

谐衍射红外双波段双视场光学系统设计

李 岩^{1,2} 张 葆¹ 洪永丰¹ 赵春蕾^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于谐衍射透镜成像理论和变焦系统原理, 采用轴向移动式变换视场, 同时引入谐衍射透镜, 实现了红外谐衍射双波段双视场光学系统的设计。对设计结果进行了像质评价。设计与分析结果表明, 该系统使用 5 片透镜在双波段实现了 40~80 mm 两档变焦, 满足 100% 冷光阑效率。在 3.7~4.3 μm 中波红外波段, 系统奈奎斯特频率处调制传递函数(MTF)值大于 0.5; 在 8.7~11 μm 长波红外波段, 系统奈奎斯特频率处 MTF 值大于 0.3。该成像系统具有双波段、高分辨率、体积小、结构简单等特点。

关键词 光学设计; 红外系统; 双波段; 谐衍射

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1122001

Optical Design of Harmonic Diffractive Infrared Dual-Band and Dual-Field System

Li Yan^{1,2} Zhang Bao¹ Hong Yongfeng¹ Zhao Chunlei^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

² University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract On the basis of harmonic diffractive element theory and zoom theory, a dual-band and dual-field infrared optical system employing harmonic diffractive element is designed. The optical configuration is based on the axial motion of a lens group along the optical axis for changing field of view. The image quality evaluation are listed. Evaluation results show that the system has five lens and realizes a zoom of 40~80 mm in dual-band, which satisfying 100% cold shield efficiency. The modulation transform function value is over 0.5 at the Nyquist frequency for the waveband of 3.7~4.3 μm and over 0.3 at the Nyquist frequency for the waveband of 8.7~11 μm . The system is characterized by dual-band, high resolution, miniaturization and simple structure.

Key words optical design; infrared system; dual-band; harmonic diffractive

OCIS codes 220.3620; 220.4830; 260.1960; 260.3060; 050.1380

1 引 言

红外单波段成像系统获取信息单一, 对于复杂目标识别不够准确。而红外双波成像系统可同时对两个波段成像, 通过分析两个波段成像特性来识别目标, 能够有效地提高系统探测精度。红外双波段成像系统常采用分光路或部分共光路两种结构, 虽然这两种结构均能获得很好的像质, 但其体积和质量较大且结构复杂。Sweeney 等^[1-2] 在 1995 年提

出了谐衍射透镜(HDE)理论: 不同波长的光通过谐衍射透镜能够汇聚于同一点(即可以获得相同的光焦度)。因此谐衍射透镜可以有效地降低系统色差, 从而提升系统像质。通过引入 HDE, 使双波段成像系统在采用共光路结构的同时获得良好的像质成为可能。而目前, 关于此类系统的设计较少, 且大多数存在一定的不足。文献[3-5]双波段共光路成像系统虽在中波和长波两波段成像质量接近衍射极限,

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-05-07

基金项目: 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室基金(2012MS02)

作者简介: 李 岩(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: liyan19880217@163.com

导师简介: 张 葆(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事航空光电成像技术方面的研究。

E-mail: cleresky@vip.sina.com(通信联系人)

但系统为定焦,使用范围受到限制;文献[6]双波段共光路成像系统虽实现了40~80 mm两档变焦,但需要同时移动变倍组和补偿组,机械结构复杂、体积大;文献[7]双波段共光路成像系统虽仅移动变倍组就实现了两档变焦,但其使用非制冷探测器,系统灵敏度低。

本文基于320 pixel×240 pixel制冷型探测器,应用谐衍射透镜(HDE),设计了一套红外双波段双视场成像系统。该系统使用5片透镜,在共光路的条件下可同时中对中波红外(3.7~4.3 μm)和长波红外(8.7~11 μm)两个波段成像,通过轴向移动变倍组可实现40~80 mm两档变焦,系统全长74.28 mm。该成像系统具有双波段、高分辨率、100%冷光阑效率、体积小、结构简单等特点。

2 光学系统设计

目前两档变焦光学系统的视场变换的实现方式主要有切入式和轴向移动式。相较于前者,后者具有质量轻、移动元件少,且无需另设调焦机构的优点^[8-9],利于实现系统的小型化和简单化。此外,还引入了谐衍射透镜,利用其能有效改善了红外双波段光学系统像质的特性。实验结果表明,使本系统在获得良好像质的情况下又实现了结构的简单化。

2.1 系统变焦原理

轴向移动式两档变焦原理和光学补偿变焦原理类似,即利用变倍组的轴向移动实现物像交换,以保证系统共轭距不变,从而实现像面稳定,且此类变倍方式不需要补偿组。对于轴向移动式变倍,可以不需要后固定组,但为更好地校正像差,系统中引入后固定组,其工作原理如图1所示。图中1、2和3分别代表前固定组、变倍组和后固定组。其中前固定组为正透镜,变倍组为负透镜,后固定组为正透镜。通过轴向移动变倍组,可实现系统焦距的变换,且变焦时像面位置保持不变。当变倍组处于图中虚线位置时,光

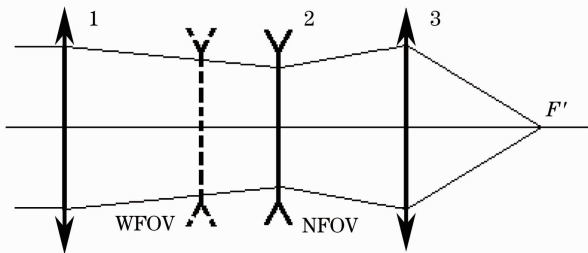


图1 透镜组结构图
Fig. 1 Structure of lens

学系统为宽视场(WFOV)状态,当变倍组处于图中实线位置时,光学系统为窄视场(NFOV)状态。

2.2 谐衍射透镜成像理论

HDE与普通衍射透镜(DOE)的主要区别在于透镜的中心厚度,HDE的中心厚度是相应模 2π 透镜的 p 倍(p 为正整数),即为 $p\lambda_0/(n-1)$,其中 λ_0 为谐波波长,其结构如图2所示^[10]。若HDE对波长为 λ 的光波 m 级次成像,则焦距

$$f_{m,\lambda}(\lambda) = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0. \quad (1)$$

由(1)式可知,当 $m\lambda = p\lambda_0$ 时, $f = f_0$,即不同波长 λ 的光波通过HDE后获得相同的焦距 f_0 。HDE的 m 级衍射效率为

$$\eta = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] p - m \right\}. \quad (2)$$

由(2)式可知, p 值越大,衍射效率覆盖的带宽越窄。因此,在设计HDE时, p 的取值在需允许范围内越小越好。根据这个原则,并结合设计要求及实验分析结果,将 p 值设定为2,中心波长 λ_0 设定为10 μm,对应的谐振波长分别为4、5、6、7、10 μm(分别对应衍射级次 $m=5、4、3、2$)。以上4个谐振波长处的衍射效率如图3所示。为使衍射效率大于

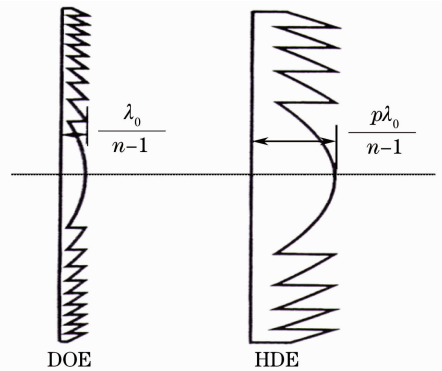


图2 谐衍射透镜和普通衍射透镜对比
Fig. 2 Comparison of HDE and DOE

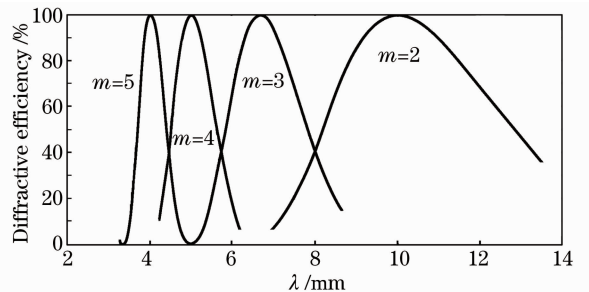


图3 $p=2$ 时HDE不同级次的衍射效率
Fig. 3 Diffraction efficiency for different orders of HDE when $p=2$

80%，取谐波波长 λ_0 为4、10 μm （分别对应衍射级次5和级次2），取3.7~4.3 μm 和8.7~11 μm 为工作波段。

3 设计结果及像质分析

3.1 设计指标

文中双波段双视场红外成像系统分别对中波、长波成像，艾里斑的物理直径分别为24.4、61 μm ，其余系统参数均一样。由于同一个探测器的分辨率不能恰好同时匹配中波、长波成像系统的分辨率，故综合考虑二者分辨率，选取320 pixel \times 240 pixel的制冷型双色探测器，该探测器的像元尺寸为25 $\mu\text{m}\times$ 25 μm 。系统的设计指标如表1所示。

表1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

| Parameter | Value |
|---------------------------------|---|
| Wavelength band / μm | 3.7~4.3, 8.7~11 |
| Zoom ratio | 2 \times |
| Focal length /mm | 40~80 |
| F number | 2.5 |
| Angular field /($^\circ$) | 4.28 \times 5.71 (NFOV) 8.53 \times 11.31 (WFOV) |
| Cold shield efficiency /% | 100 |
| Aperture /mm | 49 |
| Total length /mm | 75.106 |

3.2 设计结果

结合上述HDE成像理论及系统设计要求和根据变焦系统理论，通过计算可得光学系统的初始结构参数。

由于文中系统同时对中波、长波两波段成像，所以采用锗、硫化锌两种材料。系统中引入谐衍射面和非球面以校正像差，利用Zemax软件进行优化，最终使系统满足像差要求。图4为系统结构图。由图4可知，光学系统由5片透镜组成：第1片为前固定组，第2、3片为变倍组，第4、5片为后固定组。其中第7面引入谐衍射面，对系统色差、球差等进行校正。孔径光阑位于第5片透镜后0.550 mm、像面前20 mm处，以实现100%冷光阑效率。系统通过移动变倍组来切换视场，变倍组的变焦行程仅为11.327 mm。系统总长为75.106 mm。

3.3 像质评价

3.3.1 几何传递函数

该光学系统的调制传递函数(MTF)曲线如图5所示。由图5可知：在中波3.7~4.3 μm 波段，宽、窄视场在奈奎斯特频率处的MTF值均高于0.5；在长波8.7~11 μm 波段，宽、窄视场在奈奎斯特频率处的MTF值均高于0.3，系统成像质量良好。

3.3.2 点列图

该光学系统点列图如图6所示。由图6可知：在中波3.7~4.3 μm 波段，两个视场的最大点列斑均方跟分别为18.079、18.102 μm ，均小于探测器的一个像元尺寸；在长波8.7~11 μm 波段，两个视场的最大点列斑均方跟分别为14.169、15.128 μm ，均小于探测器的一个像元尺寸，满足红外制冷型探测器的基本要求。

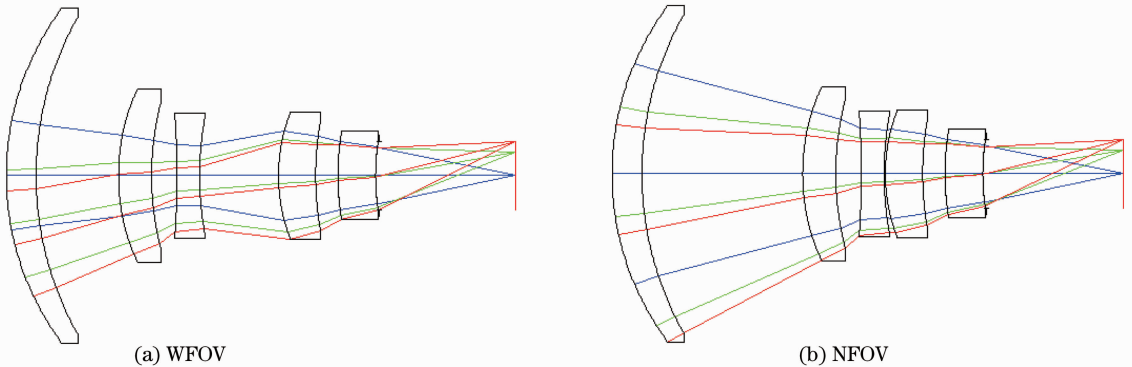


图4 光学系统的结构图

Fig. 4 Schematic of optical system structure

4 结论

基于谐衍射透镜成像理论和变焦系统原理，在共光路的条件下实现了红外谐衍射双视场双波段光学系统的设计。利用谐衍射透镜能有效改善双波段

成像系统像质的特性，通过选取合适的参数 p 和设计波长 λ_0 ，使整个系统在两个波段范围内均获得良好的像质。与传统的双波段成像光学系统相比，该成像系统具有高分辨率、结构简单和体积小等特点。

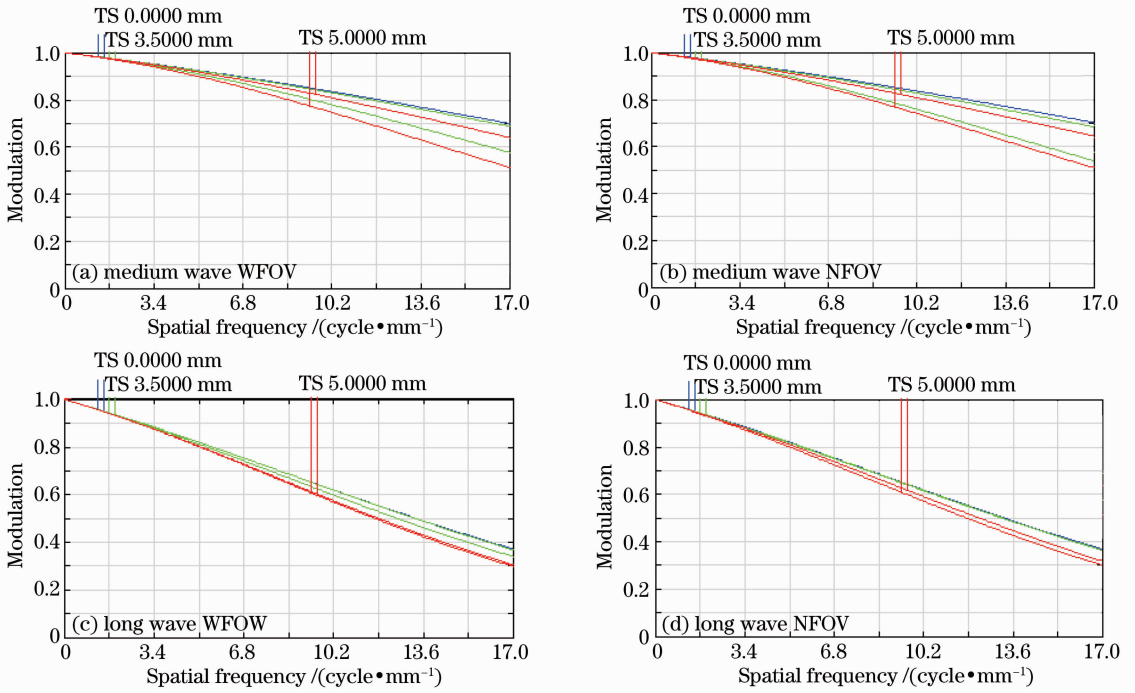


图 5 光学系统的调制传递函数曲线
 Fig. 5 MTF curves of optical system

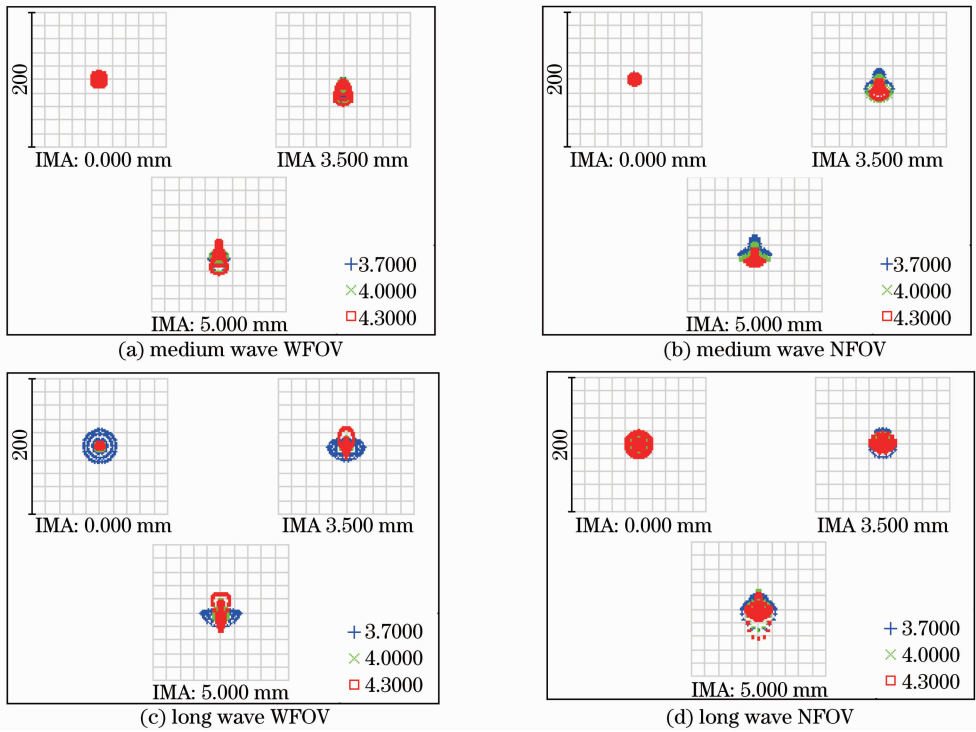


图 6 光学系统的点列图
 Fig. 6 Spot diagram of optical system

参 考 文 献

1 D W Sweeney, G E Sommargren. Harmonic diffractive lenses [J]. Appl Opt, 1995, 34(14): 2469—2473.

2 Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Liu Hongbo, *et al.*. Optical system of harmonic diffractive/refractive for infrared dual-color detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(3): 318—312.

- 孙 强, 王肇圻, 刘宏波, 等. 应用于双色探测器的谐衍射/折射光学系统[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 318—312.
- 3 Zhang Xingde, Li Ronggang, Liu Lin, *et al.*. Research and development of dual-band infrared camera system[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(8): 801—804.
- 张兴德, 李荣刚, 刘 琳, 等. 红外双波段成像系统的研究与发展[J]. 激光与红外, 2010, 40(8): 801—804.
- 4 Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao, *et al.*. The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1266—1270.
- 范长江, 王肇圻, 吴环宝, 等. 红外双波段双层谐衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1266—1270.
- 5 Sun Qiang, Lu Zhenwu, Wang Zhaoqi. The dual band design of harmonic diffractive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 830—833.
- 孙 强, 卢振武, 王肇圻. 谐衍射/折射双波段系统设计[J]. 光学学报, 2004, 24(6): 830—833.
- 6 Dong Keyan, Pan Yulong, Wang Xuejin, *et al.*. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(5): 764—770.
- 董科研, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射红外双波段双焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 764—770.
- 7 Wu Haiqing, Wang Haixia, Zhao Xinliang, *et al.*. Design of dual-band/dual-field IR optical system [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(11): 640—644.
- 吴海清, 王海霞, 赵新亮, 等. 双波段/双视场红外光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(11): 640—644.
- 8 Meng Jianqi. Dual field zoom (6×) infrared imaging optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 89—92.
- 孟剑奇. 双视场6倍变焦红外热成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 89—92.
- 9 Bai Yu, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, *et al.*. Design of long-wave infrared switch-zoom optical system with five zoom ratio [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(8): 439—441.
- 白 瑜, 杨建峰, 马小龙, 等. 长波红外两档5倍变焦光学系统设计[J]. 红外技术, 2008, 30(8): 439—441.
- 10 Liu Huanyu, Zhang Liang, Liu Yu, *et al.*. Optical design of a dual-band infrared system based on harmonic diffraction [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(5): 50—53.
- 刘环宇, 张 良, 刘 玉, 等. 红外双波段谐衍射光学系统设计[J]. 电光与控制, 2011, 18(5): 50—53.

栏目编辑：张 腾