

文章编号 1004-924X(2010)03-0579-07

谐衍射中、长波红外超光谱成像系统设计

刘 英^{1,2}, 王学进³, 潘玉龙³, 徐长明³, 孙 强¹, 卢振武¹, 曲 锋^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 第二炮兵工程设计研究院, 北京 100011)

摘要: 为了充分利用中波红外和长波光谱的信息, 建立了谐衍射中、长波红外超光谱成像系统。利用谐衍射元件独特的色散特性, 将谐衍射透镜应用于中、长波红外超光谱成像系统中, 使系统在中波红外 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 和长波红外 $8.5\sim 12\ \mu\text{m}$ 的 2 个谐振波段内获取二百多个不同波长的图像信息。设计结果显示, 在中波红外波段 $18\ \text{lp/mm}$ 处, 光学调制传递函数 > 0.52 ; 长波红外波段 $13\ \text{lp/mm}$ 处, 光学调制传递函数 > 0.51 ; 光学系统的点斑均方根直径在中波红外波段小于 $27\ \mu\text{m}$, 在长波红外波段小于 $34\ \mu\text{m}$ 。得到的结果表明, 光学调制传递函数在各个波长处均接近衍射极限, 点斑的均方根直径完全可以与国内现有探测器的像元尺寸匹配。

关键词: 红外成像; 超光谱成像系统; 谐衍射透镜

中图分类号: TH744.1; TN219 **文献标识码:** A

Design of hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and long infrareds

LIU Ying^{1,2}, WANG Xue-jin³, PAN Yu-long³,
XU Chang-ming³, SUN Qiang¹, LU Zhen-wu¹, QU Feng^{1,2}

- (1. *Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *Engineering Design & Research Institute of the Second Artillery, Beijing 100011, China*)

Abstract: By making the best of the spectral information of medium and long infrareds, a harmonic diffractive/refractive optical system in middle and long infrareds is established, the hyper-spectral imaging system has obtained more than 200 spectral images in medium-wave infrared band of $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ and long-wave infrared band of $8.5\sim 12\ \mu\text{m}$ based on the special large dispersion capability of harmonic diffractive elements. The design results show that the optical modulation transfer function is greater than 0.52 at $18\ \text{lp/mm}$ in medium-wave infrared band; and greater than 0.51 at $13\ \text{lp/mm}$ in long-wave infrared band. Furthermore, the RMS spot diameter is less than $27\ \mu\text{m}$ in medium-wave infrared band and is less than $34\ \mu\text{m}$ in long-wave infrared band. Obtained data indicate that the optical modulation transfer functions at all wavelengths are close to the diffraction limit; and the RMS diame-

收稿日期: 2009-03-02; 修订日期: 2009-04-30.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA12Z110); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60507003); 吉林省科技发展计划杰出青年资助项目

ter of points can match with the pixel size of existing detectors.

Key words: infrared imaging; hyper-spectral imaging system; harmonic diffraction lens

1 引言

当前,军事侦查要求全天候、高分辨率、大信息量、实时传输的侦察系统,而单一波段红外探测系统获取的信息弱、准确度低,已不能满足现代军事探测的要求。红外超光谱侦察仪器能够在波长相邻、连续采样的窄带光谱波段上获得数十至数百个通道光谱图像,利用这种高光谱分辨率的超光谱图像数据,可以根据地球表面众多物体的光谱特征精确地识别目标,还能做到对地面物质的理化、生物性能诊断和成分分析等,因此,它具有广泛的应用前景和其他技术手段无法比拟的优势。

近年来,欧美等国先后投入了大量人力和物力对超光谱成像光谱仪进行研究,已发展了多种色散型、计算层析型和干涉傅里叶变换类型的超光谱成像技术^[1-3],其中有一些已在实际系统中得到应用,但这些系统存在结构复杂、体积大、能量低等一系列缺点。Lyons^[4]提出一种新颖结构,利用衍射光学透镜独特的色散特性设计出用于可见或红外光谱范围的成像光谱仪,但是,这种光谱仪只能探测一个波段的信号。1995年 Sweeney, Sommargren, Faklis 和 Morris 等人,分别提出了谐衍射透镜(HDE)的概念,它可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度,可用在多光谱、宽视场及大数值孔径的光学成像系统中。2005年,美国陆军实验室应用制冷型光子探测阵列建立了中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~10 μm)波段的双波段超光谱成像仪^[5-6]。目前,国内现有的制冷型中波红外探测器的工作波段为 3.7~4.8 μm,像元尺寸为 30 μm;非制冷型长波红外探测器的工作波段为 8.5~12 μm,像元尺寸为 38 μm。

本文利用谐衍射元件(HDE)的特性,将中波红外(3.7~4.8 μm)、长波红外(8.5~12 μm)同时应用于超光谱成像系统中,讨论并确定了光学系统的最佳设计波长 λ_0 和谐衍射透镜的相位因子 p 的取值,并给出了设计公式和具体设计的光

学系统的结构。基于谐衍射透镜的中、长波红外超光谱系统在 3.7, 4.25, 4.8, 8.5, 10, 12 μm 的系统成像质量接近衍射极限,满足超光谱系统的成像要求。而且,该光学系统具有体积小、结构简单、信息量大的优点。

2 确定相位因子 p 和设计波长 λ_0

谐衍射元件的衍射效率公式^[7-11]为:

$$\eta_m = \frac{\left[\sin \left\langle \pi \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda)-1}{n(\lambda_0)-1} \right] p - m \right\} \right\rangle \right]^2}{\pi \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda)-1}{n(\lambda_0)-1} \right] p - m \right\}}, \quad (1)$$

整理得:

$$\eta_m = \sin^2 \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda)-1}{n(\lambda_0)-1} \right] p - m \right\}, \quad (2)$$

式中, λ_0 为设计波长, p 为谐衍射透镜的相位因子, m 为衍射级次。

谐衍射元件的谐振条件:

$$m\lambda = p\lambda_0. \quad (3)$$

图 1 为在设计波长 λ_0 一定、 $p=m$ 时,根据公式(2)拟合的不同 p 值的谐衍射元件的衍射效率曲线图。从图中可以看出,随 p 值的增大,围绕给定级次的衍射效率覆盖的带宽变窄。

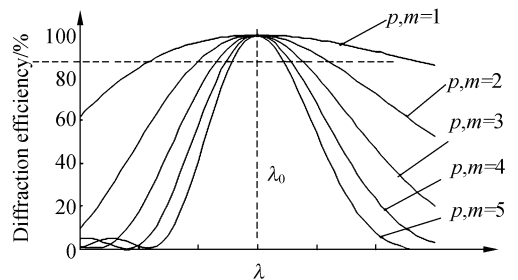


图 1 不同 p 值时,衍射效率覆盖的带宽情况($p=m$)

Fig. 1 Diffraction efficiency vs bandwidth situation ($p=m$) at different p

(1) 当 $p=2, \lambda_0=10.5 \mu\text{m}$ 时,为了充分应用中波红外(3.7~4.8 μm),取谐振波长为 4.2 μm,则由式(3)可得,对应的谐振级次为 $m=p\lambda_0/\lambda=5$ 。根据谐衍射透镜的衍射效率公式,借助 Mat-

lab 软件, 可得此时系统的衍射效率曲线图, 如图 2。

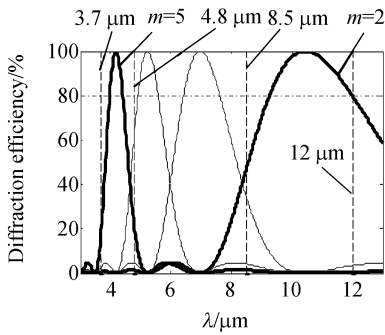


图 2 $p=2, \lambda_0=10 \mu\text{m}$ 时, 衍射透镜的衍射效率曲线图
Fig. 2 Diffraction efficiency of HDE at $p=2, \lambda_0=10 \mu\text{m}$

由图 2 可以看出, 当 $p=2, \lambda_0=10 \mu\text{m}$ 时, 在中波红外 ($3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$), 只有很窄的带宽内的衍射效率 $>80\%$, 在图中用点划线表示, 因此这种方案是不能满足成像光学系统对衍射效率要求的。

(2) 当 $p=1, \lambda_0=8.5 \mu\text{m}$ 时, 为了充分应用中波红外 ($3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$), 取谐振波长为 $4.25 \mu\text{m}$, 则由式 (3) 可得对应的谐振级次为 $m = p\lambda_0/\lambda = 2$ 。根据谐衍射透镜的衍射效率公式 (2), 借助 Matlab 软件, 可得此时系统的衍射效率曲线图, 如图 3。

由图 3 可以看出, 当 $p=1, \lambda_0=8.5 \mu\text{m}$ 时, 在中波红外 ($3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$), 衍射级次为 $m=2$ 时, 带宽内所有波长的衍射效率均大于 80% , 在图中用点划线表示; 而且在长波红外 ($8.5 \sim 12 \mu\text{m}$), 所有波长的衍射效率都 $>75\%$ 。因此, 这种方案是完全能够满足成像光学系统对衍射效率的要求。

3 确定光学系统的结构模式

考虑制冷型探测器具有响应速度快, 探测效率高等一系列优点, 结合国内探测器的现状, 确定中波红外 ($3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$) 用制冷型焦平面阵列探测器, 长波红外 ($8.5 \sim 12 \mu\text{m}$) 用非制冷型焦平面阵列探测器。中波红外的光学系统如图 4(a), 长波红外的光学系统如图 4(b)。

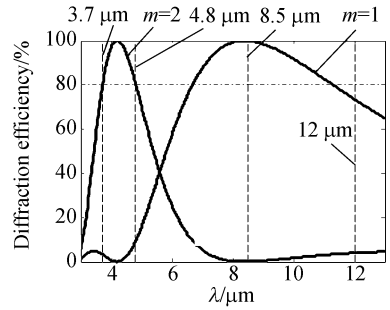
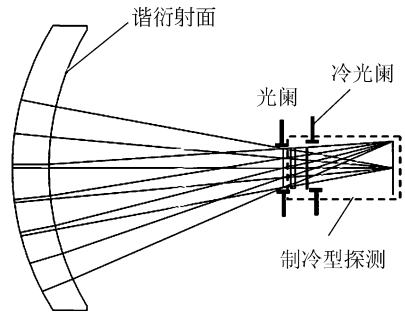
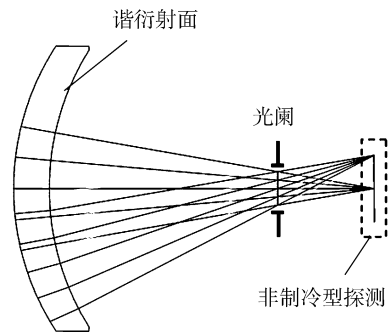


图 3 $p=1, \lambda_0=8.5 \mu\text{m}$ 时, 衍射透镜的衍射效率曲线图
Fig. 3 Diffraction efficiency of HDE at $p=1, \lambda_0=8.5 \mu\text{m}$

为了使光学系统的孔径光阑跟制冷型探测器的冷光阑匹配, 本文将光学系统的孔径光阑放置在制冷型探测器的附近, 为了使冷光阑不至于引进边缘视场的渐晕, 设计通过孔径光阑最边缘的光束宽度略小于冷光阑的尺寸。在光学系统中,



(a) 中波红外波段的光学系统
(a) Optical system in medium-wave infrared



(b) 长波红外波段的光学系统
(b) Optical system in long-wave infrared band

图 4 中波红外、长波红外成像方式对比
Fig. 4 Contrast of imaging optical systems in medium and long wave infrareds respectively

中波红外与长波红外共用加有谐衍射面的会聚透镜和孔径光阑,只是中波红外各个波长所成的像用制冷型焦平面阵列探测器接收,长波红外各个波长所成的像用非制冷型焦平面阵列探测器接收。

图 5 给出了中波红外 3.7, 4.8 μm 和长波红外 8.5, 12 μm 通过加有谐衍射面的聚焦透镜的聚焦位置。图中, Δ_1, Δ_2 分别表示中波红外和长波红外焦平面的变化范围; 所示的谐衍射透镜凹面顶点到光阑的距离 $d=54.4 \text{ mm}$ 在整个超光谱成像过程中保持不变, 而获得各个波长的光谱图像只需要改变谐衍射透镜和探测器之间的距离 L , 从而简化了步进电机的驱动模式。

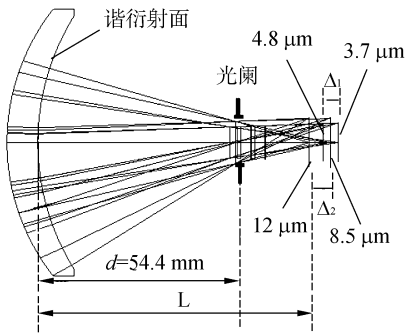


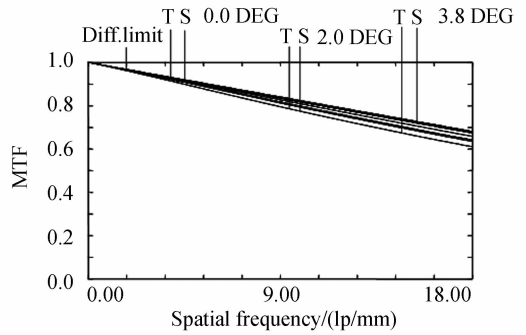
图 5 中、长波红外双波段谐衍射超光谱成像系统原理示意图

Fig. 5 Principle map of medium and long wave infrared hyper-spectral imaging system with harmonic diffractive element

4 光学系统的性能分析

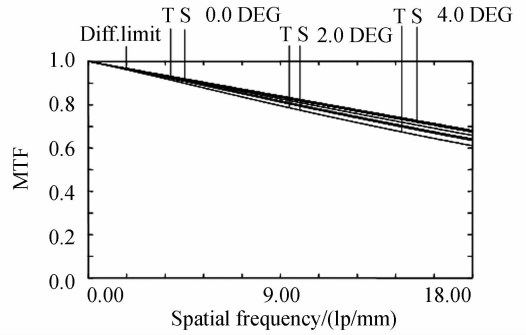
4.1 调制传递函数

图 6 给出光学系统分别在中波红外 3.7,



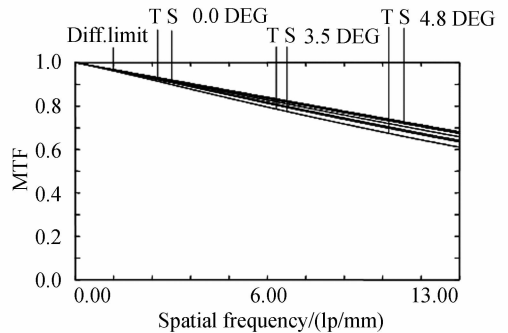
(b) 4.25 μm 时系统的 MTF

(b) MTF at 4.25 μm



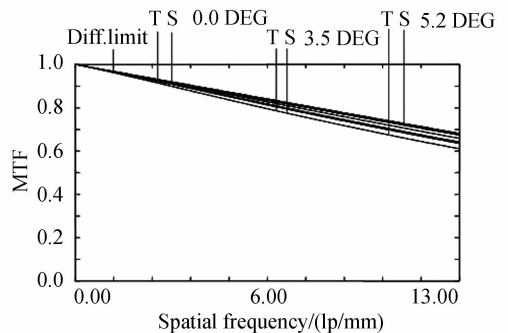
(c) 4.8 μm 时系统的 MTF

(c) MTF at 4.8 μm



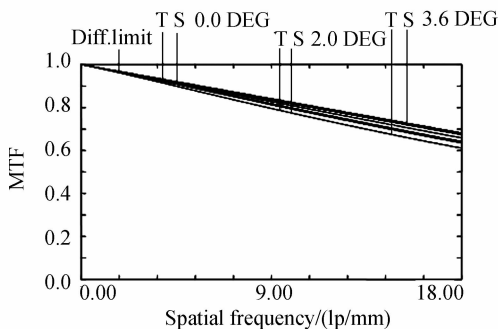
(d) 8.5 μm 时系统的 MTF

(d) MTF at 8.5 μm



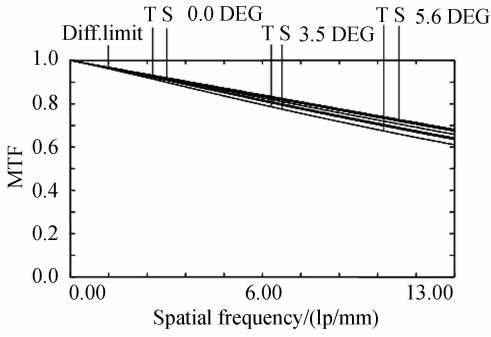
(e) 10 μm 时系统的 MTF

(e) MTF at 10 μm

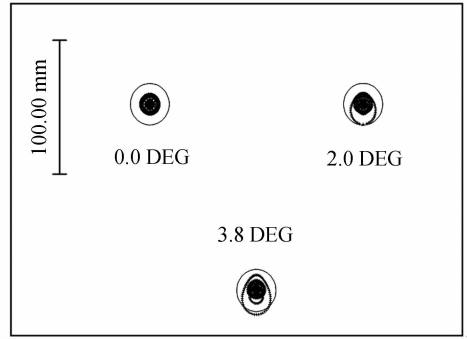


(a) 3.7 μm 时系统的 MTF

(a) MTF at 3.7 μm



(f) 12 μm 时系统的 MTF
(f) MTF at 12 μm



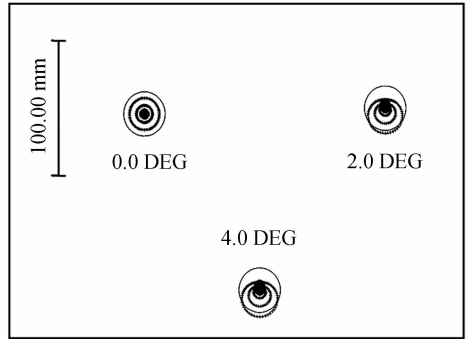
(b) 4.25 μm 时系统的点列图
(b) Spot diagram at 12 μm

图 6 光学系统中波、长波红外各个波长处的 MTF
Fig. 6 MTF at medium and long wave infrareds

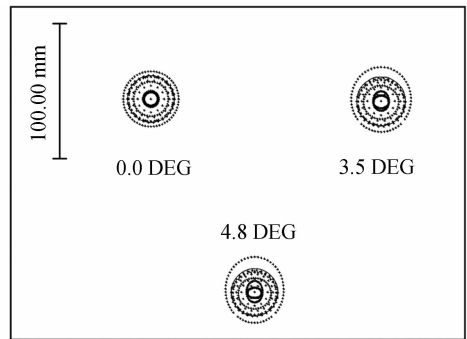
4.25, 4.8 μm 和长波红外 8.5, 10, 12 μm 的调制传递函数曲线图, 分别对应图中(a)、(b)、(c)和(d)、(e)、(f)。对于中波红外选用探测器的像元尺寸 $a_1 = 30 \mu\text{m}$, 对应的乃奎斯特频率约为 $N_1 = 1/2a_1 \approx 17 \text{ lp/mm}$, 由图(a)、(b)、(c)可知, 中波红外各个波长在 18 lp/mm 处, $\text{MTF} > 0.52$; 对于长波红外选用探测器的像元尺寸 $a_2 = 38 \mu\text{m}$, 对应的乃奎斯特频率约为 $N_2 = 1/2a_2 \approx 13 \text{ lp/mm}$, 由图(d)、(e)、(f)可知, 长波红外各个波长在 13 lp/mm 处, $\text{MTF} > 0.51$ 。因此, 该光学系统的设计完全能够满足光学系统成像要求。

4.2 光学系统的点列图

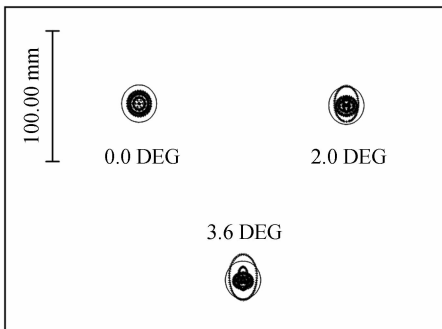
图 7 为光学系统分别在中波红外 3.7, 4.25, 4.8 μm 和长波红外 8.5, 10, 12 μm 的点列图, 分别对应图中(a)、(b)、(c)和(d)、(e)、(f)。从图中可以看出, 中波红外最大点斑均方根直径为 26.4 μm , 小于中波红外探测器的像元尺寸 30 μm ; 长波红外最大点斑均方根直径为 33.6 μm , 小于长



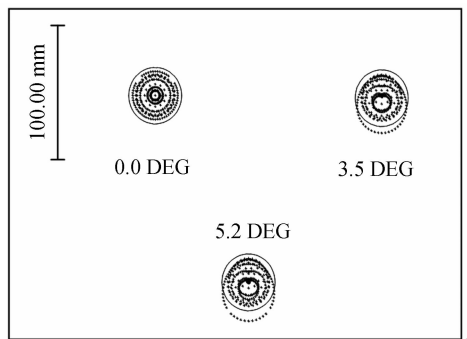
(c) 4.8 μm 时系统的点列图
(c) Spot diagram at 4.8 μm



(d) 8.5 μm 时系统的点列图
(d) Spot diagram at 8.5 μm



(a) 3.7 μm 时系统的点列图
(a) Spot diagram at 3.7 μm



(e) 10 μm 时系统的点列图
(e) Spot diagram at 10 μm

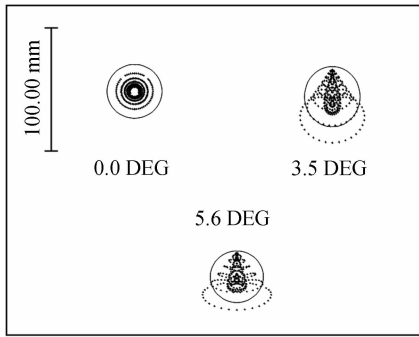
(f) $12\ \mu\text{m}$ 时系统的点列图(f) Spot diagram at $12\ \mu\text{m}$

图 7 光学系统的点列图

Fig. 7 Spot diagrams

波红外探测器的像元尺寸 $38\ \mu\text{m}$ 。因此,光谱仪系统各个波长处的点斑均方根直径能与目前国内现有探测器的像元尺寸相匹配。

参考文献:

- [1] DUBREUILL D, BAUDRAND U, ABERGEL A, *et al.*. Optical design for the $5\text{-}28\ \mu\text{m}$ NGST infrared imager of MIRI [J]. *SPIE*, 2003, 4850: 564~573.
- [2] PAMELA S D, MATTEW R B. Focus determination for the James Webb Telescope Instruments; a survey of methods [J]. *SPIE*, 2003, 265: 626512 (1)-626512(11).
- [3] DONALD W S, GARY E S. Harmonic diffractive lenses [J]. *Appl Opt*, 1995, 34: 2469-2475.
- [4] FAKLIS D, MORRIS G. Spectral properties of multiorder diffractive lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34: 2462-2468.
- [5] MICHELE H, NEELAM G, AMOLD G. Dual band (MWIR/LWIR) infrared hyper-spectral imager [J]. *IEEE*, 2003, 1103(5): 2452-2458.
- [6] DALE J, SNITH D, NEELAM G. Data collection with a dual-band infrared hyper-spectral imager [J]. *SPIE*, 2005, 5881: 588106-1-588106-11.
- [7] 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): 756-759.
SUN Q, LU ZH W, WANG ZH Q. The dual band design of harmonic diffractive-refractive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 756-759.
- [8] 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): 317-321.
SUN Q, WANG ZH Q, LIU H B, *et al.*. Optical system of harmonic diffractive/refractive for infrared dual-color detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 317-321. (in Chinese)
- [9] 杨新军, 王肇圻, 母国光. 折/衍混合多光谱红外成像光谱仪离轴系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2005, 34(4): 379-383.
YANG X J, WANG ZH Q, MU G G. Design of hybrid refractive/diffractive off-axial optical system for multispectral infrared imaging spectrometer [J]. *Opt. precision Eng.*, 2005, 34(4): 379-383. (in Chinese)
- [10] 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.
DONG K Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 764-770. (in Chinese)
- [11] 刘英, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2065-2071.

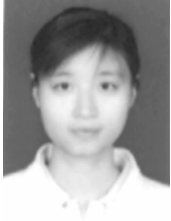
5 结 论

本文利用谐衍射元件特殊的色散特性和谐振条件,将中波红外和长波红外两个“大气窗口”同时应用到了超光谱成像系统中。文中探讨了谐衍射元件最佳相位因子的确定方法,阐述了基于谐衍射元件红外双波段超光谱成像的基本原理,并分析了该超光谱系统成像性能。通过对光学系统最佳优化设计后,在中波红外波段 $18\ \mu\text{m}$ 处,光学调制传递函数 >0.52 ;在长波红外波段 $13\ \mu\text{m}$ 处,光学调制传递函数 >0.51 ;成像质量接近衍射极限。而且,光学系统的点斑均方根直径在中波红外波段小于 $27\ \mu\text{m}$,在长波红外波段小于 $34\ \mu\text{m}$,能与国内现有探测器的像元尺寸很好匹配。因此,本文设计的成像光谱仪系统实现了轻小,简洁,信息量大,方便使用的设计要求。

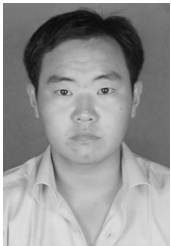
LIU Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Design on imaging system with harmonic diffraction element

in terahertz multi-band[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2065-2071. (in Chinese)

作者简介:



刘英(1980—),女,山东滨州人,博士研究生,2005年于山东师范大学获得学士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuy613@163.com



曲锋(1984—),男,山东泰安人,博士研究生,2006年于长春理工大学获得学士学位,主要从事红外图像处理方面的研究。E-mail: qu888@yahoo.com.cn



孙强(1971—),男,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn

导师简介:



卢振武(1955—),男,吉林人,研究员,博士生导师,1982年于东北师范大学获得学士学位,1985年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail: luzw@ciomp.an.cn

●下期预告

折/衍混合消热差共形光学系统设计

孙金霞^{1,2}, 刘建卓^{1,2}, 孙强¹, 方伟¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电研发中心, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

为了满足共形整流罩光学系统无热化的工作要求,设计了采用折/衍混合消热差方法的共形光学系统。在简要介绍共形光学系统像差特性以及衍射光学元件的像差、温度及色散特性的基础上,提出了充分利用制作于整流罩内壁用于消像散的衍射面结构的温度补偿能力的共形光学系统消热差结构设计方案,并设计了一个应用于中波红外成像结构中的万向支架式共形光学系统。软件分析结果表明,该系统在 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 能较好地保证 $\pm 20^{\circ}$ 搜索观察视场中的成像质量,且所有观察视场中的MTF值均大于0.43。