

文章编号:1004-4213(2010)05-0866-5

20×非制冷型红外变焦光学系统设计

刘峰¹,徐熙平^{1,2},段洁^{1,2},孙向阳¹,任宇芬³

(1 长春理工大学 光电工程学院 航天技术研究所,长春 130022)

(2 长春理工大学 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心,长春 130022)

(3 郑州轻工业学院 技术与物理系,郑州 450002)

摘要:针对长波用 160×120 元非制冷焦平面阵列探测器,设计了 8~12 μm 波段折射式红外连续变焦光学系统.该系统具有相对孔径大,*F* 数为 1.1,变倍比高,变焦凸轮曲线平滑等特点.系统使用锗和硫化锌两种普通红外材料,通过引入非球面校正系统轴外像差,在中焦时采用平滑换根提高了变倍比,通过对凸轮曲线的优化设计,有效地控制了变焦过程中光轴漂移.系统在空间频率为 17 lp/mm 处,全焦距范围内调制传递函数均在 0.55 以上,接近衍射极限;系统在接收半径为 17.5 μm 的探测器敏感元内,能量集中度大于 78%,表明该系统具有良好的成像质量.

关键词:光学设计;连续变焦;动态光学;像移补偿

中图分类号: TN216

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103905.0866

0 引言

红外变焦光学系统通常是一类功能很明确的被动军用光学系统,此类系统能够探测、定位并连续跟踪在红外背景辐射和其它干扰下发射红外线的物体和目标^[1-3].作为系统重要组成部分的红外连续变焦镜头能在一定范围内改变系统焦距,使目标在像面上的大小连续可变,可达到大视场搜索目标、小视场准确观察目标的目的^[4].在红外夜视、红外侦察以及红外制导等方面被广泛应用的红外探测器具有环境适应性好、抗干扰能力强且设备体积小、重量轻、功耗低等特点^[5],采用非致冷焦平面阵列探测器的红外或热成像系统,具有不需要机械扫描、便于携带、功耗造价低、可靠性好等优点,愈来愈广泛的应用于军事和民用领域^[6].随着红外非制冷探测器技术的成熟,非制冷热像仪在各个领域得到了广泛应用,红外定焦镜头已经不能满足一些特殊要求,所以设计红外变焦镜头具有一定的现实意义.

针对长波红外非制冷型 160×120 面阵探测器,本文设计了一款 20×红外连续变焦光学系统.该系统使用锗和硫化锌两种普通红外材料,为了实现高性能、高质量,系统引入了三个偶次非球面,在中焦时使用平滑换根提高了系统变焦倍率,通过对像移补偿公式的分析,推导出变焦凸轮曲线曲率关系式,并由此公式分析出影响变焦凸轮曲线曲率的因素.所设计的高变倍比、高成像质量的长波红外连续变

焦光学系统,克服了在以往的红外变焦光学系统存在变倍比高、相对孔径小或者相对孔径大、变倍比小的缺点.

1 光学参量指标的确定

采用 Sofradir 公司生产的长波红外非制冷型 160×120 pixel² 面阵探测器,敏感元尺寸为 35×35 μm²,设计一种大相对孔径的变焦镜头,主要设计指标如表 1.

表 1 光学系统参量

Table 1 Parameters of optical system

| | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| Wavelength /μm | 8~12 |
| Zoom ratio | 20× |
| Focal length /mm | 8~160 |
| Height of image (Diagonal) /mm | 3.5 |
| <i>F</i> # | 1.1 |
| Field of view/(°) | 47.26 (short EFL) 2.51 (long EFL) |

2 光学系统设计

根据动态光学理论,对于一个二组元稳像光学系统,变倍组与补偿组的运动关系为

$$Aq_2^2 + Bq_2 + C = 0 \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned}
 A &= (f'_2 - \beta_1 q_1) \beta_2, \\
 B &= \beta_1 \beta_2 q_1^2 + [f'_3 (1 - \beta_2^2) \beta_1 - f'_2 (1 - \beta_1^2) \beta_2] q_1 - f'_2 f'_3 (1 - \beta_2^2), \\
 C &= \beta_2^2 f'_3 [\beta_1 q_1 - f'_2 (1 - \beta_1^2)] q_1,
 \end{aligned}$$

即

$$q_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2)$$

[†] Tel: 0431-85583324

Email: liufenggjy@163.com

收稿日期: 2009-08-04

修回日期: 2009-10-09

式中 β_1 表示变倍组初始位置的垂轴放大率; β_2 表示补偿组初始位置的垂轴放大率; q_1 表示变倍组沿光轴位移量; q_2 表示补偿组沿光轴位移量; f'_2 为变倍组的焦距; f'_3 为补偿组的焦距^[7].

变倍组做一维直线运动时,若补偿组的运动曲线曲率变化较大,不易于变焦凸轮的机械加工,而且在变焦过程中容易引起系统光轴漂移.所以,凸轮曲线的优化设计对整个系统的设计、加工制作具有重要的意义.对式(2)求 q_1 的一阶导数可得到补偿曲线曲率关系式(3)

$$\frac{dq_2}{dq_1} = \frac{q_1 - \frac{q_1^3 - 2f'_2 f'_3 q_1 - 3f'_3 q_1^2}{(q_1^4 - 4f'_2 f'_3 q_1^2 - 4f'_3 q_1^3)^{1/2}}}{f'_2 + q_1} +$$

$$\frac{-q_1^2 - (q_1^4 - 4f'_2 f'_3 q_1^2)^{1/2}}{2(f'_2 + q_1)^2} \quad (3)$$

通过分析式(3)可知,为了使补偿曲线平缓,即要求补偿组在变倍过程中位移增大,应将变倍组和补偿组的间距 d_{23} 以及补偿组焦距 f'_3 取值加大.所选,拟定初始结构各组元的焦距分别为前固定组 $f'_1 = 218$ mm,变倍组焦距 $f'_2 = -41$ mm,补偿组焦距 $f'_3 = 53.6$ mm,后固定组 $f'_4 = 24$ mm,将各组元按变倍组放大倍率 $\beta_2 = -1$,补偿组放大倍率 $\beta_2 = -1$ 进行组合,得到初始系统的中焦结构,各组元的间距值为 $d_{12} = 38$ mm, $d_{23} = 74$ mm, $d_{34} = 17$ mm,系统的初始数据见表 2.

表 2 系统初始数据

Table 2 Initial parameters of the system

| Surf; type | Radius | Thickness | Glass | Semi-diameter |
|------------|----------|--------------|-----------|---------------|
| OBJ | Standard | Infinity | | Infinity |
| 1 | Standard | 196.389 840 | GERMANIUM | 60.631 638 |
| 2 | Standard | 406.271 057 | | 56.365 866 |
| 3 | Standard | 637.572 098 | GERMANIUM | 51.835 992 |
| 4 | Standard | 303.382 146 | | 48.769 087 |
| 5 | Standard | 571.801 771 | GERMANIUM | 21.387 323 |
| 6 | Standard | 933.798 814 | | 20.453 264 |
| 7 | Standard | -263.375 414 | GERMANIUM | 19.129 051 |
| 8 | Standard | 196.812 114 | | 18.753 516 |
| 9 | Standard | 252.896 713 | GERMANIUM | 22.258 368 |
| 10 | Standard | -432.176 492 | | 22.036 875 |
| ST0 | Standard | Infinity | | 13.523 363 |
| 12 | Standard | -34.659 665 | GERMANIUM | 12.578 222 |
| 13 | Standard | -42.890 882 | | 14.466 188 |
| 14 | Standard | 38.472 418 | GERMANIUM | 14.098 476 |
| 15 | Standard | 54.776 925 | | 12.013 462 |
| 16 | Standard | 91.091 395 | ZNS_BROAD | 11.127 335 |
| 17 | Standard | 94.012 384 | M | 8.474 203 |
| IMA | Standard | Infinity | - | 3.403 285 |

用 ZEMAX 光学设计软件对初始数据进行焦距缩放和优化,同时去掉变倍组一块透镜,简化系统结构,通过引入三个偶次非球面校正高级像差,设计出较理想的变焦系统.由于初始数据只考虑了焦距,未考虑校正像差,所以,设计结果和初始数据具有较

大的差异,优化后系统各组元的焦距和间距分别为前固定组 $f'_1 = 303.19$ mm,变倍组 $f'_2 = -46.27$ mm,补偿组 $f'_3 = 55.4$ mm,后固定组 $f'_4 = 25.5$ mm, $d_{12} = 149.68$ mm, $d_{23} = 38.34$ mm, $d_{34} = 31.07$ mm,系统最终参量见表 3.

表 3 系统最终参量

Table 3 Last detailed parameters of the system

| Surf; type | Radius | Thickness | Glass | Semi-diameter |
|------------|--------------|---------------|-----------|---------------|
| OBJ | Standard | Infinity | | Infinity |
| 1* | Even asphere | 215.050 000 | GERMANIUM | 115.000 000 U |
| 2* | Standard | 497.860 000 | | 110.000 000 U |
| 3* | Standard | 581.600 000 | GERMANIUM | 110.000 000 U |
| 4* | Standard | 367.650 000 | | 115.000 000 U |
| 5* | Standard | -1001.400 000 | GERMANIUM | 34.000 000 U |
| 6* | Standard | 162.490 000 | | 34.000 000 U |

(续表)

| Surf: type | Radius | Thickness | Glass | Semi-diameter |
|------------|--------------|--------------|-----------|---------------|
| 7 * | Standard | 199.100 000 | GERMANIUM | 34.000 000 U |
| 8 * | Standard | -981.470 000 | | 34.000 000 U |
| ST0 | Standard | Infinity | | 12.548 476 |
| 10 * | Standard | -27.930 000 | GERMANIUM | 15.000 000 U |
| 11 * | Even asphere | -48.350 000 | | 18.000 000 U |
| 12 * | Standard | 45.160 000 | GERMANIUM | 18.000 000 U |
| 13 * | Standard | 74.490 000 0 | | 17.000 000 U |
| 14 * | Standard | -68.570 000 | ZNS_BROAD | 14.000 000 U |
| 15 * | Even asphere | -45.870 000 | | 16.000 000 U |
| IMA | Standard | Infinity | - | 3.524 098 |

Surface 1: $k = -0.141\ 628$, $\alpha_1 = -4.44\ 093\text{E-}004$, $\alpha_2 = -3.84\ 5978\text{E-}009$, $\alpha_3 = -3.75\ 8551\text{E-}014$,
 $\alpha_4 = -9.720\ 598\text{E-}019$

Surface 11: $k = -2.032\ 098$, $\alpha_1 = -3.074\ 431\text{E-}003$, $\alpha_2 = -4.142\ 867\text{E-}006$, $\alpha_3 = -2.919\ 053\text{E-}010$,
 $\alpha_4 = -2.281\ 827\text{E-}011$

Surface 15: $k = -17.793\ 315$, $\alpha_1 = -1.386\ 553\text{E-}003$, $\alpha_2 = -1.220\ 811\text{E-}005$, $\alpha_3 = 2.821\ 803\text{E-}008$,
 $\alpha_4 = -3.536\ 006\text{E-}011$

3 设计结果与分析

设计的系统总长为 357.1 mm, 后工作距为 13.4 mm, 图 1 给出了变焦系统在长焦、中焦和短焦

的结构图. 表 4 给出了系统焦距分别为 7.88 mm、42.44 mm、80.88 mm、121.51 mm 和 160 mm 时各组元的间距值.

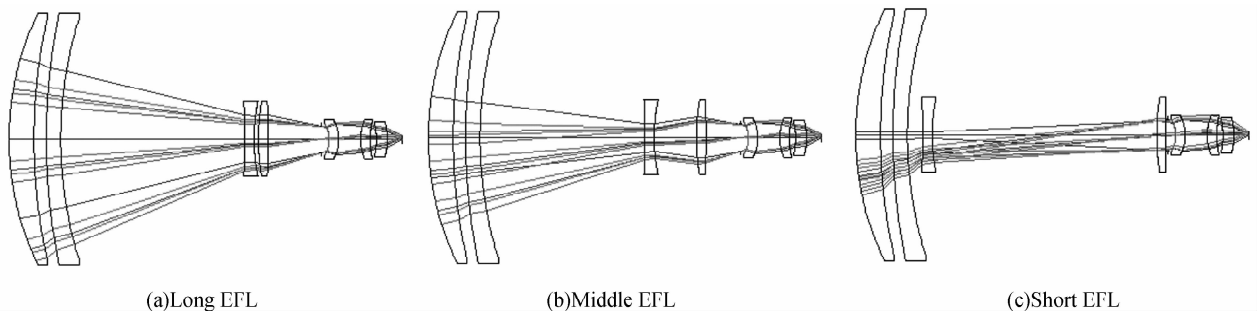


图 1 连续变焦系统图

Fig.1 Four-component zoom

表 4 不同焦距时各组元的间距值

Table 4 Construction parameters of optical system

| Active:3/5 | Config 1 | Config 2 | Config 3 * | Config 4 | Config 5 |
|------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1:THIC | 4 | 13.850 000 | 126.310 000 | 149.680 000 | 160.150 000 |
| 2:THIC | 6 | 204.030 000 | 73.350 000 | 38.340 000 | 17.610 000 |
| 3:THIC | 8 | 1.200 000 | 19.420 000 | 31.070 000 | 41.320 000 |

3.1 传递函数分析

图 2 为变焦系统在长焦、中焦和短焦时的传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线, 三种曲线表明该系统的调制传递函数在 17 lp/mm 处均在 0.55 以上; 而探测器的像敏单元尺寸为 $35 \times 35 \mu\text{m}^2$, 其极限分辨率为 14 lp/mm, 说明设计的镜头分辨率大于探测器的极限分辨率, 因此, 该系统在全焦距范围内有较好的成像质量. 表 5 列出了系统

在不同焦距时零视场和边缘视场的 MTF 值 (17 lp/mm).

表 5 不同焦距时零视场和边缘视场的 MTF 值

Table 5 Value of MTF for zoom optical system

| Focal length | 7.88 | 42.44 | 80.88 | 121.51 | 160 |
|--------------|------|-------|-------|--------|------|
| On-axis MTF | 0.68 | 0.72 | 0.65 | 0.63 | 0.63 |
| Off-axis MTF | 0.55 | 0.67 | 0.62 | 0.59 | 0.55 |

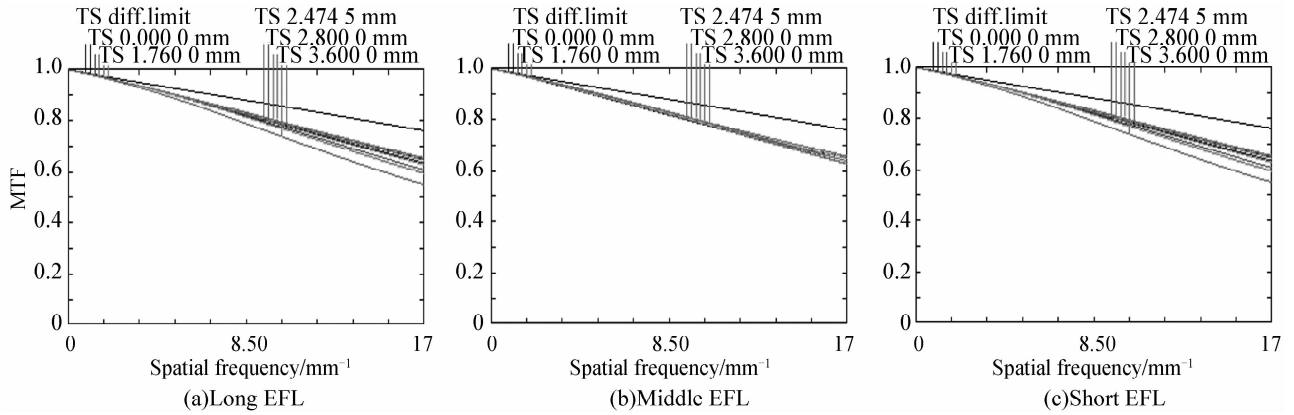


图 2 光学系统传递函数曲线
Fig. 2 Curves of MTF

3.2 几何能量分析

图 3 为光学系统在长焦、中焦和短焦时的几何能量分布曲线. 三种曲线图表明该系统在探测器敏

感元尺寸 35 μm 内时, 能量集中度均大于 78%, 满足红外非制冷探测器分辨率的基本要求^[8].

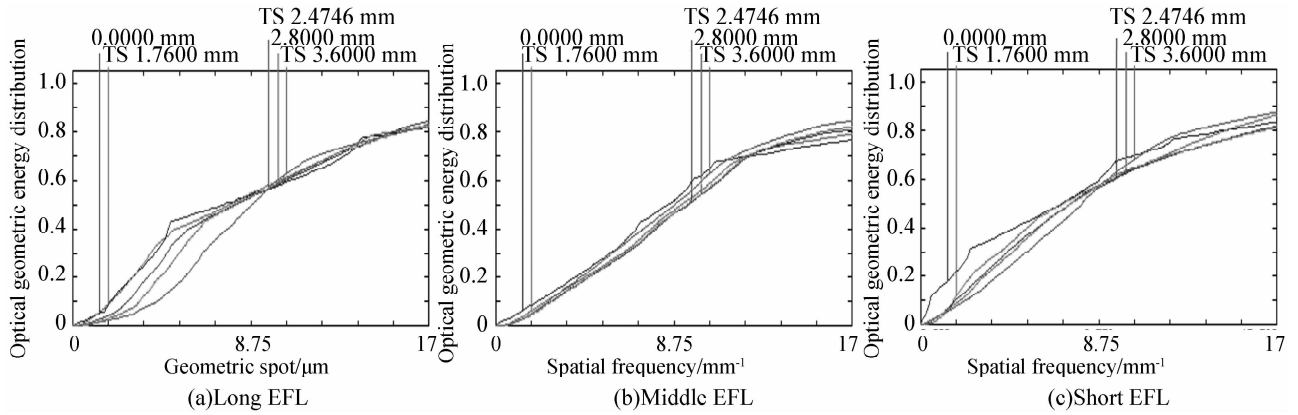


图 3 光学系统几何能量曲线
Fig. 3 Curves of optical energy distribution

3.3 变焦凸轮曲线分析

通过 ZEMAX 光学设计软件中的多重结构 (multi-configurations), 可以得到变焦系统在变焦过程中变倍组与补偿组离散的相对位置关系, 并用 Matlab 软件拟合出变焦系统的补偿曲线如图 4. 由图可看出, 补偿组在整个变焦过程中运动距离较大, 曲线曲率变化平缓, 达到减缓凸轮曲线曲率变化的目的, 有效地减小了变焦过程中光轴漂移, 这样更有利于凸轮曲线的加工.

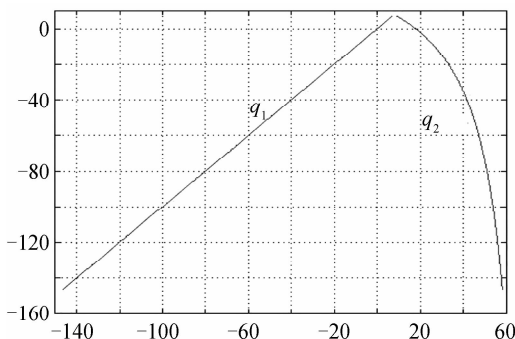


图 4 变倍组与补偿组的变化关系曲线
Fig. 4 Curves of variator versus compensator

4 结论

针对红外非制冷系统大相对孔径的实际要求, 通过平滑换根和对凸轮曲线的优化, 设计出一种应用于热红外波段的折射型光学系统. 该系统与以往的变焦系统相比, 具有结构简单紧凑、光学传递函数接近衍射极限、系统透过率高、变倍比高、相对孔径大和变焦凸轮曲线平滑等优点. 高变倍比、大相对孔径的红外变焦系统小型化、轻量化是红外变焦系统发展的必然趋势, 将在军用、民用方面, 特别是在目标跟踪和识别系统中得到广泛应用.

参考文献

[1] CHEN Jin-jin, ZHAO Jin-song. A compact MWIR objective for infrared search/tracking system [J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(5): 279-282.
陈津津, 赵劲松. 一种紧凑型折射式红外搜索/跟踪光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2008, **30**(5): 279-282.
[2] TIAN Hai-xia, YANG Jian-feng, MA Xiao-long. Design for visible video zoom optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **37**(9): 1797-1799.
田海霞, 杨建峰, 马小龙. 可见光变焦电视光学系统设计 [J]. *光子学报*, 2007, **37**(9): 1797-1799.

- [3] BAI Qing-lan. Apochromatized design of teleobjective in short wave infrared band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 115-119.
白清兰. 复消色差的短波红外望远物镜设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 115-119.
- [4] HAN Ying, WANG Zhao-qi, WU Huan-bao, *et al.* Diffractive/refractive two-position step-zoom optical system in 8~12 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 886-889.
韩莹, 王肇圻, 吴环宝, 等. 紧凑型 8~12 μm 波段折/衍射混合双位置两档变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 886-889.
- [5] KONG Ling-bin, YI Xin-jian, WANG Dian-hong, *et al.* Design of 320 \times 240 longwave uncooled microbolometer Infrared thermal camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5): 596-600.
孔令宾, 易新建, 王典洪, 等. 320 \times 340 长波非制冷微测辐射热计红外热像仪的研制[J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 886-889.
- [6] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jian-jun. Infrared fast objective with wide field of view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 460-463.
沈为民, 薛鸣球, 余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜[J]. 光子学报, 2004, **33**(4): 460-463.
- [7] WANG Chun-yan, WANG Zhi-jian, ZHOU Qing-cai. Solving the cam curve of the compensating group about zoom lens using dynamic optical theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 891-894.
王春艳, 王志坚, 周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮曲线[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 891-894.
- [8] WANG Hai-tao, GUO Liang-xian. Cooled thermal imaging mid-wavelength infrared zoom camera [J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(1): 8-12.
王海涛, 郭良贤. 制冷型中波红外变焦镜头[J]. 红外技术, 2007, **29**(1): 8-12.

Design of 20 \times Uncooled Thermal Infrared Continuous-zoom Lenses

LIU Feng¹, XU Xi-ping^{1,2}, DUAN Jie^{1,2}, SUN Xiang-yang¹, REN Yu-fen³

(1 Institute of Aerospace Technology, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Research Center of Opto-electrical Measurement and Control Instrument Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(3 Department of Technology and Physics, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: 8~12 μm infrared (IR) hybrid refractive continuous zoom lenses are designed, based on long-wave 160 \times 120 element uncooled thermal IR focal plane arrays (FPA) detector. The continuous zoom system has a large relative aperture, the $F\# = 1.1$, high zoom ratio, smooth curve of zoom. Two common infrared materials of Ge and ZnS are used in this optical system. To correct off axis aberration, aspheric surface is accepted, zoom ratio can be improved by solving compensated curves at the middle equivalent focal length, and the optimum design of cam curve has brought the optical axis drift under control in the process of zoom. The modulation transfer function (MTF) is above 0.55 in all focal lengths at the spatial frequency of 17 lp/mm and approaches the diffraction limit. The energy permeance ratio is greater than 78% within the detector sensor limits smaller than 17.5 μm , which shows that the optical system has good imaging quality.

Key words: Optical design; Continuous-zoom; Dynamic optical theory; Image shifting Compensation



LIU Feng was born 1984. As a M. S. degree candidate, his research interests focus on infrared optical testing technology and optical design.



XU Xi-ping was born 1969, and received the Ph. D. degree in 2004. As a professor and Doctoral Supervisor, he is engaged in space science and technology, optoelectronics equipment and testing technology research.