

文章编号 2095-1531(2015)01-0107-07

扫描型长波红外连续变焦光学系统

骆守俊*, 夏寅辉, 杨宁宁, 于繁迪
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:基于斯特林制冷式 4×288 元光伏型碲镉汞二维探测器,根据红外扫描成像系统原理,设计了一个扫描型长波红外连续变焦光学系统。根据系统指标要求对光学指标进行分解计算及光学优化设计得到系统的光学参数和外形结构图,并对扫描光学系统的冷反射进行分析优化。该光学系统采用三次成像的结构,由变焦望远镜组、扫描摆镜、中继镜组、成像镜组4部分组成,包含9片透镜和2片反射镜。为了降低校正色差成本,系统使用了硫系玻璃镜片。光学仿真结果表明:系统在耐奎斯特频率处的全视场光学传递函数大于0.35,全视场畸变小于2%。最后,对系统进行了成像实验验证,结果表明:该系统可以实现30.8~154 mm范围内连续变焦,变焦过程中目标景物清晰,细节分辨率高,无冷反射现象出现,该系统具有分辨率高、热灵敏度高、像质清晰等特点。

关键词:红外扫描系统;连续变焦;冷反射;三次成像

中图分类号:TN215 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150801.0107

Long-wavelength infrared continuous zoom scanning optical system

LUO Shou-jun*, XIA Yin-hui, YANG Ning-ning, YU Fan-di
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

* Corresponding author, E-mail: luoshoujun@139.com

Abstract: Using infrared scanning system principle, a novel long-wavelength continuous zoom scanning optical system is presented based on 4×288 infrared MCT detector dewar cooled assembly. Related optical index parameters are resolved and calculated according to requirements of system, and the optical design parameters and outside view are obtained by the optical design software. The narcissus effect of the scanning optical system are analyzed and optimized. The optical system is composed of zoom telescope, scanning mirror, relay lens, imaging lens and a tertiary imaging system including nine lenses and two reflectors. In order to reduce cost and optical color aberrations, chalcogenide glass lens is used. The optical index is simulated, and the MTF in whole field at Nyquist frequency is over 0.35 and distortion is below 2%. Finally the system imaging experimental verification is conducted. The results indicate that 30.8 ~ 154 mm continuous zoom and 100% cold shield efficiency are achieved. High resolution, thermal sensibility, excellent images are validated.

Key words: infrared scanning system; continuous zoom; narcissus effect; tertiary imaging

收稿日期:2014-10-17;修订日期:2014-12-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2013AA0342)

1 引言

红外成像系统具有全天候工作,不需要辅助照明,并且其被动工作方式不会被对方电子干扰,图像直观,易于观察等优点,在警戒、侦察和制导等军事领域中得到了广泛应用^[1-3]。由辐射理论得知:温度为 300 K 的黑体,其能量辐射的峰值波长为 $9.5 \mu\text{m}$ 。而通常的目标(如地面掩体、工厂、大坝、车辆、轮船、生物乃至中段飞行的导弹等)温度一般不高,尤其在受到低温环境的影响时,其辐射能力进一步下降,辐射能量主要在长波段。这样,相对于中波 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,长波红外成像系统在探测识别方面更具优势。但在远距离探测领域,由于非制冷长波探测器的灵敏度相对较低,不能满足用户的需求。面阵长波制冷型探测器工艺复杂,价格较为昂贵,而线列长波制冷型探测器性价比较高。而且,线列探测器系统既可用作周视扫描搜索,又可用进行目标的跟踪观察,应用前景广阔^[4-7]。

众所周知,一般双视场或多视场光学系统在切换视场时存在两个问题:其一,在切换时间间隔内没有目标图像;其二,由于视场数有限,目标的大小和视场不匹配造成目标显示过大或过小的状况,不利于实际观察。连续变焦光学系统则能很好地解决上述问题,其在变焦的过程中,不会发生目标丢失的现象,并可根据目标大小自由调节光学系统焦距,因而,更方便用户观察使用,其需求日益增强^[8-12]。

本文基于 4×288 元光伏型碲镉汞二维探测器,设计了一个 5 倍扫描型长波红外连续变焦光学系统。采用三次成像结构和折叠光路的设计。测试结果表明:该系统在连续变焦过程中全视场范围内图像清晰、细节分辨率好、对比度高、畸变小、满足实际使用要求。

2 连续变焦扫描模型

连续变焦扫描光学系统的基本模型如图 1 所示,其基本成分四个部分,分别为变焦望远镜

组、扫描镜、中继镜组、成像镜组。光线通过变焦望远镜组后变为放大率不同的平行光;经过以 $\pm\theta$ 角摆动的扫描镜进入中继镜组后形成二次像面;再经由成像镜组在探测器焦面上形成三次像面。最后通过成像电路处理,将一个摆扫周期内采集的信号拼接起来得到设定视场的视频图像。

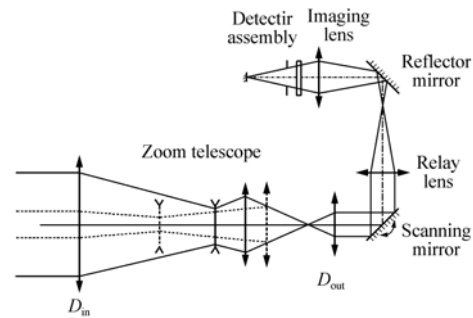


图 1 变焦扫描系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of zoom scanning imaging system

扫描摆镜的尺寸、摆动惯量、转动的线性度决定了光学系统的放大率及系统对空间采样的均匀性。图 1 中, D_{in} 为光学系统的入瞳, D_{out} 为变焦望远镜组的出瞳,其放大率用下式表达:

$$\gamma = \frac{D_{in}}{D_{out}}, \quad (1)$$

扫描摆镜的扫描角度 α 也与 γ 相关,设 θ 为视场角,则:

$$\alpha = \pm \frac{1}{4}\theta \cdot \gamma, \quad (2)$$

从式(1)、(2)可以看出,放大率 γ 主要影响扫描摆镜的镜面尺寸以及反射镜的线性扫描角。 γ 值越大, D_{out} 就越小,扫描摆镜的线性扫描角就越大^[13]。而摆镜的高频、大线性扫描在控制上有难度,也会影响其稳定性及寿命。因此,在光学系统设计时须考虑到摆镜实际达到的技术参数。

此外,在设计制冷型红外光学系统时,系统的出瞳为探测器的冷光阑。为减小光学系统第一片镜的尺寸并达到 100% 冷光阑效率,采用了三次成像方式。保证扫描成像的同时将冷光阑的共轭面投影到第一片镜位置处。

3 设计与结果分析

3.1 系统的设计参数

系统采用了斯特林制冷式 4×288 元光伏型碲镉汞二维探测器,其响应波段为 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$,像元尺寸为 $28 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, F 数为 1.67。光学系统焦距为 $30.8 \sim 154 \text{ mm}$,极限频率下 MTF 值大于 0.35,空间尺寸小于 $216 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 105 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高),系统平均透过率大于 76%,畸变小于 2%。

3.2 设计思路

扫描摆镜的参数设定影响着整个系统的稳定性和成像质量。根据摆镜的转动惯量和控制精度及光学设计优化的需要,设定摆镜的线性扫描角为 $\pm 8.4^\circ$ 。

光学系统设计时,将变倍望远镜组和成像镜组分别独立设计。变倍望远镜组采用开普勒望远镜的设计型式,由两个正光焦度的物镜组和准直目镜组构成,物镜框既是孔径光阑也是入瞳。根据系统焦距及 F 数确定长焦时变倍望远镜组入瞳为 92.2 mm 。变倍构型采用负正透镜组合,使用负透镜大范围移动来实现 5 倍光学变焦,使用正透镜的轴向移动作像面离焦补偿。为了保证一定的出瞳距以利于扫描摆镜工作,准直目镜组焦距不宜小于 10 mm ,经过设计优化,设定其焦距为 14.9 mm 。成像镜组焦距为 65.48 mm 。两部分设计完成后加入中继镜组进行进一步整体优化设计,并考虑到探测器冷屏既是整个系统的孔径光阑又是其出瞳,需要满足 100% 冷光阑效率。

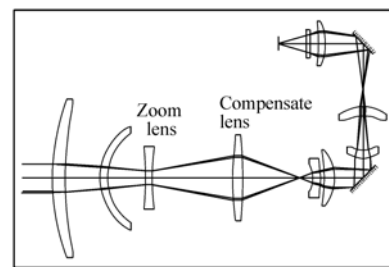
为了校正色差和降低成本,系统使用了硫系玻璃^[14],并在一片锗透镜上使用了衍射面。此外,系统还通过使用非球面来减小象差,提高像质,并减少镜片数目,提高系统透过率。

冷反射效应发生于前置的光学系统中折射面的微弱反射。它能使探测器看到自身,特别是反射的图像靠近焦点位置时,冷反射效应就更明显,结果在显示的图像上出现一个暗斑。需要注意的是,冷反射效应也可能是冷屏的图像。对于扫描系统来说,反射的能量可能随扫描角度而变化,相

应的输出变化被称为扫描噪声,严重干扰对图像的观察^[15]。因此在优化设计时需要特别注意,对于产生冷反射较严重的面,加入曲率半径的约束条件,改变该面近轴主光线和边缘光线的角度,减小冷反射量值。此外,通过镀膜材料工艺的改进来减小镜片反射率,从而降低冷反射的影响,也是一个有效途径。

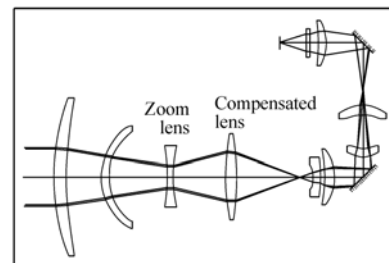
3.3 设计结果

设计完成的外形结构图如图 2(a)、2(b)、2(c)所示。系统是一由 9 片透镜、扫描摆镜及反射镜构成的折叠光路。其中,变倍望远镜组由 6 片镜片构成,分别为前镜组、变倍镜、补偿镜、准直目镜组。为了消色差,第 2 片镜片及第 5 片镜片采用了硫系玻璃材料。中继镜组由两个锗镜片构



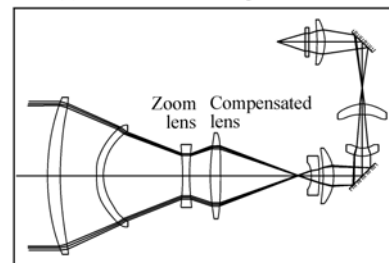
(a) 有效焦距 30.8 mm

(a) Effective focal length: 30.8 mm



(a) 有效焦距 61.6 mm

(b) Effective focal length: 61.6 mm



(c) 有效焦距 154 mm

(c) Effective focal length: 154 mm

图2 不同变焦位置的光学结构图

Fig. 2 Optical layout in different zoom position

成。成像镜组由单透镜构成。整体外形尺寸为 214.8 mm × 147.6 mm × 104 mm, 满足实际安装

空间要求。

系统的第三片透镜和第四片透镜为变焦镜和补偿镜,其变焦时运动轨迹见图 3 所示。图中纵坐标为变焦镜和补偿镜到光学系统第四个面顶点的距离,横坐标为对应的系统焦距值,上下两条曲线分别代表补偿镜和变焦镜的运动轨迹。其变焦轨迹简单平滑,无突变点,在工程上易于实现。

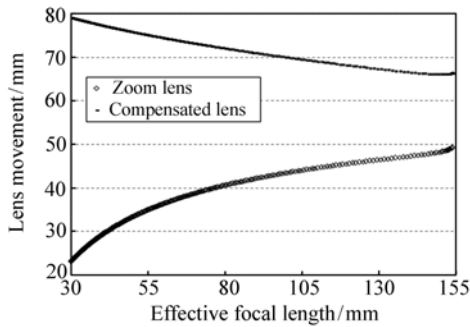


图 3 变焦系统运动轨迹图

Fig. 3 Movement track of zoom system

3.4 设计评价

3.4.1 传递函数

根据耐奎斯特定律,得到 25 μm 探测器的特征频率为 20 lp/mm。图 4(a)、4(b)、4(c)分别为短焦、中焦和长焦状态下全视场的传递函数曲线。由图可见,其全视场在特征频率下 MTF 大于 0.35,满足应用要求。

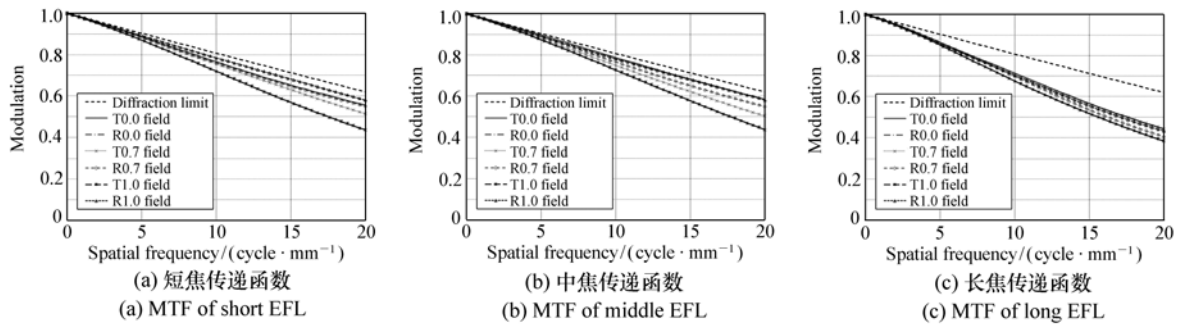


图 4 不同变焦位置的 MTF 曲线图

Fig. 4 MTF in different zoom position

3.4.2 能量集中度

系统在典型变焦位置处的能量集中度如图 5

所示。探测器单个像元内能量集中度在 70% 以上,满足使用需求。

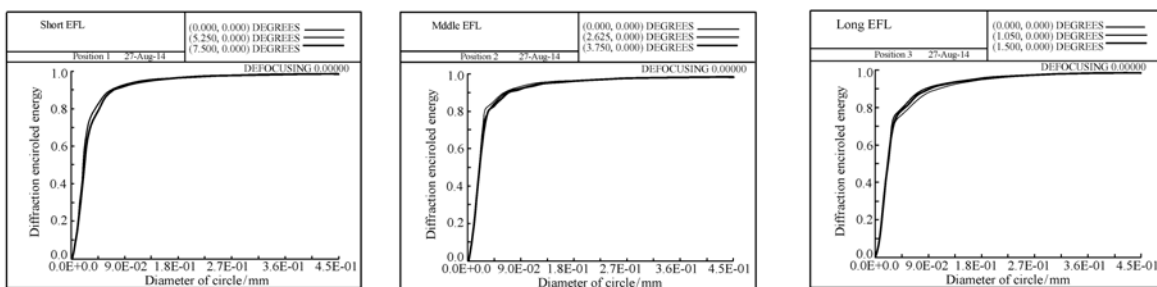


图 5 不同变焦位置的衍射能量集中度

Fig. 5 Diffraction encircled energy in different zoom position

3.4.3 畸变

图 6 为系统在不同变焦位置处的全视场畸

变。可以看出,系统的全视场畸变满足小于 2% 的指标要求。

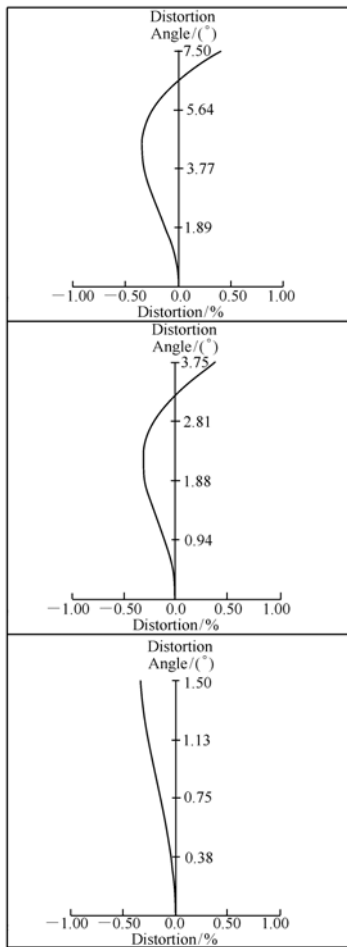


图 6 不同变焦位置的畸变图

Fig. 6 Distortion in different zoom position

3.5 成像实验

图 7 为对远距离景物成像在不同焦距位置处的视频截图,场景中的树木、电线杆、草地、铝合金窗等目标清晰可见,没有出现冷反射导致的中心暗斑现象,也没有出现摆镜扫描带来的图像畸变。图像背景显示比较均匀,没有外部热干扰导致的中心和周边亮暗不一致的现象出现,由此可看出:整个变焦过程中全视场范围内图像清晰,细节分辨率好,对比度高。测试结果表明系统的透过率大于 77.2%,全视场最大畸变为 1.6%,满足使用要求。

4 结 论

基于 4×288 元光伏型碲镉汞二维探测器,设

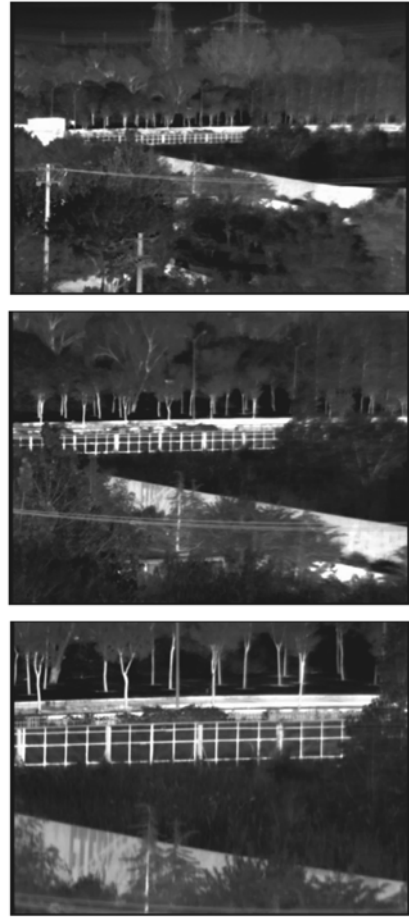


图 7 对远距离景物成像在不同焦距位置处的视频截图

Fig. 7 Screenshots of imaging for long distance objective in different zoom position

计了一个 5 倍扫描型长波红外连续变焦光学系统。该系统由主要由变倍望远镜组、扫描镜、中继镜组、成像镜组构成。系统使用了硫系玻璃材料来消色差并降低成本,并使用了非球面及衍射面来减少镜片数目,提高系统透过率,提升像质。

系统采用三次成像结构和折叠光路的设计,得到了较为紧凑的结构形式,满足系统总体对空间尺寸限制的要求,实现了 100% 的冷光阑效率。

在变焦控制上,采用两个步进电机分别控制变焦镜和补偿镜,根据不同的环境温度设置不同的运动轨迹曲线数据。通过系统自带的温度传感器感知环境温度并选择相应的已存储的轨迹数据,在 $-40 \sim +70$ °C 的范围内实现了焦距由 30.8 ~ 154 mm 的连续变焦,并且变焦过程中像面始终保持清晰。

该系统基于转台既可以进行周视扫描搜索, 领域有着广阔的应用前景。也可进行目标的跟踪。因而在搜索、警戒、侦察等

参考文献:

- [1] CHIH W K, JR M M, CHANG H. Midwave infrared optical zooming design and kinoform degrading evaluation methods [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18):3043-3049.
- [2] RONTIS, SOLAZZO S, BLANCO A, *et al.*. An infrared zoom for space applications [J]. *Planetary and Space Science*, 2000, 48:523-528.
- [3] 骆守俊, 李江勇, 夏寅辉, 等. 远程运动点目标探测影响因素分析 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(8):898-901.
LUO SH J, LI J Y, XIA Y H, *et al.*. Influence factors on detection of long range moving point target [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(8):898-901. (in Chinese)
- [4] 邱海华. 大口径内扫描红外变焦光学系统设计 [J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(3):86-89.
QIU H H. Optical design of large aperture scanning infrared zoom system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(3):86-89. (in Chinese)
- [5] 孙爱平, 龚杨云, 陈忠, 等. 大孔径、大视场辅助驾驶仪红外镜头无热化设计 [J]. *红外技术*, 2013, 35(10):617-622.
SUN A P, GONG Y Y, CHEN ZH, *et al.*. Athermal design of a large-aperture, wide-field assisting pilot infrared lens [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(10):617-622. (in Chinese)
- [6] 邱民朴. 大视场红外扫描成像光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2012, 34(11):648-651.
QIU M P. Optical design of wide FOV infrared scanning imaging system [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(11):648-651. (in Chinese)
- [7] 赵新亮, 王海霞, 崔莉, 等. 长波双视场扫描型红外光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8):1517-1520.
ZHAO X L, WANG H X, CUI L, *et al.*. Design of dual-field scanning LWIR optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8):1517-1520. (in Chinese)
- [8] 曲贺盟, 张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计 [J]. *中国光学*, 2014, 7(4):622-629.
QU H M, ZHANG X. Design of athermalized infrared optical system with high-speed switching and compact dual-FOV [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4):622-629. (in Chinese)
- [9] 白玉琢, 木锐, 马琳, 等. 超长焦距红外双视场光学系统设计 [J]. *中国光学*, 2014, 7(4):631-636.
BAI Y Z, MU R, MA L, *et al.*. Design of infrared optical system with super-long focal length and dual field-of-view [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4):631-636. (in Chinese)
- [10] 骆守俊, 何伍斌, 李文虎, 等. 大面阵中波红外连续变焦光学系统 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10):2117-2122.
LUO SH J, HE W B, LI W H, *et al.*. Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10):2117-2122. (in Chinese)
- [11] 杨为锦, 孙强. 中波红外连续变焦系统设计 [J]. *中国光学*, 2010, 1(2):164-169.
YANG W J, SUN Q. Design of middle infrared continuous zoom system [J]. *Chinese Optics*, 2010, 1(2):164-169. (in Chinese)
- [12] 陈吕吉, 李萍, 孙琪艳. 20×长波红外连续变焦光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2012, 34(8):458-462.
CHEN L J, LI P, SUN Q Y. Design of LWIR Zoom Optical System with 20:1 Zoom range [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(8):458-462. (in Chinese)
- [13] 乔明霞, 曾威. 长波红外双视场扫描型光学系统 [J]. *电光与控制*, 2013, 20(3):77-80.
QIAO M X, ZENG W. A Long-Wave infrared dual-FOV scanning optical system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(3):77-80. (in Chinese)
- [14] 骆守俊, 黄富元, 詹道教, 等. 硫系玻璃在红外成像系统应用进展 [J]. *激光与红外*, 2010, 40(1):9-13.
LUO SH J, HUANG F Y, ZHAN D J, *et al.*. Development of chalcogenide glasses for infrared thermal imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1):9-13. (in Chinese)

- [15] 王涌天,崔桂华. 红外扫描成像系统中冷像的分析与控制[J]. 光学学报,1994,14(6):650-655.
WANG Y T, CUI G H. Analysis and control of Narcissus effect in scanning infrared system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994,14(6):650-655. (in Chinese)

作者简介:



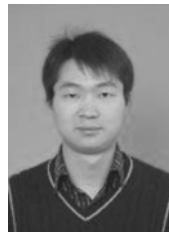
骆守俊(1978—),男,江苏句容人,高级工程师,2005年于清华大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计检测及装调方面的研究工作。E-mail: luoshoujun@139.com



杨宁宁(1985—),男,山东德州人,工程师,2011年于中国电子科技集团公司电子科学研究院获得硕士学位,主要从事计算机技术与信号处理方面的研究。Email: yangn508@163.com



夏寅辉(1977—),男,湖北麻城人,博士研究生,高级工程师,主要从事红外热成像技术及光电侦察总体技术方面的研究。E-mail: xyh_simon@126.com



于繁迪(1982—),男,湖南永州人,工程师,2008年于中国电子科技集团公司电子科学研究院获得硕士学位,主要从事红外热成像技术方面的研究。E-mail: hnderby@sina.com