

空间碎片多光谱探测相机光学系统设计

王 虎^{1,2}, 罗建军¹

- (1. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072;
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘 要: 为了实现对空间碎片探测, 提出了一种空间碎片多光谱探测相机光学系统, 由可见光相机、长波红外相机、中波红外相机光学系统组成, 三个相机共用主、次镜, 在三路相机光学系统中同时加入校正组件平衡校正像差, 可见光相机焦距为 1 000 mm, 视场为 1.2°, 长波红外相机焦距为 -250 mm, 视场为 2.75°, 中波红外相机焦距为 -500 mm, 视场为 1.38°, 考虑了温度对相机像质的影响, 采用热膨胀系数小的材料作为反射镜基底, 分析了三个相机光学系统在空间环境下(20±5 °C)温度环境下的像质变化, 设计结果能满足使用要求。

关键词: 空间碎片; 交会对接; 多光谱相机

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1188-06

Optical system design of multi-spectral camera for space debris

Wang Hu^{1,2}, Luo Jianjun¹

- (1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to detect the Space debris, a multi-spectral camera for Space debris was proposed. The multi-spectral camera was consisted of visible camera, long-wave infrared (LWIR) camera and mid-wave infrared (MWIR) camera. Three cameras used the primary mirror and secondary mirror together, including correction lens in every camera in order to balance aberration. The focal length was 1 000 mm and field of view was 1.2° for visible camera, and the focal length was 250 mm and field of view was 2.75° for LWIR camera, and the focal length was 500 mm and field of view was 1.38° for MWIR camera. Some measures were taken to make sure the less degradation of MTF for thermal distortion, such as a kind of material with good thermal property as mirror substrate to reduce surface distortion. The modulation transfer function(MTF) of three cameras in condition of 20±5 °C was analyzed, which showed a good result for user's requirement.

Key words: space debris; rendezvous and docking; multi-spectral camera

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-09-03

作者简介: 王虎(1975-), 男, 博士生, 副研究员, 主要从事空间光电探测、光学设计方面的研究。Email: optwangh@163.com

导师简介: 罗建军(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事空天飞行器导航与制导方面的研究。Email: jjluo@nwpu.edu.cn

0 引言

空间碎片探测是获取空间碎片信息的主要手段之一。各种空间碎片大致可归纳为平面、球面、圆柱面、圆锥面以及这几种形式的组合,它们主要是反射空间环境的背景光,如太阳光、地球大气外层反射光、月球反射光以及各种星体发光等。空间探测能力是未来空间优势的基础,是实现控制空间的重要基础能力。传统的空间碎片探测多采用雷达探测器、无线电信号探测器组成的探测网对空间碎片进行探测和跟踪,这种方式的优点是技术成熟、投资成本低,能够对空间碎片进行有效搜索和跟踪,但易受气象、地理位置和时间的限制,为提高空间目标非合作能力,美国、加拿大等国都开展了建立空间碎片探测的计划^[1-3],天基空间碎片探测的优点是不受地理位置和气象条件的限制,探测效果好。探测设备可以在太空中对空间碎片进行跟踪捕获任务,这类设备避开大气造成的干扰,能够精确地获得目标的尺寸、形状及轨道参量等重要目标信息,大大弥补了地基系统中层空间探测能力的不足^[4]。

对于空间碎片探测系统,为获得更多的成像光谱特性,希望系统可以在多个光谱进行探测,而为了提高空间光学载荷器的可靠性,对于空间光学载荷,需要尽量减少设备部件,同时满足空间光学载荷要求体积小、重量轻和功耗小的特点。文中提出了一种可同时实现三波段探测的多光谱光学载荷相机光学系统,该多光谱相机结构紧凑,三个子相机共用主、次镜,在主、次镜之间切入45°折轴镜转折光路,把中波红外相机光路折转到垂直于可见光相机光路的位置上,三个相机使用单独的探测器。

1 系统设计

1.1 设计指标

光学载荷相机的设计指标如下:

可见光相机焦距为1000 mm,相对孔径为1/4,全视场角为1.2°,工作谱段为400~900 nm,采用TDI-CCD,像元尺寸为10 μm×10 μm。

长波红外相机的焦距为-250 mm,为大相对孔径结构,相对孔径为1/1,全视场角为2.75°,工作谱段为9300~10500 nm,采用长波384×288焦平面阵列探测器,探测器像元尺寸为25 μm×25 μm。

中波红外相机的焦距为-500 mm,相对孔径为1/2,全视场角为1.38°,工作谱段为3700~4800 nm,采用中波640×480焦平面大面列探测器,探测器像元尺寸为15 μm×15 μm。

1.2 光学结构选型及设计分析

该多光谱光学载荷相机是大口径,长焦距的系统,由于要兼顾三个相机的设计、加工及检测难度,首选折反射式光学结构,这样不但可以折叠光路,使结构更加紧凑,同时可缩小轴向尺寸、减轻载荷整机重量,并且大口径的反射镜材料比透射材料容易制造。两镜折反射式光学结构图如图1所示。

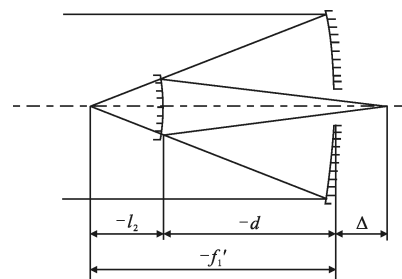


图1 两镜折反射式光学结构图

Fig.1 Structure of catadioptric system

折反式系统的光焦度主要由反射镜结构承担,另一部分由校正组件承担,主要用来平衡系统单色像差、校正轴外像差,提高成像质量,加入校正组件后引入位置色差和倍率色差,同时为了保证系统焦距和尺寸,因此校正组件只能采用复杂化后的正负透镜组合。考虑到大相对孔径折反式系统存在较大的中心遮拦,会减小有效通光面积,导致能量损失,影响光学载荷相机的像面照度,设计中在满足设计要求和权衡三个相机结构及像质条件下,还需尽量减小次镜口径。

1.3 设计结果

长波红外相机系统为一个红外聚焦系统,与可见光相机系统、中波红外相机系统共用主镜、次镜,与可见光相机系统、中波红外相机系统不同的是,光线到达长波红外相机的次镜后发生透射而不是反射,为了保证光学载荷对温度变化不敏感,该可见光相机系统设计难度较大,主要在于次镜后可见光校正组件玻璃的选择、镜筒的选择、光学元件光焦度的分配,最终得到的可见光相机系统的外形结构图如图2所示,系统总长为350 mm,其中元件1为主镜,元件2为次镜,元件4、5、6为可见光校正组件,元件7为可见光CCD靶面,

镜筒选用钢制，选定的可见光校正组件玻璃为成都玻璃公司的 K9 和 ZF2,性能稳定、价格便宜,三片可见光校正组件光焦度分别为正、负、正。

常用的长波红外透镜材料有 Ge、ZnS、ZnSe 等，而常用的中波红外透镜材料 Ge、Si、ZnS 等，对于红外系统，可以通过单种或者多种材料的互相搭配来实现红外波段的消像差^[5-6]。长波红外相机系统、中波红外相机系统的外形结构图如图 3、图 4 所示,长波红外相机系统总长为 458 mm,为减小中波红外相机系统尺寸,并保证和其他两路光线不交叉,引入了一个折轴镜,有效利用了空间尺寸,缩小了中波红外相机总长,系统总长仅为 206 mm。图 3 中,元件 8、9、10 为长波红外校正组件，玻璃材料为 Ge 和 ZnSe;图 4 中,元件 11、12、13 为中波红外校正组件,玻璃材料为 Ge 和 Si,元件 14 为中波红外系统的像面。

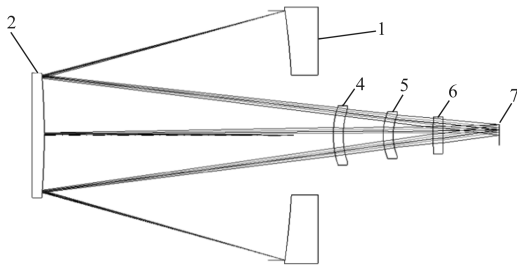


图 2 可见光相机外形结构图
Fig.2 Structure of visible camera

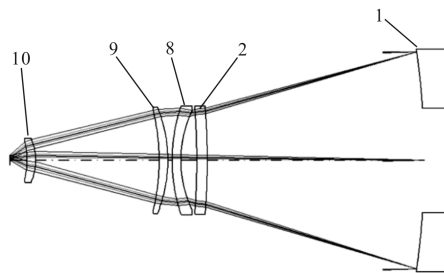


图 3 长波红外相机外形结构图
Fig.3 Structure of LWIR camera

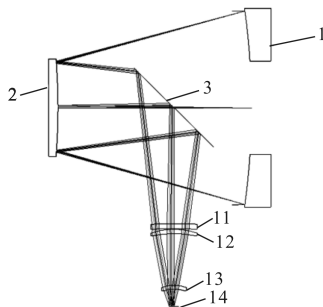


图 4 中波红外相机外形结构图
Fig.4 Structure of MWIR camera

由于红外光学材料的折射率温度系数 dn/dT 较大,如常用红外光学锗的 dn/dT 为 $3.96 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$,是可见光玻璃 dn/dT 的近 80 倍,随着环境温度的变化,红外光学材料的折射率、光学元件的曲率和厚度、零件间隔等都会发生变化,导致系统成像质量变差^[6-9]。因此,红外相机的热控较难,为了实现红外相机的消热差,文中合理分配了两个红外相机中校正组件的光焦度,长波红外相机系统中光焦度分别为正、负、负,中波红外相机系统中光焦度分别为正、负、正,两个红外相机中透镜间的镜筒均选用热膨胀系数小的钢制材料。

1.4 像质评价

调制传递函数曲线(MTF)是成像系统主要的评价手段。各个子相机系统的调制传递函数曲线如图 5~7 所示,由图 5 可知,奈奎斯特频率 50 lp/mm 处,

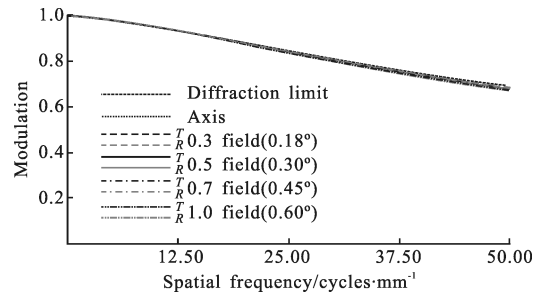


图 5 可见光相机系统的传函
Fig.5 MTF of visible camera

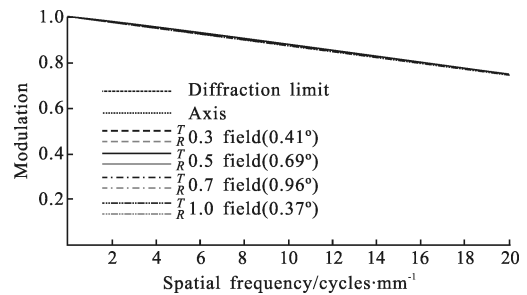


图 6 长波红外相机系统的传函
Fig.6 MTF of LWIR camera

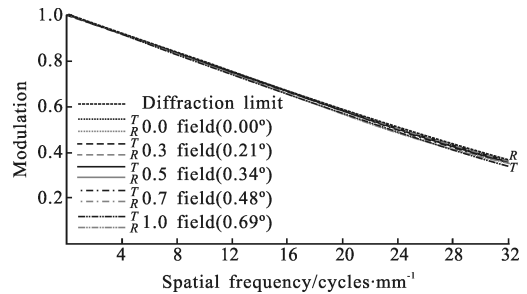


图 7 中波红外相机系统的传函
Fig.7 MTF of MWIR camera

可见光相机系统各视场的平均传递函数为 0.686; 由图 6 可知, 奈奎斯特频率 20 lp/mm 处, 长波红外相机系统各视场的平均传递函数为 0.746; 由图 7 可知, 奈奎斯特频率 32 lp/mm 处, 中波红外相机系统各视场的平均传递函数为 0.365, 各个子相机系统的传递函数均接近衍射极限。考虑到加工和装配因素, 传递函数降为理论传递函数的 0.8, 最终可见光相机系统、长波红外相机系统、中波红外相机系统的各视场平均值分别为 0.55、0.6、0.29, 可满足使用要求。

2 温度变化对相机成像质量的影响分析

多光谱、高像质、高分辨率系统对温度变化非常敏感。一方面, 主结构和光学元件的温度变化使光学系统的间隔发生变化, 光学主轴发生倾斜; 另一方面, 光学元件内部的温度变化使得光学元件的面形发生变化, 透镜内的温度变化还将引起折射率的改变。在光学系统中, 温度变化影响的参量主要包括光学间隔、半径和光学折射率等。

设计的成像系统中, 共用主镜和次镜实现多光谱多光路成像, 为了使各光路成像都良好, 主、次镜的间隔设计较大, 但折反系统中主、次镜的间隔变化对成像很敏感, 为了减小温度变化对主次镜间隔的影响, 选用膨胀系数较小的碳纤维材料作为主、次镜的连接; 同时为了减小非球面的面形变化, 采用了热性能优良的材料来制作反射镜。对于三个相机后的透射系统, 虽然透射材料的热系数稍差, 但与温度变化对主次镜的间隔变化和主次镜的面形变化的影响相比, 该变化影响更小, 在相机温度变化范围不大范围内, 可以通过材料匹配和光焦距分配实现光学被动无热化, 对整个系统的像质影响较小。

对相机在温控变化范围内, 应用光学软件对各相机进行了温度分析, 综合考虑了相机光机结构变形, 包括结构热变形导致的元件刚性位移以及光学元件在温度环境改变时的参数变化, 包括光学间隔、半径、光学折射率、非球面等的变化。

2.1 可见光相机系统随温度变化像质分析

温度变化对可见光相机系统的调制传递函数 MTF 影响如图 8 所示, 该系统采用 TDI-CCD, 像元尺寸为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, 奈奎斯特频率是 50 lp/mm。可见光相机系统的焦距所引起的变化如图 9 所示。

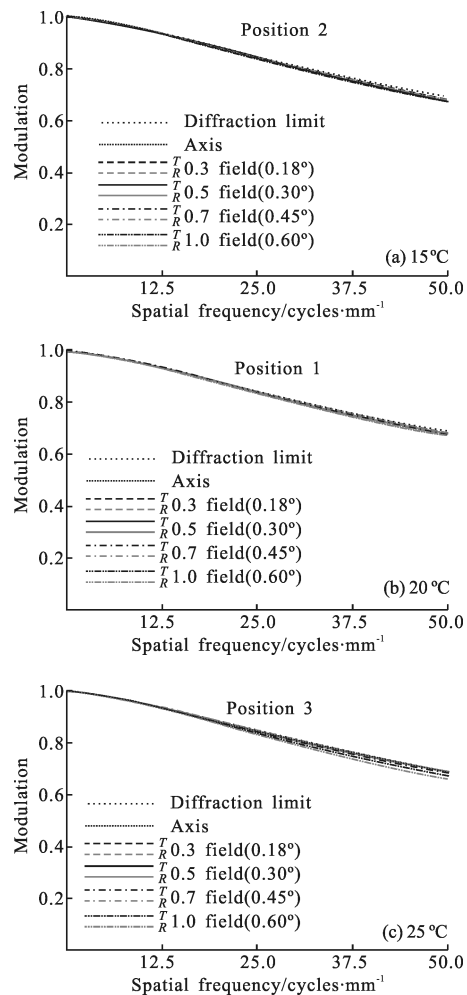


图 8 可见光相机不同温度下的调制传递函数曲线

Fig.8 MTF curves of visible camera at different temperatures

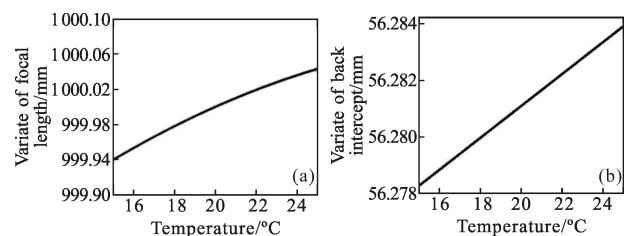


图 9 可见光相机焦距、后工作距变化量随温度变化情况

Fig.9 Variate of focal length and back intercept with different temperatures of visible camera

可知可见光相机系统两端温度的成像质量和中心温度的成像质量变化不大, 在整个温度 ($20 \pm 5\ ^\circ\text{C}$) 环境下成像质量变化极小。可见光相机系统的焦距和光学系统后工作距离在工作温度范围内随温度线性变化, 其中焦距变化幅度约为 $\pm 0.00016\%$, 光学系统后工作距离变化约为 $\pm 0.011\ \text{mm}$, 在焦深范围内。在正常热控情况下, 可见光相机的成像能力不受温度环境的影响。

2.2 长波红外相机系统随温度变化像质分析

长波红外相机系统的温度变化对系统的调制传递函数 MTF 影响如图 10 所示。该系统采用长波 384×288 非制冷焦平面阵列探测器，探测器像元尺寸为 25 μm×25 μm，奈奎斯特频率是 20 lp/mm。长波红外系统的焦距随温度变化所引起的变化如图 11 所示。

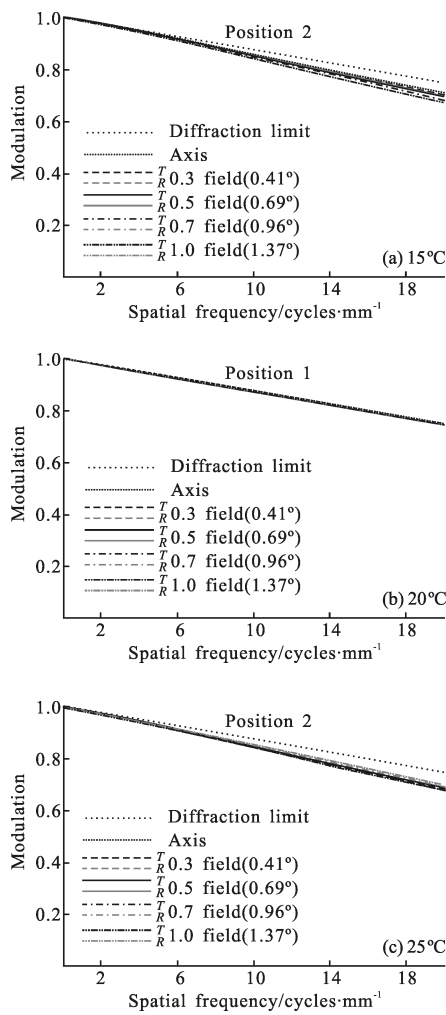


图 10 长波红外相机不同温度下的调制传递函数曲线

Fig.10 MTF curves of LWIR camera at different temperatures

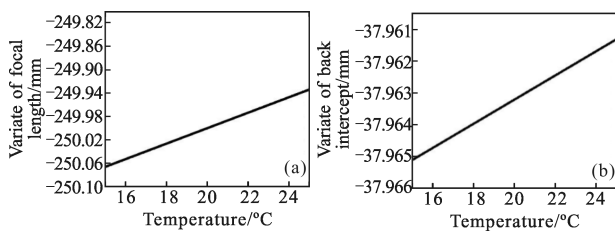


图 11 长波红外相机焦距、后工作距变化量随温度变化情况

Fig.11 Variate of focal length and back intercept with different temperatures of LWIR camera

可知长波红外相机系统中心温度的成像质量最好，两端温度的成像质量逐渐变差，在整个(20±5 °C)温度环境下成像质量变化不大。长波红外相机系统的焦距和光学系统后工作距离在工作温度范围内随温度线性变化，其中焦距变化幅度约为±0.000 72%，光学系统后工作距离变化约为±0.000 42 mm，在焦深范围内。在正常热控情况下，长波红外相机的成像能力不受温度环境的影响。

2.3 中波红外相机系统随温度变化像质分析

中波红外相机系统的温度变化对系统的调制传递函数 MTF 影响如图 12 所示。该系统采用中波 640×480 非制冷焦平面大阵列探测器，探测器像元尺寸为 15 μm×15 μm，奈奎斯特频率是 32 lp/mm。中红外系统的焦距随温度变化所引起的变化如图 13 所示。

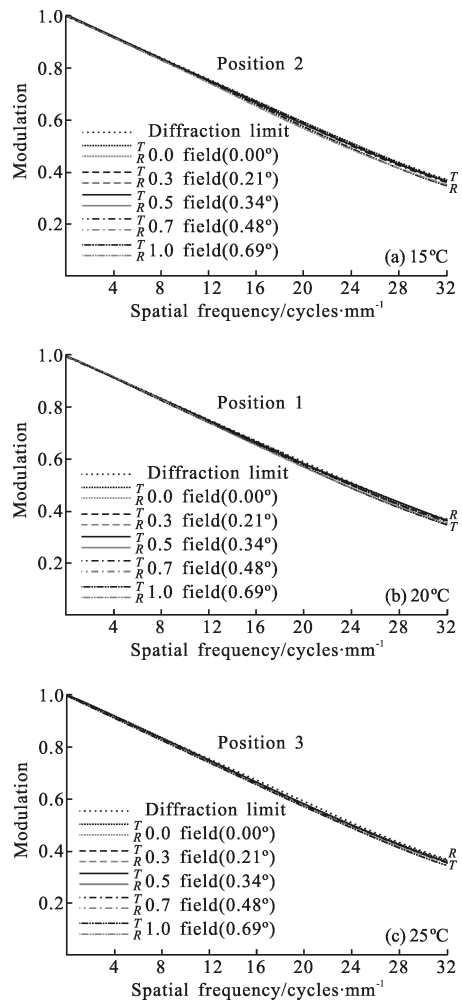


图 12 中波红外相机不同温度下的调制传递函数曲线

Fig.12 MTF curves of MWIR camera at different temperatures

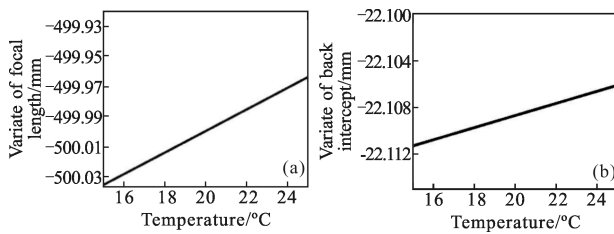


图 13 中波红外相机焦距、后工作距变化量随温度变化情况

Fig.13 Variate of focal length and back intercept with different temperatures of MWIR camera

可知中波红外相机系统两端温度的成像质量和中心温度的成像质量变化不大,在整个($20\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)温度环境下成像质量变化极小。中波红外相机系统的焦距和光学系统后工作距离在工作温度范围内随温度线性变化,其中焦距变化幅度约为 $\pm 0.00072\%$,光学系统后工作距离变化约为 $\pm 0.013\text{ mm}$,在焦深范围内。在正常热控情况下,中波红外相机的成像能力不受温度环境的影响。

3 结 论

提出了一种用于空间碎片探测的多光谱相机光学系统,可见光相机、长波红外相机、中波红外相机共用主、次镜并集成于一体,实现了光学载荷的轻小型设计要求,研究了空间环境温度变化对多光谱探测相机各子相机系统成像的影响,通过匹配透镜材料、合理分配透镜光焦度、并选用热膨胀系数小的材料作为镜筒和反射镜基底,分析结果表明,三个相机在空间环境($20\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)温度环境下的 MTF 变化不大,满足总体参数要求。

参 考 文 献:

- [1] Bischof B, Kerstein L, Starke J, et al. Roger -Robotic geostationary orbit restorer[C]//54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, 2003: 1365-1373.
- [2] Lichter M D, Dubowsky S. Shape, motion, and parameter estimation of large flexible space structures using range images [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation Piscataway, 2005: 4476-4481.
- [3] Yoshida K. Engineering test satellite VII flight experiment s for space robot dynamics and control: theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(5): 3212335.
- [4] Chang Linyin, Chen Rongli, Wen Deshen, et al. Space-based optical combination detection system of space Non-cooperative target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1232-1236. (in Chinese)
- [5] Niu Jinxin, Zhou Renkui, Liu Zhaohui. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 768-772. (in Chinese)
- [6] Bai Yu, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong. An athermal design of infrared hybrid diffractive/refractive optical system in $3.7 - 4.8\ \mu\text{m}$ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2261-2265. (in Chinese)
- [7] Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalized middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2010, 37(3): 675-680. (in Chinese)
- [8] Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2383-2387. (in Chinese)
- [9] Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(11): 1364-1367. (in Chinese)
- [10] Zhang Mingyi, Li Baoping, Wan Zhongnan, et al. Design of the switch-zoom dual-field-of-view infrared optical system with hybrid refractive-diffractive [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 850-853. (in Chinese)