cn>

制阶段,通过离焦补偿技术<sup>[7]</sup>可以将离焦量控制在很小范围内;通过特殊的光学系统设计<sup>[8-9]</sup>,在大离焦量的情况下仍可获取高分辨率的图像;亦可对获取图像进行后期处理以提高分辨率,但它们都是建立在离焦量信息获取基础之上<sup>[8-9]</sup>.因此,本文从相对距离、大气压力、温度变化三个方面分析了天基光学探测系统离焦产生的原因,提出通过离焦的调制传递函数模型分析离焦对系统性能的影响的方法,并仿真分析了不同因素下离焦量变化及其对成像质量的影响.

## 1 离焦产生的原因

造成空间碎片天基光学探测系统离焦的因素很多,主要因素<sup>[10]</sup>概括为探测距离变化、大气压力变化和温度变化.

### 1.1 距离变化导致的离焦现象分析

对于焦距一定的物距,物像之间存在的关系为

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

式中, $f'$ 为光学镜头焦距, $u$ 为物距, $v$ 为像距.

根据式(1)可知,只有当物距为无穷远时,像距才等于焦距.物距小于无穷远时,像距则大于焦距,或者说焦面向远离镜头的方向移动.因此,若焦平面的位置不能随距离变化而变化,将引起离焦.由式(1)可推导出离焦量 $\Delta f'_{\text{len}}$ 与物距的关系为

$$\Delta f'_{\text{len}} = v - f' = \frac{f'^2}{u - f'} \quad (2)$$

设空间碎片天基光学探测系统焦距为5 m,工作距离为100 km~1 000 km,离焦量随相对距离的变化情况如图1.

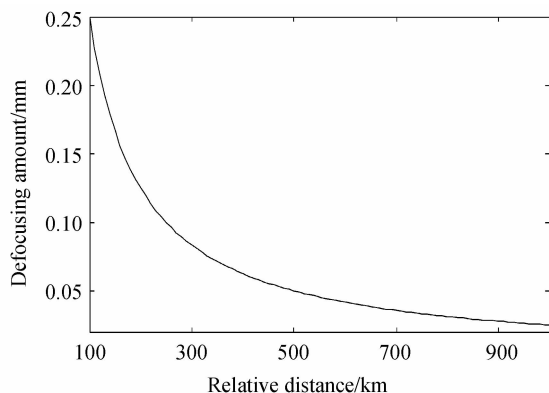


图1 不同相对距离下离焦量变化情况

Fig. 1 Defocusing amount change curve with different distance

从图1可以看出,相对距离越小,离焦量越大;当相对距离较大时,离焦量较小,变化也趋于平缓.

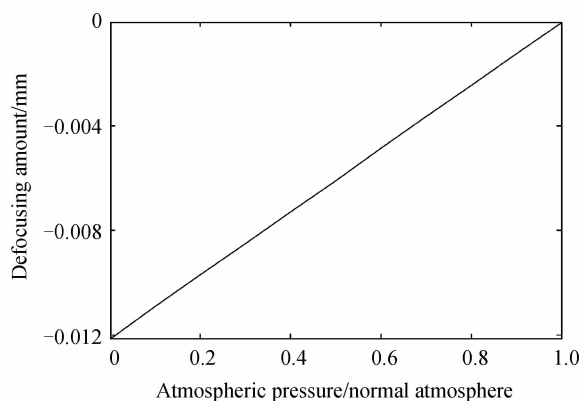
### 1.2 大气压力变化导致的离焦现象分析

空间碎片天基光学探测系统焦距随大气压力变化的计算公式为<sup>[11]</sup>

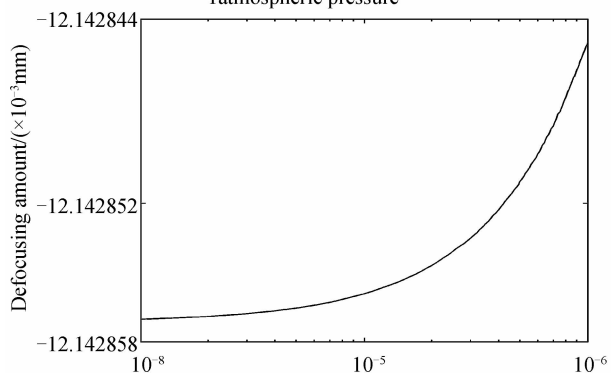
$$\Delta f_p(20^\circ\text{C}) = f \cdot n_g \cdot \frac{(n_a - 1)(P - P_0)}{(n_g - 1)P_0} \quad (3)$$

式中, $P$ 是卫星平台飞行高度的大气压力; $P_0$ 是相机在地面装配时的大气压力; $n_g$ 是玻璃折射率; $n_a$ 是空气折射率.式(3)是假设仪器舱内中心温度保持在 $20^\circ\text{C}$ 的条件下推导的.

设大气压力在0~1个标准大气压间变化,则离焦量随大气压力变化曲线如图2(a),在100 km高度以上,周围大气压力比地面标准大气压力低6个数量级<sup>[12]</sup>,空气折射率变化量小于百万分之一<sup>[13]</sup>,取玻璃折射率为1.7,此时,离焦量变化曲线如图2(b).



(a) Defocusing amount change curve with atmospheric pressure



(b) Defocusing amount change curve with small atmospheric pressure

图2 不同大气压下离焦量变化曲线

Fig. 2 Defocusing amount change curve with different atmospheric pressure

由图2可以看出,大气压力减小造成焦距变短,焦面向镜头方向移动.在100 km以上高度,由于大气压力已很小,空气折射率变化量也很小,离焦量随着大气压力的改变,其变化量已经非常小.

### 1.3 温度变化导致的离焦现象分析

空间环境中,受空间外热流和内部热源影响,空间碎片天基光学探测系统光机结构产生一定的温度变化,引起光学系统的焦面位置变化.由于光学系统的外遮光罩的长度较长,在温控条件下,天基光学探测系统内部温差较大情况不容易发生,因此,本文只考虑光学

系统的整体温度变化,对系统前后的温度梯度等温度场影响不作分析.此种情况下,温度引起空间相机焦面变化主要包括两个方面:光学材料随温度变化的膨胀与收缩,改变了透镜的曲率半径和厚度;光学元件之间安装材料的膨胀与收缩使间距变化.

单片薄透镜焦点变化  $\Delta f'$ 、焦距  $f'$  和光学材料折射率  $n_g$  变化的关系为<sup>[14]</sup>

$$\Delta f' = \frac{n_g - \eta_a - \eta_g}{n_g - 1} \cdot \Delta T \cdot f' \quad (4)$$

式中,  $\Delta T$  是温度变化量,  $n_g$  是玻璃折射率,  $\eta_a$  是空气折射率随温度的变化量,  $\eta_g$  是玻璃折射率随温度改变的绝对变化量.

光学元件之间材料的线膨胀系数为  $\alpha_0$ , 间隔尺寸为  $L$ , 则间隔尺寸的变化量  $\Delta L$  为

$$\Delta L = L \cdot \alpha_0 \quad (5)$$

天基光学探测系统通常是由多片透镜组成, 它的总热致离焦量并不等于各片透镜与间隔材料的热离焦量的简单加权和, 需根据主镜、次镜位置, 综合分析系统热离焦.

设天基光学探测系统中心工作温度为  $20^\circ\text{C}$ , 根据光学结构、材料特性, 在  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  范围内, 通过光学设计软件计算得出天基光学探测系统焦面位移量随温度变化的曲线如图 3.

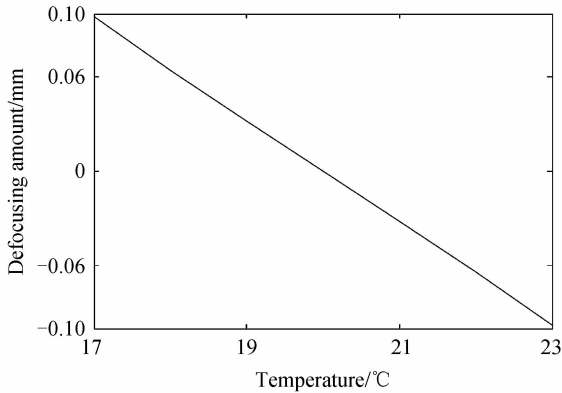


图 3 不同温度下离焦量变化情况

Fig. 3 Defocusing amount change curve with different temperature

由图 3 可知, 小于中心温度离焦量为正值, 大于中心温度离焦量为负值.

## 2 离焦的等效 MTF 模型

调制传递函数表示了天基光学探测系统再现空间目标的能力, 包含着决定图像质量的两个可测量的量, 即图像的分辨率和对比度. 光学探测系统可视为由一系列具有一定频率特性的子系统组成, 各子系统的频率特性可以用传递函数来描述, 总系统的传递函数等于各子系统传递函数之积. MTF 的高低直接关系到光

学探测系统成像质量的好坏. 通过建立离焦 MTF 模型, 不仅可以分析离焦对天基空间目标光学探测系统性能的影响, 还可以明确离焦量的变化区间. 参考一般光学探测系统离焦 MTF 模型<sup>[10]</sup>, 在奈奎斯特频率处, 空间碎片天基光学探测系统离焦 MTF 模型可简单表示为

$$\text{MTF}_{\text{Defocus}} = \frac{2J_1(\pi\Delta N_A f_{\text{Nyquist}})}{\pi\Delta N_A f_{\text{Nyquist}}} \quad (6)$$

式中,  $J_1$  为一阶贝塞尔函数;  $\Delta$  为轴向离焦量;  $N_A = D/(2f')$ ,  $D$  为入射光瞳直径,  $f'$  为光学系统的焦距.

设  $D/f' = 1/13.5$ , 则离焦量  $\Delta$  在  $0 \sim 0.246 \text{ mm}$  之间时, 利用式(6)仿真分析系统奈奎斯特频率处 MTF 随离焦量变化情况如图 4.

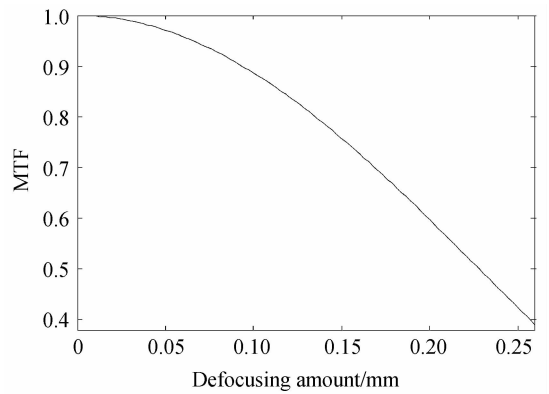


图 4 系统 MTF 随离焦量变化曲线

Fig. 4 System MTF change curve with different defocusing amount

从图 4 可以看出, 当不离焦时, MTF 为 1, 随着离焦量的增加, MTF 减小. 根据系统分配给离焦 MTF 值的要求, 可以推导出距离变化、大气压力及温度变化的范围, 并进一步确定与离焦有关的系统参量大小及准确度要求.

## 3 离焦等效 MTF 模型退化作用仿真

空间碎片天基光学探测系统离焦等效 MTF 模型退化作用仿真流程如图 5.

结合空间碎片天基光学探测系统静态 MTF 模型参量, 在不同探测条件下, 对不同离焦量进行试验. 设探测系统工作高度  $500 \text{ km}$ , 此时大气压力变化造成的离焦量约为  $0.0121 \text{ mm}$ .

系统与空间碎片相对距离  $170 \text{ km}$  时, 距离变化造成的离焦量为  $0.1471 \text{ mm}$ ; 系统工作温度  $21^\circ\text{C}$ , 温度变化造成的离焦量为  $-0.032 \text{ mm}$ ; 总离焦量约为  $0.1 \text{ mm}$ .

系统与空间碎片相对距离  $140 \text{ km}$  时, 距离变化造成的离焦量为  $0.1786 \text{ mm}$ ; 系统工作温度  $19^\circ\text{C}$ , 温度变化造成的离焦量为  $0.032 \text{ mm}$ ; 总离焦量约为

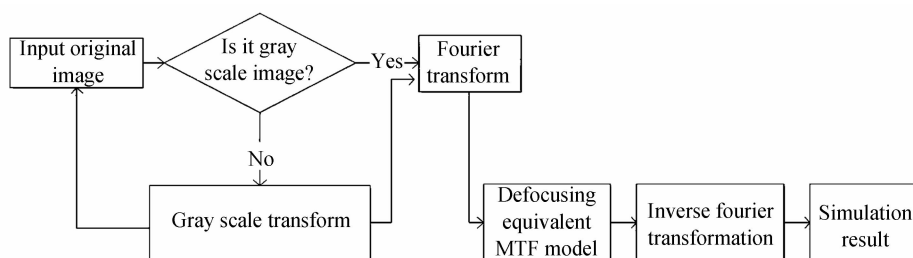


图5 离焦等效 MTF 模型退化作用仿真流程图

Fig. 5 Defocusing equivalent MTF simulation process

0.2 mm.

系统与空间碎片相对距离 120 km 时,距离变化造成的离焦量为 0.208 3 mm;系统工作温度 17℃,温度变化造成的离焦量为 0.098 mm;总离焦量约为 0.3 mm.

不同离焦量等效 MTF 图和退化图像如图 6.

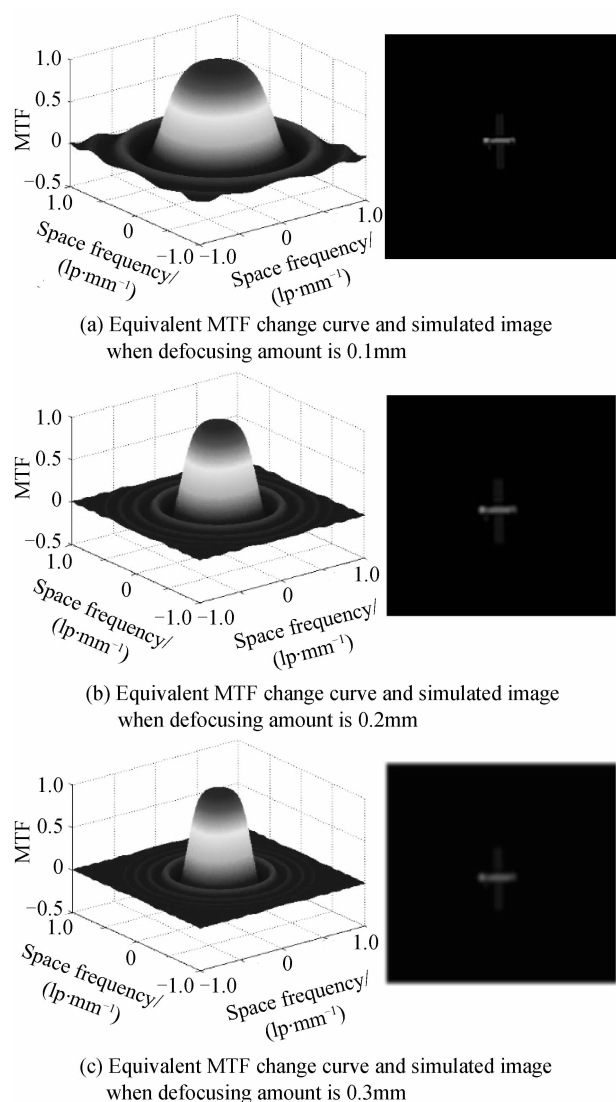


图6 离焦等效 MTF 模型退化作用仿真结果

Fig. 6 Defocusing equivalent MTF simulation result

通过等效 MTF 三维图可以看出,随着离焦量的增加,离焦等效 MTF 越来越窄,系统截至频率越来越低;

从退化图像可看出,随着离焦量的增加,图像越来越模糊,图像丢失的信息越来越多.

## 4 结论

本文在分析离焦产生原因的基础上,分析了离焦对系统性能的影响,并仿真了不同离焦量下图像的变化情况.单独消除某一因素造成的离焦量,并不能够降低系统总的离焦量.消除离焦对系统性能的影响,需要综合考虑离焦产生的各方面原因.对于空间碎片天基光学探测系统而言,可以从三方面减小离焦量,降低离焦对系统性能的影响.一是根据系统性能要求和技术参量,选择最佳的成像距离;二是在焦平面装调时应使探测器光敏面处于焦平面处,误差最小;三是在对光学系统的透镜组加恒温调节装置的基础上,通过装配材料与光学材料之间的相互补偿,或是直接利用光学材料间热特性参量的互补性,通过不同材料的适当组合来减小温度变化导致的离焦.同时,通过以上分析可知,相对距离的变化导致的离焦为正值,即焦面位置延长;大气压力变化导致的离焦为负值,即焦面向镜头方向移动;温度变化导致的离焦在中心温度左右有正有负.因此,在系统工作的相对距离、大气压力、温度等确定后,可通过预估系统入轨后离焦量,在设计阶段通过补偿措施抵消部分离焦量.并通过掌握离焦量变化情况,更好地评估系统成像质量.本文的分析为空间碎片天基光学探测系统离焦补偿措施的制定提供了方法和数据支持,也为系统的设计和评估提供了参考和帮助.

### 参考文献

- [1] LI N, XU Y, BASSET G, *et al.* Tracking the trajectory of space debris in close proximity via a vision-based method[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2014, **27**(2): 238-248.
  - [2] MCCALL A P D, NAUDEAU M L, ADJOUADI M. Debris characterization techniques via unresolved long-wave infrared imaging from a space-based platform[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, **8**(5): 1931-3195.
  - [3] SHEN Shuang-yan. Cleaning space debris with a space-based laser system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, **27**(4): 805-811.
  - [4] CHEN Jie, PAN Feng, SU Tong-ling. EHF satellite communication system of the U. S. army[J]. *National Defense Science and Technology*, 2011, **32**(1): 67-70.
- 陈杰, 潘峰, 苏同领. 美国天基太空监视系统[J]. 国防科技, 2011, **32**(1): 67-70.

- [5] KEITH M, CHRIS R, EUGENE L. Relative cost and performance comparison of geo space situational awareness architectures[C] //Kihei. AMOS Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Maui: The Maui Economic Development Board, 2014: 692-709.
- [6] GUO Quan-feng, LI Wei, DONG Ji-hong, *et al.* Space focusing mirror assembly with flexure hinges [C]. 7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Design, Manufacturing, and Testing of Micro- and Nano-Optical Devices and Systems, edited by Tianchun Ye, A. G. Poleshchuk, Song Hu, Proc. of SPIE, 2014, Vol. 9283, 928306.
- [7] LIU Lei. Focusing range of space off-axial TMA optical camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(3): 631-636.  
刘磊. 空间三反相机调焦范围的确定[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(3): 631-636.
- [8] ZHANG Li, GUO Chong-ling, ZHANG Hui. A method of defocus compensation for space optical camera by adjusting tertiary mirror[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, **35**(5): 38-45.  
张丽, 郭崇岭, 张慧. 一种基于调节三镜的空间光学相机离焦补偿方法[J]. 航天返回与遥感, 2014, **35**(5): 38-45.
- [9] HUI Bin, PEI Yun-tian, WEN De-sheng. New technology to acquire high resolution image under large defocus[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, **23**(6): 473-476.  
惠彬, 裴云天, 汶德胜. 一种在离焦情况下获得高分辨率图像的新技术[J]. 红外与毫米波学报, 2004, **23**(6): 473-476.
- [10] LIU Ya-xia, RUAN Jin. Discussion about off-focus influence on MTF for long focus aerial camera [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2004, **27**(2): 26-28.  
刘亚侠, 阮锦. 长焦距航天遥感相机离焦对传递函数的影响[J]. 长春理工大学学报, 2004, **27**(2): 26-28.
- [11] DING Yan-wei, LIU Jian, LU e. Effect of space environment on the dimension stability of optical remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(1): 106-109.  
丁延卫, 刘剑, 卢镔. 空间环境对光学成像传感器尺寸稳定性的影响[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(1): 106-109.
- [12] TANG Xian-ming translation. The space environment[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2009: 25-31.  
唐贤明译. 空间环境[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 25-31.
- [13] HUI Shou-wen. Study of automatic focusing technique for long focus oblique real-time aerial camera [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2003: 9-14.  
惠守文. 长焦距斜视实时航空相机自动调焦技术的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003: 9-14.
- [14] LI Zhong. A review of study of IR optical system with temperature compensation auto-focusing control abroad[J]. *Infrared & Laser Technology*, 1995, **24**(1): 11-16.  
李忠. 国外温度补偿自调焦红外光学系统研究的述评[J]. 红外与激光技术, 1995, **24**(1): 11-16.