

双层谐衍射双波段红外消热差光学系统设计

张欣婷 安志勇

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要 设计了工作于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 双波段、 F 数为 1.2 的大相对孔径的红外消热差光学系统。该系统全视场角为 22° , 有效焦距为 50 mm, 系统总长 78 mm。系统采用锗和 AMTIR I (Ge、As、Se 混合材料) 两种材料, 为三片镜结构。通过引入双层谐衍射元件, 大大提高了衍射效率, 减小了色差, 并使系统重量减轻。系统在 $-40\ ^\circ\text{C}\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围内性能稳定, 适用于像元尺寸为 $25\ \mu\text{m}$, 像元数为 $640\ \text{pixel}\times 480\ \text{pixel}$ 的凝视式双波段焦平面阵列探测器。设计结果表明: 当探测器的尼奎斯特频率为 $20\ \text{lp/mm}$ 时, 温度取不同值时的调制传递函数 (MTF) 值均大于 0.5, 成像质量良好, 实现了消热差设计。可在作用距离为 2 km 时, 分辨 3 m 范围的目标, 满足军事侦察的需求。

关键词 光学设计; 双波段; 大相对孔径; 双层谐衍射; 消热差光学系统

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0622004

Design of Infrared Athermal Optical System for Dual-Band with Double-Layer Harmonic Diffraction Element

Zhang Xinting An Zhiyong

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract An infrared athermal optical system with F number of 1.2 for dual-band of $3\sim 5\ \mu\text{m}$ and $8\sim 12\ \mu\text{m}$ is designed. In this system, the view of vision angle is 22° , total length is 78 mm. Germanium and AMTIR I (mix of Ge, As and Se) and double-layer harmonic diffraction element are used to simplify the three-lens structure, decrease weight, and improve the quality of the imaging. Across temperature range of $-40\ ^\circ\text{C}\sim 60\ ^\circ\text{C}$, the system has a stable performance and applies to gaze-type dual-band focal plane array detector with pixel size of $25\ \mu\text{m}$, and pixel number of $640\ \text{pixel}\times 480\ \text{pixel}$. The design results show that, the modulation transfer function (MTF) is greater than 0.5 at different temperatures when the Nyquist frequency of detector is $20\ \text{lp/mm}$. The imaging quality is good, and athermal design is realized. It can distinguish a target of 3 m when the distance is 2 km. So this system can meet the needs of military reconnaissance.

Key words optical design; dual band; large relative aperture; double-layer harmonic diffraction; athermal optical system

OCIS codes 110.1220; 110.3080; 110.4100

1 引 言

随着伪装技术的发展, 侦察识别目标的难度也越来越大, 单一波段的侦察已经很难满足各种各样的需求。由于大气传输的影响, 目标在不同光谱波段表现的光学特征有较大差异。短波红外的特性与

可见光比较接近; 波长 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中波红外主要用于观测高温事件; 波长 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的长波红外主要用于探测常温物体轮廓。因而可以利用多波段来实现全天候、高分辨率目标侦察^[1,2]。

本文结合中波红外和长波红外这两个波段的成

收稿日期: 2012-12-12; 收到修改稿日期: 2013-03-07

作者简介: 张欣婷(1984—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事光学设计与光学仪器及检测等方面的研究。

E-mail: luoyiwuhens@163.com

导师简介: 安志勇(1943—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学仪器和光电检测方面的研究。

E-mail: an_zhiyong@126.com

像特点,提出了双波段成像系统的研究。可以有效剔除目标的伪装信息,提高目标的探测与识别能力、识别速率,并降低系统的虚景率^[3]。

2 设计原理

大相对孔径光学系统,因其焦深小,实际允许成像质量良好的温度变化范围很小,对其进行设计时必须考虑消像差和消热差的要求。为了消除温度变化的影响,可采取热补偿的措施实现无热化,以保证系统在空间环境温度变化范围内成像性能稳定。

2.1 双层谐衍射元件

适用于双波段光学红外系统的均匀性好的光学材料很难获取,且材料种类少;而传统纯折射型的红外双波段光学系统体积庞大,造成后续的机械结构非常复杂。因此在所设计的系统中引入衍射光学元件。对于宽波段或多波段光学系统,单层衍射元件只在设计中心波长处衍射效率最高,在中心波长两侧主衍射级次的衍射效率逐渐下降,次衍射级次的衍射能量弥散在主衍射级次的像面上,致使平均衍射效率不到 50%,影响了像面的对比度,降低了系统的成像质量。为此提出了双层谐衍射透镜的概念:利用两种不同色散的材料作为基底,构建两个不同相位高度的单层表面微结构,进行层叠后便得到了双层谐衍射光学元件。它既保留了普通衍射透镜的独特性能,又可以在一系列分离的波长处获得相同的光焦度,而且可以大幅度提高各波段的衍射效率^[4,5]。

谐衍射元件与普通衍射元件的不同之处在于其中心厚度是后者的 P 倍(P 为正整数),即谐衍射元件的中心厚度为 $P\lambda_0/(n-1)$,此时光通过谐衍射透镜时所产生的最大相位是 $2P\pi$,环带间光程差为 $P\lambda_0$ 。相当于设计波长为 $P\lambda_0$,焦距为 f_0 的普通衍射透镜,如图 1 所示。 P 可作为设计参数控制光谱范围内哪几种波长的光能会聚到一个焦平面^[6]。

2.2 红外消热差原理

利用衍射光学元件的负色散特性,可实现对光波面的任意相位调制,并且与折射元件配合可以改善系统成像质量、减小系统体积和重量。通过在不同的波段选取不同的衍射级次,系统可以得到相同的光焦度,从而实现双波段成像。

光学补偿原理是利用各透镜组的焦距随温度变化而变化的规律,使系统的像面保持稳定,同时保证系统焦距的补偿。要使光学系统能在一定的温度范围内具有良好的性能,系统必须同时满足总光焦度、

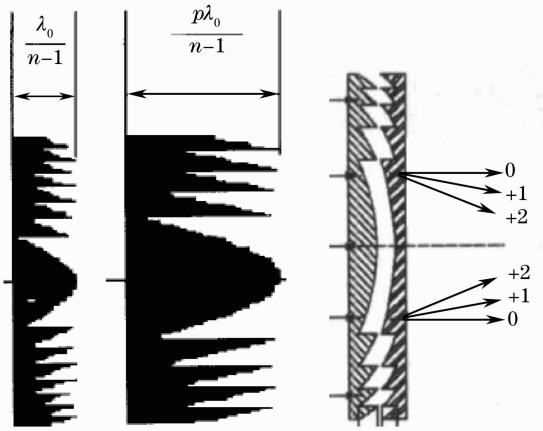


图 1 (a)普通衍射元件;(b)单层谐衍射元件;
(c)双层谐衍射元件

Fig. 1 (a) General diffraction element; (b) single-layer harmonic diffraction element; (c) double-layer harmonic diffraction element

消轴向色差和热补偿方程^[7~12],即光焦度分配要求

$$\sum_{i=1}^j h_i \varphi_i = \varphi, \quad (1)$$

消色差要求

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 \omega_i \varphi_i = 0, \quad (2)$$

消热差要求

$$\frac{df_b^T}{dT} = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right) \sum_{i=1}^j h_i^2 x_i \varphi_i = \alpha_H L, \quad (3)$$

式中 h_i 为第一近轴光线在各透镜组的高度; φ 为系统的总光焦度; φ_i 为各个透镜的光焦度; ω_i 为光学元件的色散因子,也就是色散引起的光焦度的相对变化,等于材料阿贝数 ν 的倒数; x_i 为光热膨胀系数; Δf_b^T 是光学元件的色散所引起的离焦,即轴向色差; df_b^T/dT 是由光学元件的温度效应所引起的离焦; α_H 为外部机械结构的线膨胀系数; L 为机械构件的长度。

在折射式系统中引入衍射元件,则可通过波带片的位置、槽宽、槽深以及槽型结构的改变产生任意的波面,不仅大大增加了设计的自由度,降低系统无热化设计的难度,同时衍射元件独特的色散特性(阿贝数恒为负值),有利于实现系统的消色差设计。此外合理分配光焦度,利用非球面和衍射元件相互配合,可以实现消热差设计。

3 设计过程

3.1 结构选型

由于系统设计要求具有一定的视场角,分离的

两组透镜有利于轴外像差的校正。分离的两组透镜的结构主要有摄远结构、反远距结构和佩茨瓦尔结构。其中摄远结构系统总长较小,但由前组承担的相对孔径大于系统的相对孔径,使用这种结构前组负担的相对孔径太大。反远距结构由于前组为负透镜,增加了第一近轴光线在后组的高度,将导致后组负担的相对孔径过大,且系统总长较长。佩茨瓦尔结构由于前后组均为正光焦度透镜,能够较为合理地在前后组间分配光焦度。虽然前后组均为正光焦

表1 常用热红外光学材料的特性

Table 1 Properties of thermal infrared optical materials

Material	Index of refraction (4 μm)	Index of refraction (10 μm)	$(dn/dt)/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$	Remark
Germanium	4.0243	4.0032	396	Expensive, large dn/dt
Silicon	3.4255	3.4179	150	Large dn/dt
ZnS (CVD)	2.2520	2.2005	43.3	
ZnSe (CVD)	2.4331	2.4065	60	Expensive, low-dispersion
AMTIR I	2.5141	2.4976	72	

由于 Ge 的折射率和阿贝系数都较大,且有较好的机械加工性能,所以 Ge 是首选的红外材料。此外,为了实现消色差,一般选用 dn/dt 较小的材料与 dn/dt 较大的材料相搭配,这里选取 AMTIR I (Ge、As、Se 混合材料)来实现系统的设计。

3.3 探测器选取

目前所使用的红外探测器主要有制冷型和非制冷型两种。制冷型红外探测器具有分辨率高和灵敏度高的优点,但其价格高、可靠性差、体积大而又笨

重,会带来无法校正场曲的问题,但其场曲主要为初级场曲,选择高折射率红外材料并利用过校正像散平衡初级场曲,可以将场曲控制在焦深范围内。因此,本系统选用佩茨瓦尔结构。

3.2 光学材料选取

可见光系统有许多种玻璃类型可以使用,但只有极其有限的材料可同时有效地用于中波红外 (MWIR)和长波红外 (LWIR)波段。表 1 列出了比较常用的材料及其重要特性。

与制冷红外探测器相比,非制冷红外探测器不需要在系统中安装制冷装置和机械扫描装置,光阑位置无限制,因此尺寸较小,重量较轻且功耗较低。此外,它与制冷型探测器相比可提供更宽的频谱响应和更长的工作时间^[8]。因此,这种非制冷红外探测器在军用和民用领域应用越来越广泛。目前常见的高分辨率红外非制冷探测器尺寸规格主要有以下几种(表 2):

表2 常见高分辨率红外非制冷探测器尺寸

Table 2 Infrared uncooled detector size with high resolution

Number of pixels	Pixel size / μm	Detector size (length \times width \times diagonal) /mm
640 \times 480	17	10.88 \times 8.16 \times 13.6
640 \times 480	25	16 \times 12 \times 20
384 \times 288	25	9.6 \times 7.2 \times 12
320 \times 240	25	8 \times 6 \times 10

采用 640 pixel \times 480 pixel,单个像元尺寸为 25 μm 的凝视式双波段焦平面阵列探测器。通过计算,探测器的尼奎斯特频率为 20 lp/mm,可以实现红外系统的高分辨率。

3.4 结构参数选取

1) 焦距

该系统要求在作用距离为 2 km 时,能够分辨 3 m 范围的目标。根据相关理论可知:系统用于探测目标时,需要占探测器 3 pixel;而用于识别目标时,则需要占探测器 14 pixel。该系统用于军事侦察,因此需要占 3 pixel。系统相关参考数满足

$$\frac{3D}{f'} = \frac{\sigma}{L}, \quad (4)$$

即

$$f' = \frac{3DL}{\sigma} = \frac{3 \times 25 \mu\text{m} \times 2 \text{ km}}{3 \text{ m}} = 50 \text{ mm}, \quad (5)$$

式中 D 为艾里斑直径,设计时需要让艾里斑直径和像元尺寸相匹配; σ 为系统分辨率; L 为作用距离。

2) 相对孔径倒数(F 数)

红外系统的目标一般较远,作用距离大,能量微弱,因此,要求光学系统的接收孔径要大,以收集尽量多的辐射能量。另外,光学系统要将所收集到的红外辐射能量汇聚到探测器上,为了在探测器的光敏表面上获得更大的照度,希望光学系统的焦距小

一些,这样,光学系统的相对孔径 D/f' 就要大些。此外探测器的信号输出电压与其光敏表面的照度成正比,照度越大,信号输出电压也越大。而光敏表面上的照度又与物镜相对孔径的平方成正比。因此,为了提高系统的探测能力,就要加大系统的相对孔径,即降低 F 数。但是, F 数的减小会增大加工工艺的难度和像差校正的难度。根据衍射极限的计算公式, F 数的计算公式为

$$F = \frac{D}{2.44\lambda} = \frac{25 \mu\text{m}}{2.44 \times 8 \mu\text{m}} = 1.28. \quad (6)$$

由此选取系统的 $F=1.2$ 。

3) 视场角

因为探测器单个像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$,由公式 $\tan \omega = \frac{D/2}{f'}$ 可计算出系统所能承担的最大视场角为 26° ,这里选取 $2\omega=22^\circ$ 。

综上所述,设计中选取 $F=1.2, f'=50 \text{ mm}, 2\omega=22^\circ$ 。

4 设计结果

4.1 技术指标

本文设计的红外无热化系统主要针对军事侦察,根据使用要求及衍射光学元件的相关特性,现制定技术指标如下:

- 1) 工作波段: $3\sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12 \mu\text{m}$;
- 2) 视场角: $2\omega=22^\circ$;
- 3) F 数: $F=1.2$;
- 4) 焦距: $f'=50 \text{ mm}$
- 5) 工作温度范围: $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$;

6) 当探测器尼奎斯特频率为 20 lp/mm 时,要求最大视场调制传递函数(MTF)值大于 0.4 。

4.2 光学系统像质评价

由于光学系统的相对孔径很大,引入了较多的高级像差,而高级像差系数正比于初级像差系数,因此将第一片透镜的后表面和第二片透镜的前表面设计为衍射面,在通光孔径范围内共有 12 个环带,易于用金刚石车床加工。此外,由于非制冷型红外热像仪不用液氮制冷,不需要冷却光阑,孔径光阑可置于光学系统内任意位置,而不改变原系统的光学性能参数,因此选择将光阑居前组正中,以尽可能减小轴外像差。

图 2 为红外消热差光学系统结构图,系统总长 78 mm 。图 3 和图 4 分别为长波和中波的 MTF 曲线,图 5 和图 6 为长波和中波的衍射能量曲线(这里

只列出了 20°C 时的曲线, -40°C 和 60°C 的曲线与其类似)。像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$ 对应的尼奎斯特频率处,即 20 lp/mm 处, 0 视场、 0.7 视场和全视场的子午面和弧矢面 MTF 值均大于 0.5 。

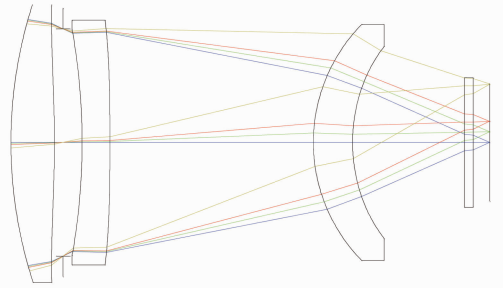


图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Optical system structure

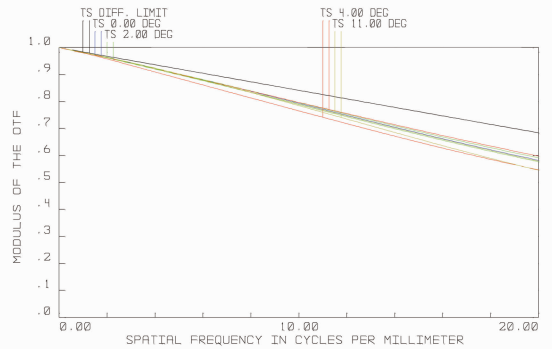


图 3 传递函数曲线(长波)

Fig. 3 Curves of modulation transfer function for long wave

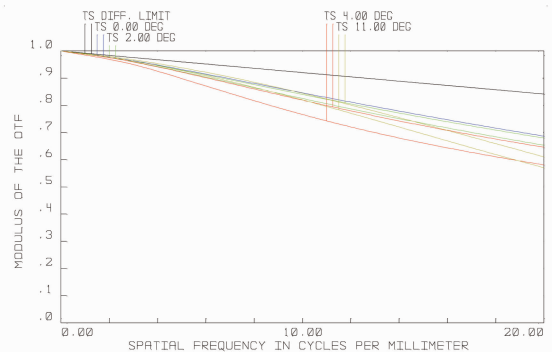


图 4 传递函数曲线(中波)

Fig. 4 Curves of modulation transfer function for middle wave

此外,光学系统在 $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 的温度范围内的最大离焦量为 $15 \mu\text{m}$,而计算所得的系统焦深为 $\Delta = \pm 2\lambda F^2 = \pm 23 \mu\text{m}$ 。可见,系统的最大离焦量小于焦深,满足成像质量要求。同时,系统点列图中的均方根直径均小于探测器的单个像元尺寸

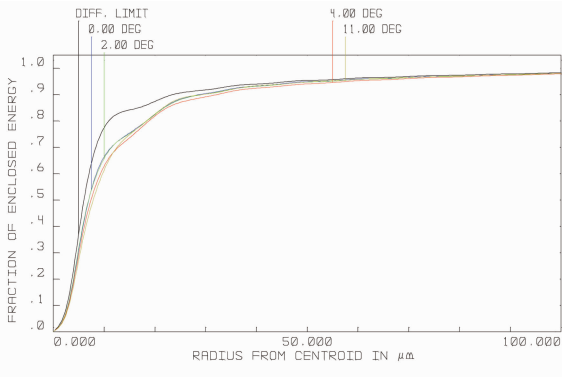


图5 衍射能量曲线(长波)

Fig. 5 Curves of diffraction encircled energy for long wave

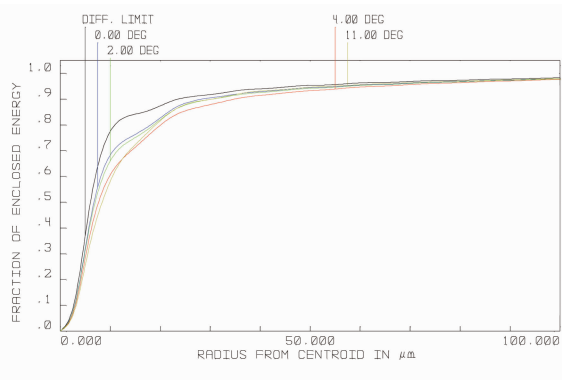


图6 衍射能量曲线(中波)

Fig. 6 Curves of diffraction encircled energy for middle wave

25 μm ,两者的尺寸相匹配,从而能获得最佳成像质量。

5 结 论

设计了工作于3~5 μm 和8~12 μm 双波段、 F 数为1.2的大相对孔径的折衍混合红外消热差光学系统。除此之外,系统还具备以下优势:

1) 系统采用Ge和AMTIR I两种红外材料组成的三片式结构,引入了一个双层谐衍射元件,很好地校正了色差,减轻了仪器重量。2) 系统达到22°的全视场角,有效焦距为50 mm,系统总长为78 mm,结构紧凑,实现了仪器的小型化。3) 系统采用单个像元尺寸为25 μm 、像元数为640 pixel \times 480 pixel的凝视式双波段红外焦平面阵列探测器,无需制冷,因此可以减小体积、降低功耗,其在一40 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内性能稳定。

设计结果表明:在尼奎斯特频率为20 lp/mm时,不同温度下的MTF值均大于0.5,成像质量好。系统可在作用距离2 km时,分辨3 m范围的目标,满足军事侦察的需求。

参 考 文 献

- 1 T. H. Jamieson. Ultrawide waveband optics [J]. *Opt. Engng.*, 1984, **23**(2): 111~116
- 2 H. Jiang, Y. Qian, K. T. Rhee. High speed dual spectral infrared imaging [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(6): 1281~1283
- 3 Ren Deqing, B. J. Rauscher. The optical design of infrared dual band system [J]. *Infrared Technology*, 1998, **20**(3): 19~22
- 4 Li Shenghui, Yang Changcheng, Zheng Jia *et al.*. Optical passive athermalization for infrared zoom system [C]. *SPIE*, 2007, **6722**: 67224E
- 5 Liu Lin, Shen Weiming, Zhou Jiankang. Design on athermalized middle wavelength infrared optical system with large relative aperture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679
刘琳,沈为民,周建康.中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 675~679
- 6 Han Ying, Wang Zhaoqi, Yang Xinjun *et al.*. Design on athermal infrared diffractive-refractive hybrid inversed telephoto system in 8~12 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 77~80
韩莹,王肇圻,杨新军等.8~12 μm 波段折/衍混合反摄远系统消热差设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 77~80
- 7 Zhang Tinan, Wang Zhaoqi, Sun Qiang. Athermalized design of extensive temperature range for infrared hybrid refractive-diffractive objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 311~314
张铁楠,王肇圻,孙强.折/衍混合红外物镜的超宽温消热差设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 311~314
- 8 Wang Xuexin, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems [J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(1): 129~133
王学新,焦明印.红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(1): 129~133
- 9 Chen Lüji, Feng Shengrong. A compact athermalizing infrared optical system [J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(4): 203~205
陈吕吉,冯生荣.一种紧凑的红外消热差光学系统[J]. *红外技术*, 2007, **29**(4): 203~205
- 10 Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Design of infrared dual-band athermal optical system [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(4): 385~389
杨新军,王肇圻,母国光等.红外双波段消热差系统设计[J]. *光子学报*, 2004, **15**(4): 385~389
- 11 Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Sun Qiang *et al.*. Optical system design for a dual-band space imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 50~54
杨新军,王肇圻,孙强等.空间双波段成像光谱仪红外光学系统的设计[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 50~54
- 12 Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8~12 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **30**(7): 2089~2092
陈潇,杨建峰,马小龙等.8~12 μm 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. *光子学报*, 2010, **30**(7): 2089~2092

栏目编辑:张腾