

大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计

王海洋, 李力, 金宁, 付艳鹏, 李训牛

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要: 针对中波制冷型 640×512 凝视焦平面探测器, 设计了一个大变倍比中波红外连续变焦光学系统。该系统采用三次成像技术, 其工作波段为 3.7-4.8 μm, F 数为 4, 变倍比为 30:1, 可实现 23-701 mm 连续变焦, 变焦轨迹平滑, 满足 100% 冷光阑效率。该系统采用硅、锗和硒化锌三种红外材料, 通过引入非球面和衍射面来校正系统的轴外像差和高级像差。系统在 30 lp/mm 处, 全焦距范围内调制传递函数(MTF)均在 0.15 以上, 接近衍射极限。设计结果表明, 大变倍比中波红外连续变焦光学系统具有变倍比大、分辨率高、结构紧凑、像质好等优点。

关键词: 三次成像; 连续变焦系统; 红外光学设计

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0398-05

Design of MWIR continuous zoom optical system with large zoom range

Wang Haiyang, Li Li, Jin Ning, Fu Yanpeng, Li Xunniu

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: For medium wave cool 640×512 detector with staring focal plane array, a MWIR continuous zoom optical system with large zoom range was designed. The optical system imaged thrice. The operating wavelength range was 3.7-4.8 μm, F number was 4 and the zoom ratio was 30:1. The optical system could realize 23-701 mm continuous zoom and meet 100% cold shield efficiency with smooth zoom locus. Three infrared materials of Si, Ge and ZnSe were used in the optical system. The system could correct the off axis aberration and higher order aberration by leading the aspheric surface and the diffractive surface. The MTF was above 0.15 within the whole focal range at the spatial frequency of 30 lp/mm and it approached the diffraction limit. The results show that the MWIR continuous zoom optical system has large zoom ratio, high resolution, small volume and excellent image quality.

Key words: image thrice; continuous zoom system; infrared optical design

收稿日期: 2012-06-12; 修订日期: 2010-07-15

基金项目: 兵器预研项目

作者简介: 王海洋(1983-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事红外光学系统设计方面的研究。Email: jlyjwhy@126.com

0 引言

红外光学系统具有环境适应性好、抗干扰能力强以及准确识别伪装目标等特点,在军事上被广泛应用于侦察、制导等领域^[1-2]。近年来,随着红外技术的快速发展,对红外连续变焦光学系统的需求日益增强。因为连续变焦光学系统能够在一定的焦距范围内变化,像面位置保持不变,并且像质始终良好,从而可以在大视场巡航和搜索,其又能在发现目标时,调到小视场瞄准跟踪。目前,关于大变倍比中波红外系统的报道较少,并且都有一些不足之处。中国航空工业第一集团公司洛阳电光设备研究所设计的焦距为 14~280 mm 中波红外系统,倍率仅有 20 倍,且焦距较短。Mark C. Sanson 等人设计的 15.25~456 mm 的中波红外系统,探测器像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$, 焦距相对较短,像元尺寸较大,且该系统使用了一个衍射面和一个非球面,因此,增加了加工成本和装调难度^[3-5]。

针对中波制冷型 640×512 凝视焦平面探测器(探测器像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$),文中设计了一个 30:1 连续变焦光学系统。该系统采用三次成像技术,通过反射镜对光路进行 U 型折叠,共包括 10 片透镜和两个反射镜,共引用一个衍射面和一个非球面以达到良好的像质。该系统具有焦距范围大、结构紧凑、分辨率高和像质良好等优点。

1 设计参数

文中采用的探测器为中波制冷型 640×512 凝视焦平面探测器,探测器像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$,光学系统设计参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

Tab.1 Design parameters

| Item | Value |
|---------------------------------|--|
| Wavelength range/ μm | 3.7-4.8 |
| Zoom ratio | 30:1 |
| F number | 4 |
| Field of view(FOV) | $0.786^\circ\times 0.59^\circ$ (NFOV) $24.06^\circ\times 18.158^\circ$ (WFOV) |
| Focal length/mm | 23-701 |
| Transmission | >80% |

2 结果与分析

2.1 设计结果

文中的光学系统由变焦系统和成像系统组成,采

用反射镜对光路进行 U 型折叠,共用了 10 块透镜和两个反射镜。系统使用了 4 个非球面和一个衍射面,采用了硅、锗和硒化锌 3 种红外材料。系统通过反射镜对光路进行折叠,从而缩短了其横向尺寸,系统整体外形尺寸为 $345\ \text{mm}\times 176\ \text{mm}\times 224\ \text{mm}$ (长 \times 宽 \times 高),满足系统实际的装调空间。图 1 中(a)、(b)、(c)分别为长焦(701 mm)、中焦(350 mm)和短焦(23 mm)的光学系统示意图。

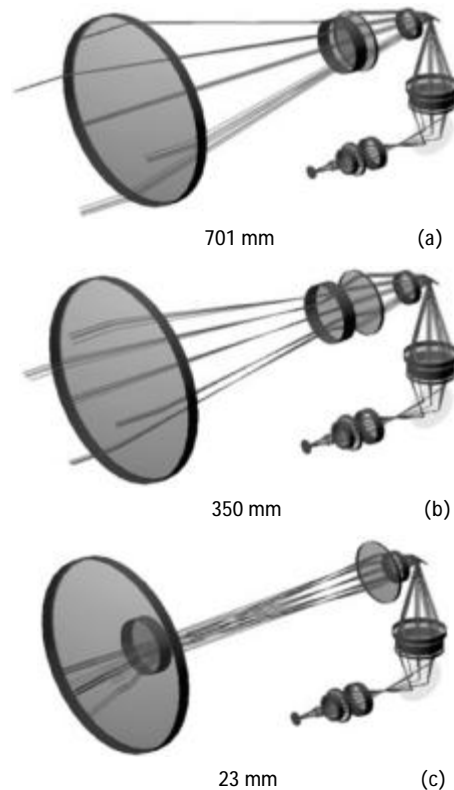


图 1 光学系统示意图

Fig.1 Schematic of optical system

变焦系统采用机械补偿形式,由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成,其对系统光焦度的贡献分别为正、负、正、负。前固定组采用低色散高折射率且光焦度为正的硅透镜;变倍组采用负的非球面透镜,初级像差和高级像差得到很好的配合,使系统达到尽可能好的成像质量,实现其像差平衡;补偿组采用正的硅透镜,它补偿变倍组在变倍过程中产生的像面位移,同时还可以实现调焦及补偿温度造成的像面位移;后固定组采用负的硒化锌透镜^[6]。文中采用了三次成像技术,目的是压缩前组物镜尺寸同时保证系统满足 100%冷光阑效率。

图 2 为光学系统的变焦运动轨迹,图中横坐标为系统的焦距,纵坐标为运动组元相对于前固定组

的距离。由图 2 可见,变倍组和补偿组的行程分别为 180 mm 和 37 mm,且变焦轨迹平滑。

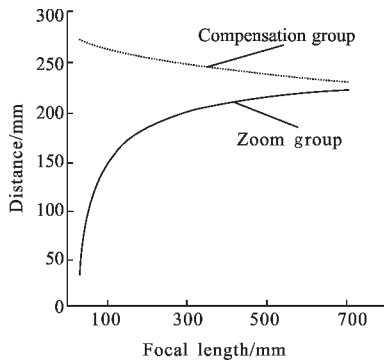


图 2 变焦运动轨迹

Fig.2 Zoom orbit of system

2.2 像质评价

2.2.1 传递函数

传递函数是评价光学系统好坏的一种重要手段。该系统的传递函数曲线如图 3 所示。从图中可以看

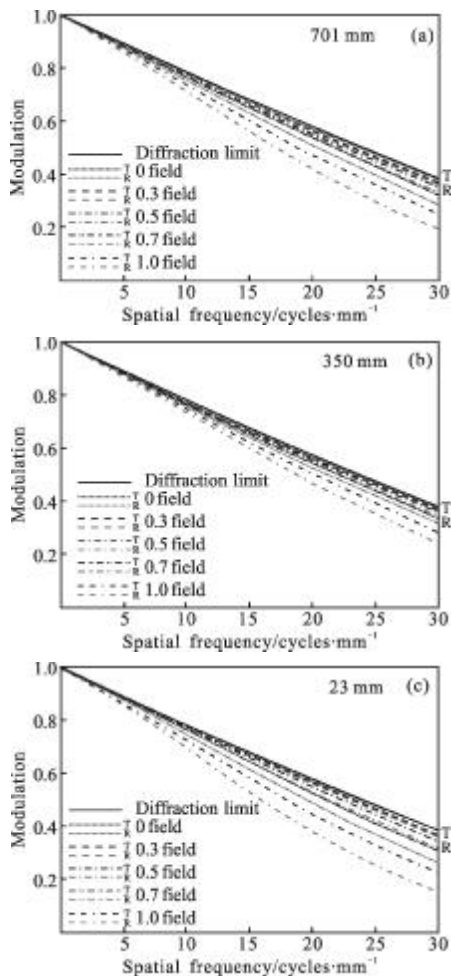


图 3 系统的传递函数曲线

Fig.3 MTF curves of system

出,系统在焦距变化范围内传递函数接近衍射极限,取得了较好的成像质量。

2.2.2 点列图

该系统的点列图如图 4 所示,具体数值如表 2 所示。由此可见,系统所有焦距位置在全视场内弥散斑的均方根(RMS)都 $<15 \mu\text{m}$,满足系统要求。

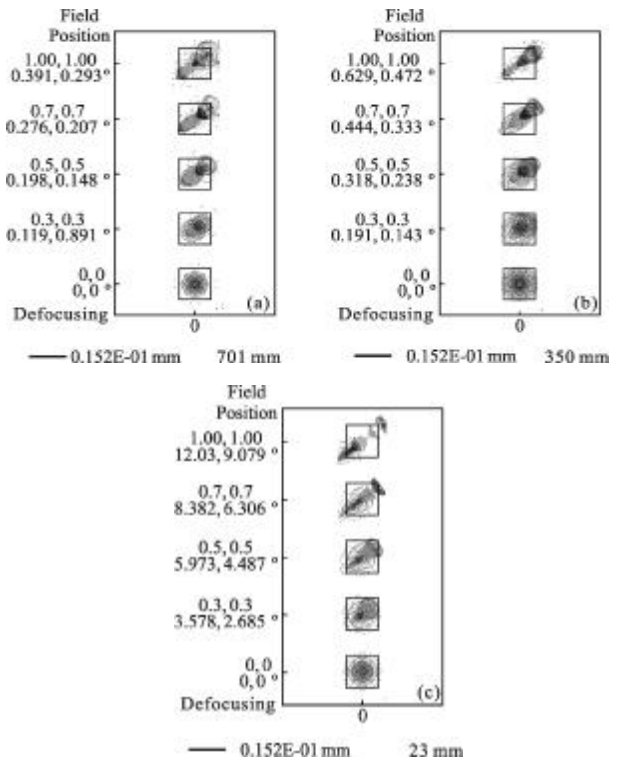


图 4 系统的点列图

Fig.4 Spot diagrams of system

表 2 弥散斑直径的均方根值

Tab.2 RMS of spot diameters

| Focal length | FOV | RMS of spot diameter/mm |
|------------------------|-----|-------------------------|
| Long EFL (701 mm) | 0 | 0.728 43E-02 |
| | 0.3 | 0.808 49E-02 |
| | 0.5 | 0.942 15E-02 |
| | 0.7 | 0.107 35E-01 |
| | 1 | 0.136 90E-01 |
| Middle EFL (350 mm) | 0 | 0.111 38E-01 |
| | 0.3 | 0.110 62E-01 |
| | 0.5 | 0.108 63E-01 |
| | 0.7 | 0.116 88E-01 |
| | 1 | 0.124 07E-01 |
| Short EFL (23 mm) | 0 | 0.398 86E-02 |
| | 0.3 | 0.535 77E-02 |
| | 0.5 | 0.737 25E-02 |
| | 0.7 | 0.986 72E-02 |
| | 1 | 0.143 85E-01 |

2.2.3 能量分布图

图 5 为变焦系统在长焦(701 mm)、中焦(350 mm)和短焦(23 mm)时的衍射能量分布曲线。该曲线图表明系统在探测器敏感元尺寸 15 μm 内时,能量集中度在 80%以上,满足系统要求。

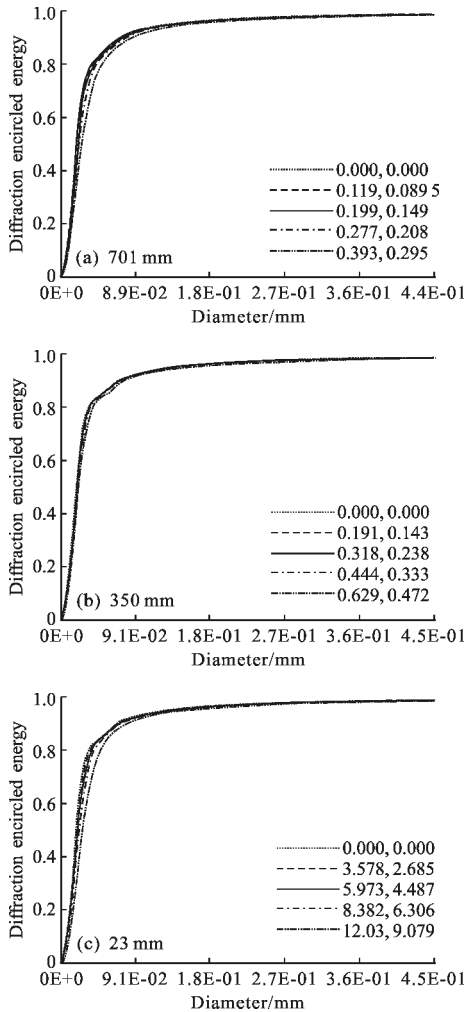


图 5 能量分布

Fig.5 Distribution of encircled energy

2.2.4 冷反射分析

在制冷式红外热成像系统中,冷反射现象是衡量红外系统设计好坏的一个重要指标。冷反射现象是探测器除了接收到正常成像的景物辐射外,还通过红外光学系统中折射面的微弱发射,接收到本身及周围低温腔冷环境的影响,形成冷像,冷像的辐射强度随视场大小变化,成为不可滤掉的交流噪声信号叠加在景物信号上,在热图像的视场中心形成黑斑^[7-8]。所以,在光学设计中要充分考虑冷反射现象,并使之减到最小。考察冷反射的两个重要参数是

YNI 和 I/IBAR,其中 Y 是边缘光线在该面的投射高, N 是折射率, I 是边缘光线的入射角度, IBAR 是主光线的入射角度。在 YNI 很小且 I/IBAR<1 时,该面可能会成为产生冷反射的问题面。系统短焦部分的冷反射最为强烈,因此,这里主要分析短焦部分的情况。表 3 为系统短焦部分的冷反射分析。根据表 3 所示,该系统不会产生严重的冷反射,满足系统要求。

表 3 冷反射分析

Tab.3 Analysis of cold reflection

| Reflecting surface | Clipping aperture | YNI | I/IBAR |
|--------------------|-------------------|-----------|---------|
| 1 | 25(R) | 25.796 3 | 57.239 |
| 2 | 25(R) | -9.768 3 | -21.809 |
| 3 | 25(R) | -9.935 6 | ∞ |
| 4 | 25(R) | 8.985 0 | 10.428 |
| 5 | 25(R) | 10.506 4 | 10.787 |
| 6 | 25(R) | -10.023 8 | 167.819 |
| 7 | 25(R) | 4.971 5 | 5.058 |
| 8 | 25(R) | 3.198 3 | 3.896 |
| 9 | 25(R) | 7.685 4 | -17.214 |
| 10 | 25(R) | -10.185 5 | -6.388 |
| 11 | 25(R) | -8.014 3 | -6.034 |
| 12 | 25(R) | 9.330 7 | -17.009 |
| 13 | 25(R) | 8.401 8 | -20.624 |
| 14 | 25(R) | -5.406 6 | -5.467 |
| 15 | 23(F) | 0.002 9 | 0.006 |
| 16 | 23(R) | -1.373 4 | -1.057 |
| 17 | 24(R) | 2.626 8 | -2.268 |
| 18 | 23(R) | -0.866 8 | -0.894 |
| 19 | 23(R) | -0.995 9 | -0.982 |
| 20 | 23(F) | 0.225 6 | 0.681 |
| 21 | 23(R) | -0.360 7 | -0.702 |
| 22 | 23(R) | -0.356 8 | -0.702 |

3 结 论

针对中波制冷型 640×512 凝视焦平面探测器,文中设计了变倍比为 30:1 的连续变焦光学系统。该系统由变焦系统和成像系统构成,满足 100%的冷光阑效率,可以实现 23~701 mm 范围内的连续变焦。而且该光学系统具有变倍比大、结构简单、分辨率高和变焦曲线平滑等特点,可以广泛用于机载和车载的光电探测与跟踪系统中。

参考文献:

- [1] Zhang Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 36(1): 32-34. (in Chinese)
张良. 中波红外变焦距系统的光学设计[J]. 应用光学, 2006, 36(1): 32-34.
- [2] Sinclair R L. High magnification zoom lenses for 3-5 μm applications[C]//SPIE, 1998, 3429: 11-18.
- [3] Xu Zhaodong, Liu Xin, Dong Tao. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 619-621. (in Chinese)
许照东, 刘欣, 董涛. 机载高分辨率连续变焦红外热像仪设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 619-621.
- [4] Sansona Mark C, James Cornell, Brian Roy, et al. Development of MWIR continuous zoom with large zoom range [C]//SPIE, 8012, 80122F: 1-7.
- [5] Gao Hongyun, Xiong Tao, Yang Changcheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. Planetary and Space Science, 2007, 15(7): 1038-1043.
- [6] Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 148-168. (in Chinese)
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 148-168.
- [7] Scherr L M, Orlando H J, Hall J T, et al. Narcissus considerations in optical designs for infrared staring arrays [C]//SPIE, 1996, 2864: 442-452.
- [8] Akram M N. Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal-plane arrays[C]//SPIE, 2002, 4767: 13-23.

下期预览

磺苄西林、舒他西林、美洛西林、替卡西林的太赫兹指纹谱研究

朱思原, 张曼, 沈京玲

(首都师范大学物理系 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室,
太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 以一类常用的抗生素——青霉素类抗生素作为研究对象, 选取四种具有代表性的药品磺苄西林、舒他西林、美洛西林、替卡西林, 基于太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术, 进行实验研究。通过光谱实验及理论分析, 获取药品的太赫兹时域光谱, 结合傅里叶变换, 获得频域光谱及太赫兹吸收系数曲线。结果表明, 四种药品在 0.40~1.60 THz 波段存在明显不同的吸收特征。因此, 太赫兹光谱技术十分适合检测抗生素这种化学结构有微小不同的药品, 并且可以清晰通过吸收峰的位置分辨出抗生素药类的种类。为国家食品药品监督管理局提供一种新的可靠的检测技术, 且可以以数据库的形式为药品的鉴定提供标准。