

doi: 10.3788/gzxb20144304.0422008

一种实现双光谱宽温探测的红外物镜设计

沈满德, 李程, 任欢欢, 姜清秀

(武汉纺织大学 电子与电气工程学院, 武汉 430073)

摘 要:利用折射/谐衍射结构设计了超宽温范围内的被动式消热差红外物镜系统. 该系统由三片镜子组成, 使用锗和碲化锌两种材料, 引入一个非球面和一个谐衍射面, 实现了消热差、消色差和结构简单轻量化. 实验结果表明: 在焦距为 54.68 mm, $-120\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 系统可以在 $3.8\sim 4.2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8.8\sim 11.2\text{ }\mu\text{m}$ 光谱范围同时工作, 且光谱范围的调制传递函数分别优于 0.42 和 0.35, 成像质量良好, 适用于像元尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、像元数 320×240 的红外双色探测器.

关键词:光学设计; 红外光学系统; 减热差; 混合; 双色

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0422008-4

Athermalization Design of Wide Temperature Range for Dual-band Infrared Lens

SHEN Man-de, LI Cheng, REN Huan-huan, JIANG Qing-xiu

(Wuhan Textile University, School of Electronic and Electrical Engineering, Wuhan 430073, China)

Abstract: A hybrid refractive/harmonic diffractive infrared lens beyond normal temperature was designed. The infrared lens was consisted of three lenses, including one aspheric surfaces and a harmonic diffraction surface which made the lens have compact structure and light weight. The experimental results show that the modulation transfer function is above 0.42 and 0.35 in the temperature range of $-120\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ when the working wavelength in $3.8\sim 4.2\text{ }\mu\text{m}$ and $8.8\sim 11.2\text{ }\mu\text{m}$, and the efficient focal length is 54.68 mm. It is compatible with infrared dual-color detector which had a format of 320×240 and the pixel pitch of $30\text{ }\mu\text{m}$.

Key words: Optical design; Infrared optical system; Athermalization; Hybrid; Dual-color

OCIS Codes: 110.3080; 080.2740; 220.3620; 220.1000

0 引言

利用中/长波红外双光谱代替单波段探测系统探测目标, 可提高系统在复杂环境下的目标识别与抗干扰能力^[1-2], 红外材料的折射率温度变化系数非常大, 温度发生变化时光学元件的曲率、厚度和间隔及结构件材料的热胀冷缩, 将引起系统焦距变化、像面离焦和成像质量恶化等, 导致系统性能的急剧下降, 因此很多学者开展了衍射元件在外单波段系统中的应用^[3-5]. Sweeney、Sommargren 提出了谐衍射透镜的概念, 谐衍射透镜可以在一系列分离波长处获得相同光焦度. Michael Lidwell^[6]分析了普通双波段光学系统在材料

选择上的困难, 并讨论了谐衍射透镜的特点以及在红外双波段光学系统像差校正中的优势. 美国专利^[7]中报道发明了一种双波段反射式红外热成像系统, 该系统包括一个反射式红外热成像器和一台反射式可见光摄像机, 两者共轴, 可以同步同轴地获取图像, 其中反射式红外热成像器内通过反射光学模块聚焦在红外成像传感器上成像. 陈津津等^[8]报道了一种用于搜索跟踪的红外物镜但未考虑温度对光学性能的影响. 薛慧等^[9]报道的用于搜索跟踪的红外物镜可以在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度内正常工作.

本文基于谐衍射光学元件的特殊性能, 在系统中引入谐衍射光学元件构成折射/谐衍射混合结构, 实现

基金项目: 湖北省教育厅中青年项目 (No. Q20101605) 资助

第一作者: 沈满德 (1973-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学工程系统. Email: opticaldesign@126.com

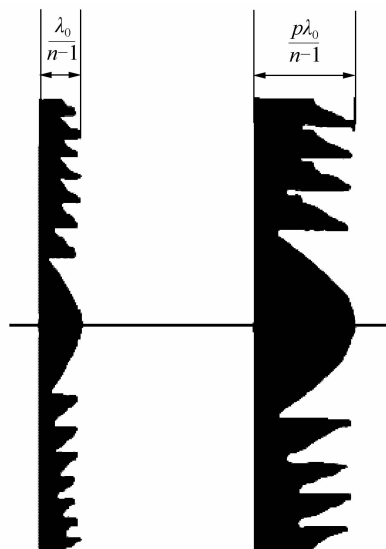
收稿日期: 2013-08-19; 录用日期: 2013-11-26

<http://www.photon.ac.cn>

了红外物镜在双光谱范围内超宽温度范围成像. 基于以上理论, 设计了一个可工作于红外双光谱谱段的超宽温红外物镜, 设计结果表明, 在 $-120 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内, 空间频率 16 lp/mm 处, $3.8 \sim 4.2 \text{ } \mu\text{m}$ 和 $8.8 \sim 11.2 \text{ } \mu\text{m}$ 光谱范围的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 分别优于 0.42 和 0.35 , 成像质量良好, 该系统具有结构简单、体积小、重量轻、双光谱探测、超宽温下稳定工作等优点.

1 谐衍射光学成像理论

谐衍射元件透镜如图 1, 对于谐衍射元件, 环带光



(a) Diffractive lens (b) Harmonic diffractive lens

图 1 谐衍射元件透镜示意

Fig. 1 Layout of harmonic diffractive lens

程差为 $p\lambda_0$, 其中 λ_0 为设计波长, p 为正整数, 总相位深度 h 为

$$h = p\lambda_0 / (n - n_0) \quad (1)$$

n, n_0 为介质和环境的折射率. 一般情况下, 系统工作在空气中, $n_0 = 1$, 则

$$h = p\lambda_0 / (n - 1) \quad (2)$$

当采用薄透镜模型时, 衍射光学元件的第 k 个环带半径为

$$r_m = \sqrt{(f_0 + kp\lambda_0)^2 - f_0^2} \quad (3)$$

式中 r_m 为第 k 个环带的径向距离, f_0 为 λ_0 对应的焦距.

谐衍射元件的焦距为

$$f = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0 \quad (4)$$

式中, m 是波长 λ 对应的谐振级次, 当 $m\lambda = p\lambda_0$ 时, 即不同波长其 m 级谐振光波均会聚到共同的焦点 f_0 处.

谐衍射元件的衍射效率可表示为^[10]

$$\eta = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda - 1)}{n(\lambda_0 - 1)} \right] p - m \right\} \quad (5)$$

可以看出, 当

$$\lambda = \frac{p\lambda_0}{m} \quad (6)$$

衍射效率可达到 100% . 温度变化主要引起谐衍射透镜结构上 r_m 和 h 及折射率 n 和 n_0 的变化, 谐衍射元件光热膨胀系数为

$$x_{f,h} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \alpha_g - \frac{1}{(n - n_0)n_0} \left(n_0 \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (7)$$

折射元件的光热膨胀系数为

$$x_{f,r} = \alpha_g - \frac{1}{(n - n_0)n_0} \left(n_0 \frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (8)$$

普通衍射元件的光热膨胀系数为

$$x_{f,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \quad (9)$$

可以看出式 (7) 和式 (8)、(9) 形式相同, 即谐衍射元件的光热膨胀系数介于折射元件和衍射元件的光热膨胀系数之间. 当 p 值较小时 $h(n - n_0)$ 变化可以忽略不计, 其光热膨胀系数和普通衍射元件的光热膨胀系数相近; 反之, 其光热膨胀系数逐渐和普通折射透镜的光热膨胀系数相近.

2 系统设计和性能分析

基于以上分析, 采用折射/谐衍射混合结构设计了一个双光谱探测的红外物镜. 红外物镜的结构参量为: 光谱范围为 $3.8 \sim 4.2 \text{ } \mu\text{m}$ 和 $8.8 \sim 11.2 \text{ } \mu\text{m}$, 有效焦距为 54.68 mm , F 数为 2.0 , 系统总长为 77.56 mm , 后工作距为 20 mm , 环境温度范围为 $-120 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$, 系统适用于像元尺寸为 $30 \text{ } \mu\text{m}$, 像元数为 320×240 的红外双色探测器, 为了减小结构件对整机系统的热效应, 镜筒采用线膨胀系数较小的钢合金. 应用 Zemax 光学软件利用自带的像差评价函数进行优化设计最终得到的光学结构如图 2, 系统为三片式结构, 选定锗和硒化锌两种红外材料, 其中第四面为谐衍射面, 图 3 给出了谐衍射光学面的特性参量曲线, 谐衍射光学元件最大的环带数 k_{max} 表达式为: $k_{\text{max}} = \text{Int}(A_1 r_0^2 + A_2 r_0^4 + \dots) / 2\pi$, 式中 r_0 为谐衍射光学面的归一化半径, 即谐衍射光学面的半径和设计过程中归一化半径 R 的比

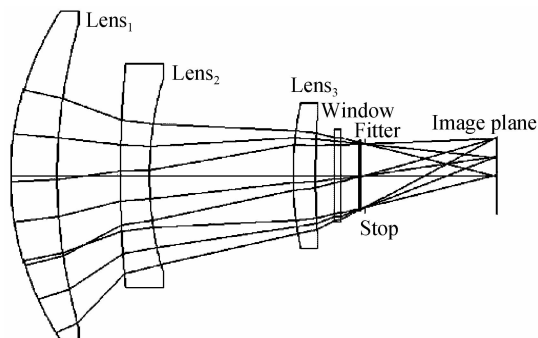


图 2 光学系统

Fig. 2 Layout of optical system

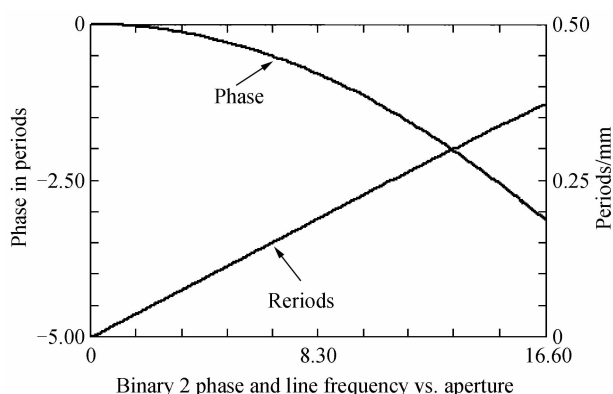


图3 谐衍射面的特征曲线

Fig. 3 Curve of harmonic diffractive surface

值.由图3可知,谐衍射光学面的最大线频率为0.375 periods/mm,对于最小周期线宽为2.66 mm,若每周刻蚀8个台阶,此时对应的最小特征尺寸为332.5 μm ,这样的尺寸完全可以用金刚石车削工艺加工.为了校正消除系统的球差和彗差,在系统第六面中引入了一个非球面.

图4、图5中(a)~(c)分别给出了系统3.8~4.2 μm 光谱和8.8~11.2 μm 光谱处在-120、60、100 $^{\circ}\text{C}$ 的MTF曲线,在空间频率16 lp/mm处,3.8~4.2 μm 光谱处所有视场的传函值均在0.42以上,8.8~11.2 μm 光谱处所有视场的传函值均在0.35以上,表明系统在两个光谱均能优质成像,表明其满足-80~100 $^{\circ}\text{C}$ 的宽温度范围的多谱段设计.

按照光学系统像差评价“瑞利判据”的标准,即当实际波面与理想波面的最大差别不超过 $\lambda/4$ 时,该波

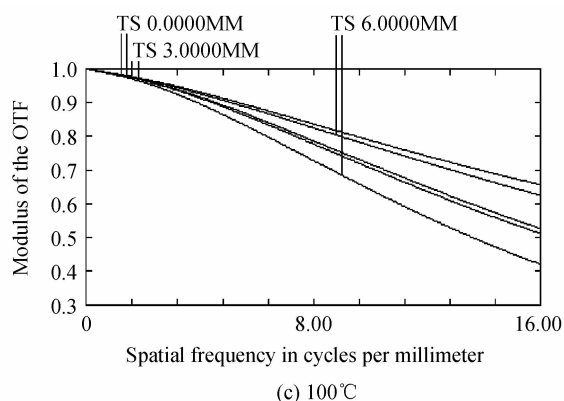


图4 红外物镜3.8~4.2 μm 波段的MTF
Fig. 4 MTF of infrared lens in 3.8~4.2 μm

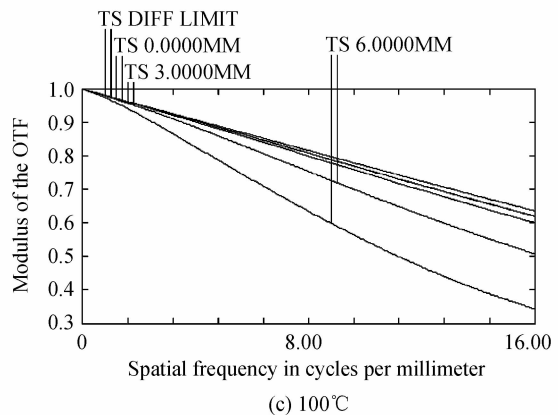
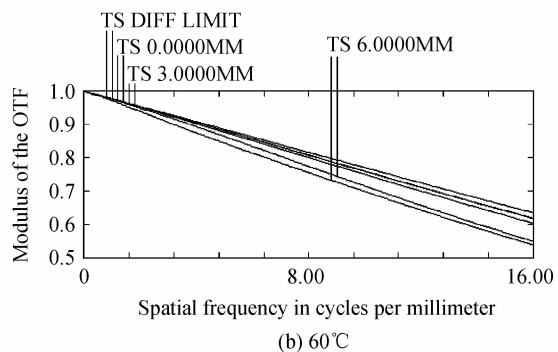
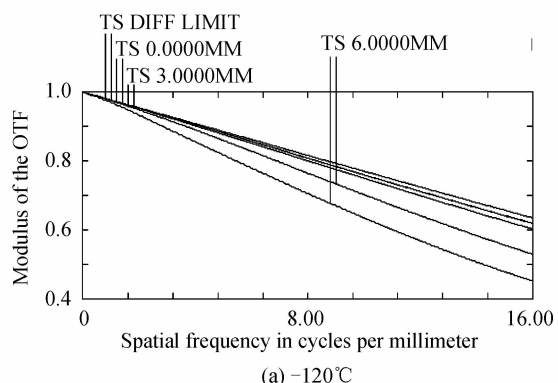
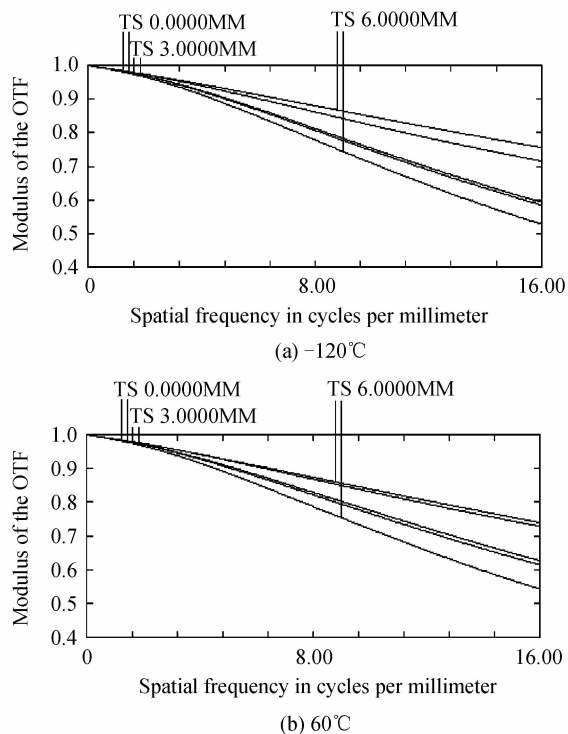


图5 红外物镜8.8~11.2 μm 波段的MTF
Fig. 5 MTF of infrared lens in 8.8~11.2 μm

面可看作无缺陷的,由此可知该系统很好的实现了消热差设计.根据波像差与离焦量的关系,可知该系统3.8~4.2 μm 光谱处的最大离焦量为11.6 μm ,而系统



8.8~11.2 μm 光谱处的焦深为 32 μm , 该系统 3.8~4.2 μm 、8.8~11.2 μm 光谱处的最大离焦量分别为 36.2 μm 、80 μm , 该系统在两个光谱区间的最大离焦量均小于焦深, 系统可用。

3 结论

采用折射/衍射混合结构设计了一个工作在 3.8~4.2 μm 和 8.8~11.2 μm 双光谱探测的红外物镜, 该红外物镜在 -120~100 $^{\circ}\text{C}$ 超宽温度范围内无需调焦可实现被动式消热差, 在超宽温度范围内, 光学系统的离焦量小于系统焦深. 空间频率 16 lp/mm 处, 红外物镜在 -120~100 $^{\circ}\text{C}$ 超宽温度范围内 3.8~4.2 μm 和 8.8~11.2 μm 光谱范围的光学传递函数分别优于 0.42 和 0.35, 成像质量良好, 实现了宽温探测. 该红外物镜适用于像元尺寸为 30 μm 、像元数 320 \times 240 的红外双色探测器. 设计方法表明, 在光学系统中引入衍射元件构成折射/衍射混合消除热差和色差, 不仅增加了选材的自由度, 还大大简化了红外物镜的设计难度。

参考文献

- [1] ZHANG Xing-de, LI Rong-gang. Research and development of dual-band infrared camera system[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(8): 801-804.
张兴德, 李荣刚. 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.
- [2] YU Jian-cheng, SUN Sheng-li. Point target detection arithmetic's realization based on decision fusion in dualband infrared images[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(3): 296-299.
俞建成, 孙胜利. 基于红外双波段数据融合点目标检测算法的实现[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(3): 296-299.
- [3] JIANG Yang, SUN Qiang, LIU Ying, *et al.* Athermal design for IR optical seeker system with wide FOV [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 462-466.
姜洋, 孙强, 刘英等. 大视场红外导引头光学系统消热差设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 462-466.
- [4] ZHAO Ya-hui, FAN Chang-jiang, YING Chao-fu, *et al.* Hybrid diffractive-refractive 60 $^{\circ}$ field of view eyepiece with three-layer diffractive optical element [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 266-271.
赵亚辉, 范长江, 应朝福, 等. 含三层衍射元件的 60 $^{\circ}$ 视场折/衍混合头盔目镜[J]. *光子学报*, 2013, **42**(3): 266-271.
- [5] GAO Hong-yun, CHEN Men-wei, YANG Ying-pin, *et al.* Novel long wavelength infrared diffractive-refractive athermal optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2143-2147.
郜洪云, 陈梦伟, 杨应平等. 新型长波红外折衍混合消热差系统[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2143-2147.
- [6] LIDWELL M. Diffractive lenses for dual waveband IR [C]. SPIE, 1996, **2774**: 352-362.
- [7] LEE T S, HSIEN M. Dual-band reflective infrared thermal imaging system; US, 20060261271A1[P]. 2006-11-23.
- [8] CHEN Jin-jin, ZHAO Jin-song. A compact MWIR objective for infrared search/tracking system [J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(5): 279-283.
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): 279-283.
- [9] XUE Hui. Optical design of infrared search and trace system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2383-2388.
薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2383-2388.
- [10] FAN Chang-jiang. The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1266-1270.
范长江. 红外双波段双层系统设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1266-1270.