

折射/谐衍射红外双波段成像 光谱仪系统研究^{*}

刘 英¹⁾ 孙 强^{1)†} 卢振武¹⁾ 曲 锋¹⁾²⁾ 吴宏圣¹⁾ 李 淳¹⁾

1) (中国科学院长春光机与物理研究所, 光电技术研发中心, 长春 130033)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2009 年 7 月 12 日收到; 2010 年 1 月 11 日收到修改稿)

为了获取足够的目标信息, 充分利用中波红外和长波红外的光谱信息, 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—4.8 μm 和长波红外 8—12 μm 的 2 个红外大气窗口内获取数百个光谱图像. 设计结果表明, 中波红外波段, 在 18 对线/mm 处光学系统的调制传递函数 (MTF) 大于 0.55; 长波红外波段, 在 13 对线/mm 处光学系统的 MTF 大于 0.5; 光学系统的衍射环绕能, 在中波红外波段 30 μm 半径范围内大于 85%, 在长波红外波段 38 μm 半径范围内大于 80%; 光谱分辨率在 4.25 μm 处为 0.039 μm , 在 8.5 μm 处为 0.072 μm . 光学系统的 MTF 在各个波长处均接近衍射极限, 衍射能量完全满足国内现有探测器像元尺寸对能量的要求.

关键词: 红外双波段, 谐衍射透镜, 超光谱, 成像光学系统

PACC: 4225F, 4215E

1. 引 言

成像光谱仪是现代遥感技术最重要的发展之一, 它能够在连续光谱段上对同一目标同时成像, 可直接反映出被观测物体的光谱特征, 甚至物体表面的物质成分, 因此可用于环境污染管理、城市规划、土地资源分析、植被分类和测绘、农业、洪涝火灾、地质与矿产调查、海岸带和海洋生态研究、大气探测和军事等多种方面. 它对自然灾害、环境污染、危及人类的危险事故等的预报、发生、评估等将起重要作用, 具有极高的军事应用价值.

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 Fourier 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 提出了一种新颖结构^[4], 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 以及 Faklis 和 Morris^[5]等分别提出了谐衍射透镜的概念, 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.

本文利用谐衍射元件的特性, 将中波红外 (3.7—4.8 μm)、长波红外 (8—12 μm) 同时应用于超光谱成像系统^[6,7]中, 推导出了折射/谐衍射混合结构和纯谐衍射元件的光谱分辨率公式和光谱在光轴上的色散范围公式, 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, 4.8, 8 和 12 μm 时, 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. 谐衍射元件的分光原理及工艺特点

由于衍射作用, 谐衍射元件^[8-10]产生色差的有

^{*} 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA12Z110) 和国家自然科学基金 (批准号: 60507003) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

效焦距同波长成反比

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

其中 p 为相位匹配因子, 取整数, 代表最大位相调制 (2π) 的整数倍 ($p \geq 2$), λ_0 为设计波长, $f_{H\lambda_0}$ 为设计波长的焦距, m 为衍射级次, $f_{H\lambda}$ 为任意波长 λ 处的焦距。

如果要求 $f_{H\lambda}$ 与设计焦距 $f_{H\lambda_0}$ 重合, 即应满足

$$\lambda m = p\lambda_0. \quad (2)$$

这说明对于衍射元件, 凡波长满足 (2) 式的整数 m 所对应的波长均将会聚到共同的焦点 $f_{H\lambda_0}$ 处, 并称具有不同衍射级次但有相同焦距的各光波波长为谐振波长. 图 1 为衍射元件的色散示意图, 图中 b 位置为谐振波长会聚处, a 到 c 之间为各个谐振波段内光谱色散范围。

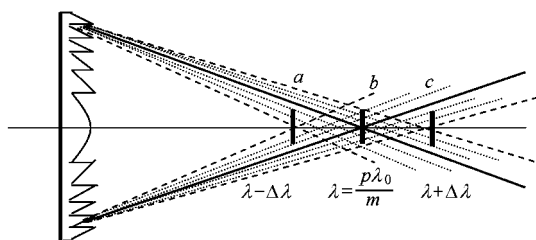


图 1 衍射元件的色散

将 (1) 式代入衍射一级透镜公式

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}, \quad (3)$$

则有

$$s_i(\lambda) = \frac{f_{H\lambda} s_0}{s_0 - f_{H\lambda}} = \frac{p\lambda_0 f_{H\lambda_0} s_0}{m\lambda s_0 - p\lambda_0 f_{H\lambda_0}}, \quad (4)$$

其中 s_0 和 s_i 分别为物距和像距。

由 (4) 式可知, 衍射元件用于成像光谱仪时, 各谐振波段内沿光轴方向的像距依赖于波长. 当 s_0 和 s_i 已知, 可求出参与成像的波长

$$\lambda = \frac{p\lambda_0 f_{H\lambda_0}}{m} \left(\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} \right). \quad (5)$$

普通衍射元件的相位函数表示形式为

$$\begin{aligned} \phi_D &= m(A_1 r_{n,D}^2 + A_2 r_{n,D}^4 + A_3 r_{n,D}^6 + \cdots) \\ &= n \cdot 2\pi \quad (n = 1, 2, 3, \cdots), \end{aligned}$$

其中, m 为衍射级次, r_n 为衍射元件第 n 环带半径. A_1 为二次相位系数, 决定该面的傍轴光角度, 用于产生色差, 实现分光和成像, A_2, A_3 等为非球面相位系数, 用于校正系统的单色像差。

而衍射元件的相位函数表示形式为

$$\begin{aligned} \phi_H &= \frac{m\lambda}{p\lambda_0} (A_1 r_{n,H}^2 + A_2 r_{n,H}^4 + A_3 r_{n,H}^6 + \cdots) \\ &= n \cdot 2\pi \quad (n = 1, 2, 3, \cdots), \end{aligned}$$

若只考虑 A_1 项, 则

$$r_{n,H} = \sqrt{p\lambda_0/\lambda} \cdot r_{n,D}. \quad (6)$$

由 (6) 式可知, 对于具有相同面型参数的衍射元件, 衍射元件的环带间隔是普通衍射元件的 $\sqrt{p\lambda_0/\lambda}$ 倍, 减少了衍射面上的环带周期数, 从而降低了工艺难度, 节约了成本。

3. 折射/衍射混合透镜的光谱分辨率

光谱分辨率是成像光谱仪的重要参数, 当设计或评价成像光谱仪时, 通常讨论此参数. 由于在衍射^[11,12]光学凝视成像光谱技术中, 光轴方向为色散方向, 即系统光谱变化的方向, 那么光轴方向的点扩展函数描述了近邻离焦光谱切片的模糊效应, 它是光谱带宽和光谱分辨率的决定因素. 如图 1 所示, 波长 λ 在 $\lambda + \Delta\lambda$ 的焦平面上产生模糊效应. 由于二元光学相位透镜可看作普通的透镜, 下面根据 Born 和 Wolf 在光学原理^[13]一书中描述的衍射理论来推导衍射成像光谱仪的光谱分辨率. 由图 2 可知, 折射/衍射透镜的入瞳直径为 $2a$, 设计波长为 λ_0 , 衍射元件的设计焦距为 $f_{D\lambda_0}$, 折射/衍射透镜的总焦距为 f , 离焦量为 Δ , 弥散斑半径 r , 光学系统总 F 数 $f/\# = f/2a$. 根据衍射能量的公式^[13], 引入两个无量纲变量

$$u = \frac{\pi}{2\lambda} \frac{\Delta}{(f/\#)^2}, \quad (7)$$

$$v = \frac{\pi r}{\lambda (f/\#)}, \quad (8)$$

由 (7) 和 (8) 式可知

$$\Delta = 2r(f/\#) \frac{u}{v}. \quad (9)$$

折射/衍射混合透镜可以等效为两个密接的薄透镜组合, 则总的光角度

$$\varphi = \varphi_r + \varphi_{H\lambda}, \quad (10)$$

式中 $\varphi_{H\lambda} = 1/f_{H\lambda}$ 是衍射元件光角度, $\varphi_r = 1/f_r$ 是折射元件的光角度。

折射/衍射混合透镜总焦距为

$$f = \frac{f_r f_{H\lambda}}{f_r + f_{H\lambda}}. \quad (11)$$

将 (1) 式代入 (11) 式, 并对其微分, 忽略折射元件的

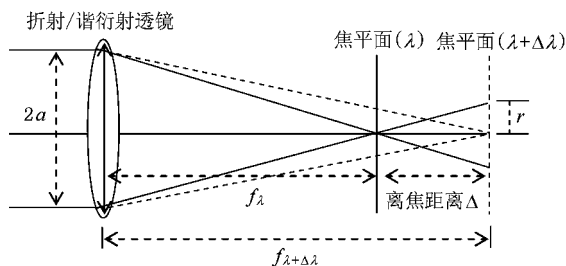


图2 谐衍射透镜离焦示意图

色散,则

$$\Delta f = \frac{f^2}{f_{H\lambda}^2} \frac{p\lambda_0}{m\lambda^2} f_{H\lambda} \Delta\lambda, \quad (12)$$

令 $\Delta = \Delta f$, 则

$$\Delta\lambda = \frac{rf_{H\lambda}^2}{af} \frac{m\lambda^2}{p\lambda_0 f_{H\lambda}} \frac{u}{v}. \quad (13)$$

由谐衍射元件的近轴光角度与 A_1 的关系

$$\varphi_{H\lambda} = \frac{1}{f_{H\lambda}} = -\frac{m\lambda}{\pi} A_1, \quad (14)$$

知

$$\varphi_{H\lambda} = \frac{1}{f_{H\lambda}} = -\frac{p\lambda_0}{\pi} A_1. \quad (15)$$

将(14)和(15)式代入(12)式,则

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi r(f/\#)}{mA_1 f^2} \frac{u}{v}. \quad (16)$$

为了使 λ 在 $\lambda + \Delta\lambda$ 的焦平面上不能清晰成像,弥散斑半径 r 大于等于探测器的像元尺寸 S_p (pixel size), 这里取等于,则(12)式变为

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi \cdot S_p \cdot (f/\#)}{mA_1 f^2} \frac{u}{v}. \quad (17)$$

当 $v = 1.22\pi$ 时,由(8)式可知

$$r = 1.22\lambda(f/\#),$$

恰好为几何衍射极限的 Airy 斑半径.

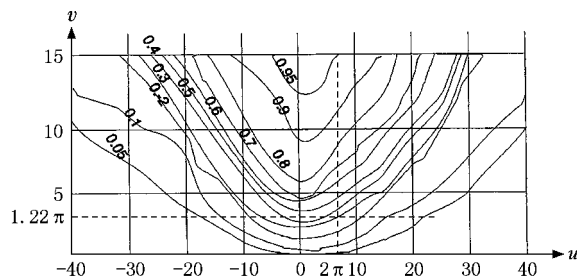
当 $u = 2\pi$ 时,由(7)式可知

$$\Delta = 4\lambda(f/\#)^2,$$

恰好为光学系统的焦深.

根据 Born 和 Wolf 在光学原理一书^[12],我们给出了在 u, v 坐标系下,接收面上的能量百分比的轮廓线图,如图3所示.从图中可以看出,当 $u = 2\pi, v = 1.22\pi$ 时,即在离焦 $\Delta = 4\lambda(f/\#)^2$ 时,衍射斑的能量下降为没离焦时的 0.3,使得 λ 在 $\lambda + \Delta\lambda$ 的焦平面上成像对比降低,从而使得 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 的成像光谱分开.因此,折射/谐衍射透镜的光谱分辨率可表示为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \frac{2\pi \cdot S_p \cdot (f/\#)}{mA_1 f^2} \frac{2\pi}{1.22\pi} \\ &= \frac{4\pi}{1.22} \frac{S_p \cdot (f/\#)}{mA_1 f^2}, \end{aligned} \quad (18)$$

图3 在 u, v 坐标系下,接收面上的能量百分比的轮廓线

由(18)式可知,折射/谐衍射混合透镜系统的光谱分辨率与探测器的像元尺寸 s_p 、衍射级次 m 、系统的 $f/\#$ 、总焦距 f 及衍射面的二次相位系数 A_1 有关,因此,可通过调整这 5 个量,来改变系统的光谱分辨率.

若光学系统仅由谐衍射元件组成,则

$$f = f_{H\lambda} = -\frac{\pi}{m\lambda A_1}, \quad (19)$$

将(19)式代入(18)式,得只有纯谐衍射元件系统的光谱分辨率

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_H &= \frac{4\pi}{1.22\pi} \frac{S_p}{f_{H\lambda}} \lambda (f/\#)_{H\lambda} \\ &= \frac{4\pi}{1.22\pi} \cdot IFOV \cdot \lambda \cdot (f/\#)_{H\lambda}, \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $IFOV = \frac{S_p}{f_{H\lambda}}$, 为纯谐衍射元件系统的瞬时视场, $(f/\#)_{H\lambda}$ 为纯谐衍射元件系统的 F 数.

由(20)式可知,纯谐衍射元件系统的光谱分辨率只与 $IFOV, (f/\#)_{H\lambda}$ 及 λ 有关.

将(15)和(18)式代入(12)式,可得折射/谐衍射混合光学系统能分开 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 两幅光谱图像时,系统焦平面移动的最小步长

$$\Delta f = \frac{4\pi}{1.22\pi} \cdot S_p \cdot (f/\#), \quad (21)$$

由(21)式可知折射/谐衍射混合光学系统分光谱的最小步长与探测器的 s_p 和 $f/\#$ 有关.

将(18)和(19)式代入(21)式,可得纯谐衍射元件光学系统能分开 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 两幅光谱图像时,系统焦平面移动的最小步长

$$\Delta f_{H\lambda} = \frac{4\pi}{1.22\pi} \cdot S_p \cdot (f/\#)_{H\lambda}, \quad (22)$$

由(22)式可知纯衍射元件光学系统分光谱的最小步长与探测器的 s_p 和 $(f/\#)_{H\lambda}$ 有关.

将(14)和(15)式代入(12)式得

$$\Delta f = \frac{mA_1 f^2}{\pi} \Delta \lambda.$$

所以,当光学系统的光谱范围从 λ_1 变化到 λ_2 时,焦平面中的变化总长度为

$$\Delta f_{\text{total}} = \frac{mA_1 f^2}{\pi} \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} (\lambda_1 - \lambda_2). \quad (23)$$

将(19)式代入(23)式,可得纯衍射元件光学系统光谱范围从 λ_1 变化到 λ_2 时,焦平面中的变化总长度为

$$\Delta f_{H\text{total}} = 2f_H \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (24)$$

4. 成像光谱仪系统设计及分析

4.1. 参数确定

制冷型探测器具有响应速度快、探测效率高等一系列优点,并结合国内现有的探测器资源,我们确定中波红外选用制冷型焦平面阵列探测器,其 F 数为 2,光谱响应波段为 3.7—4.8 μm ;长波红外选用非制冷型焦平面阵列探测器,光谱响应波段为 8—12 μm .

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,我们将冷光阑作为光学系统的孔径光阑,使系统的冷光阑效率为 100%,也保证了系统的 F 数与非制冷探测器的 F 数一致为 2. 由于非制冷探测器灵敏度较低,在使用非制冷探测器时系统的 F 数一般要小于 2,因此,我们在长波红外光谱仪系统设定 F 数为 1.5.

衍射效率是衍射光学系统非常主要的一个参量,为了在 3.7—4.8 μm 和 8—12 μm 两个光谱范围内同时获得最高的衍射效率,设 $p = 2$, $\lambda_0 = 4.25$ μm , $f_0 = 90$ mm. 由谐振条件可知, $m = 1$ 和 2,对应的谐振波长为 8.5 和 4.25 μm . 图 4 为 3.7—4.8 μm 和 8—12 μm 两个光谱范围内的衍射效率曲线图,可以看出在两个选定波谱范围内,衍射效率高于 75%,满足设计要求.

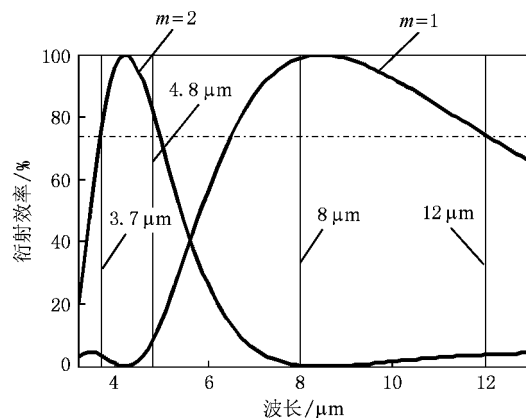


图 4 $p = 2$, $\lambda_0 = 4.25$ μm 时衍射透镜的衍射效率曲线图

通过上述分析,我们采用折射/衍射混合式设计对成像光谱仪系统进行设计,系统光路如图 5 所示. 其中图 5(a)为中波红外的光学系统光路图,通过调节制冷探测器与衍射透镜间的距离 L ,实现 3.7—4.8 μm 范围内光谱成像;图 5(b)为长波红外的光学系统光路图,通过调节孔径光阑与衍射透镜间的距离 L' ,实现 8—12 μm 范围内光谱成像,而孔径光阑与非制冷探测器间隔 D 在整个过程中保持不变,保证系统的 F 数不变. 该套系统共用同一个衍射透镜,通过一个十字滑台来交换探测器完成双波段光谱成像.

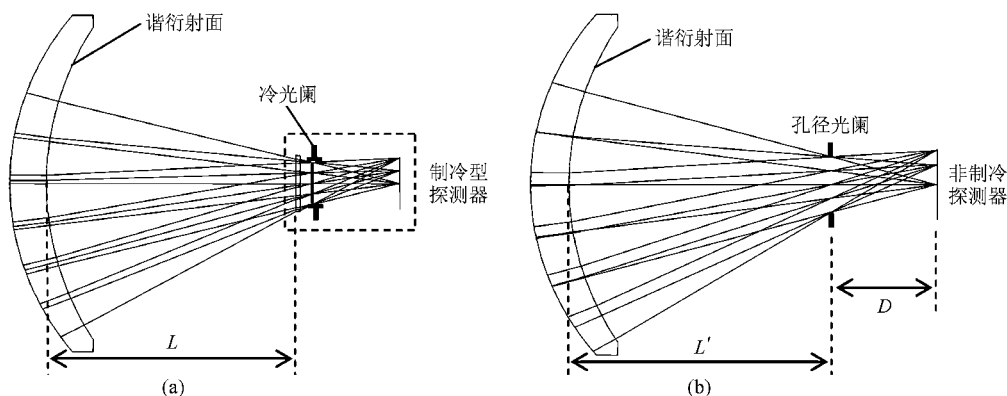


图 5 双波段成像光谱仪系统 (a) 中波红外波段的光学系统, (b) 长波红外波段的光学系统

通过对系统的优化设计 ,系统的最佳参数如表 1 所示.

表 1 成像光谱仪系统的性能参数

参数	大小
焦距	90 mm @ $\lambda = 4.25 \mu\text{m}$
	91 mm @ $\lambda = 8.55 \mu\text{m}$
$f/\#$	2 (3.7—4.8 μm)
	1.5 (8—12 μm)
透镜口径	86 mm
A_1	0.978 mm^{-2}
衍射级次	$m = 2$ @ $\lambda = 4.25 \mu\text{m}$
	$m = 1$ @ $\lambda = 8.5 \mu\text{m}$
S_p	$30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ (3.7—4.8 μm)
	$38 \mu\text{m} \times 38 \mu\text{m}$ (8—12 μm)
光谱分辨率	$0.039 \mu\text{m}$ @ $\lambda = 4.25 \mu\text{m}$
	$0.072 \mu\text{m}$ @ $\lambda = 8.5 \mu\text{m}$

4.2. 性能分析

图 6 给出光学系统分别在中波红外 3.7 和 4.8 μm 及长波红外 8 和 12 μm 的调制传递函数 (MTF) 曲线图 ,分别对应图 6 的 (a) ,(b) ,(c) 和 (d). 对于中波红外选用探测器的像元尺寸为 $a_1 = 30 \mu\text{m}$,对应的 Nyquist 频率约为 $N_1 = 1/2a_1 \approx 17 \text{ Ip/mm}$,由图 6 (a) 和 (b) 可知 ,中波红外各个波长在 18 Ip/mm 处 ,MTF > 0.55 ;对于长波红外选用探测器的像元尺寸为 $a_2 = 38 \mu\text{m}$,对应的 Nyquist 频率约为 $N_2 = 1/2a_2 \approx 13 \text{ Ip/mm}$,由图 6 (c) 和 (d) 可知 ,长波红外各个波长在 13 Ip/mm 处 ,MTF > 0.5. 因此 ,该光学系统的设计完全能够满足光学系统的成像要求.

图 7 为光学系统分别在中波红外 3.7 和 4.8 μm 及长波红外 8 和 12 μm 处的环绕能量曲线图.

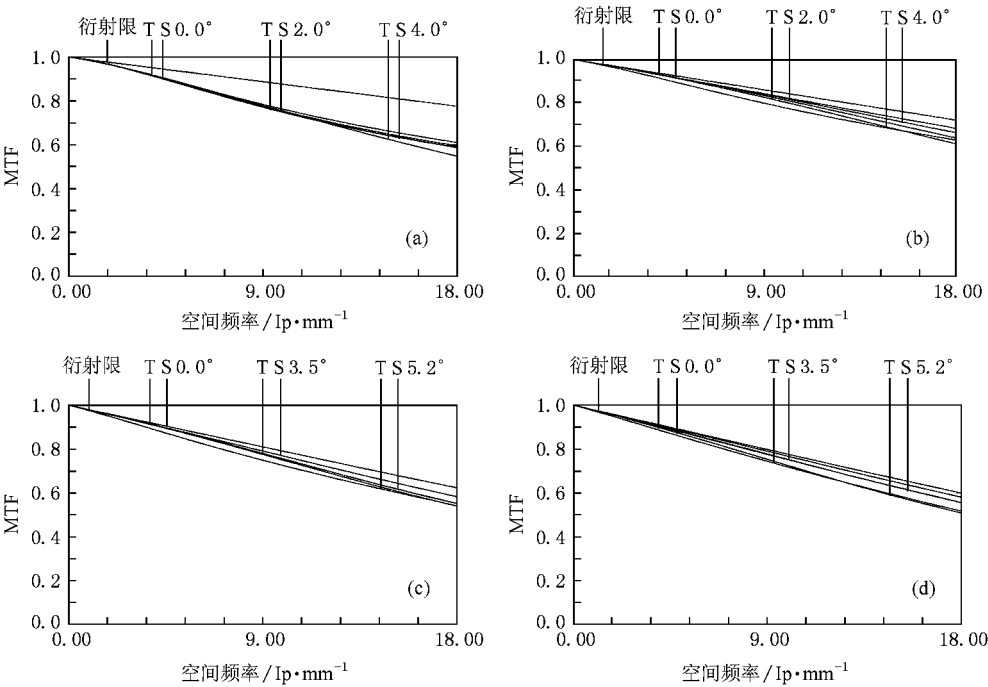


图 6 光学系统在各波长处的 MTF (a) 3.7 μm ,(b) 4.8 μm ,(c) 8 μm ,(d) 12 μm (图中 T 表示系统的子午方向 S 表示系统的弧矢方向)

从图中可以看出 ,中波红外在环绕半径为 30 μm 圆内 ,环绕能大于 85% ;长波红外在环绕半径为 38 μm 圆内 ,环绕能大于 80% . 因此 ,光学系统的设计满足探测器的能量要求.

为了验证系统的分辨率 ,对工作波长为 8.5 μm 的最佳像面位置进行分析 ,图 8 给出了 8.5 和

8.572 μm 分别在 8.5 μm 最佳像面位置上的点列图和衍射环绕能的对比图. 从图中可以看出 ,8.572 μm 在 8.5 μm 最佳像面位置上单个像元尺寸范围内衍射能量小于 30% ,形成模糊图像 ,并可以通过去模糊处理将模糊图像去除 ,从而验证了 8.5 μm 处的光谱分辨率为 0.072 μm .

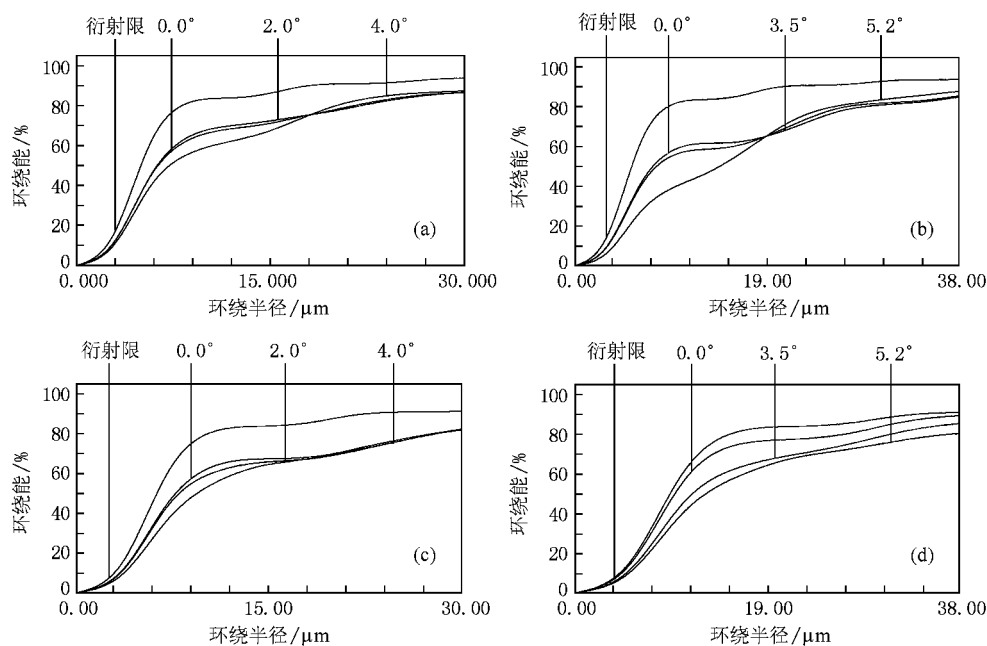


图7 光学系统在各波长处的环绕能量曲线图 (a) $3.7\ \mu\text{m}$, (b) $4.8\ \mu\text{m}$, (c) $8\ \mu\text{m}$, (d) $12\ \mu\text{m}$

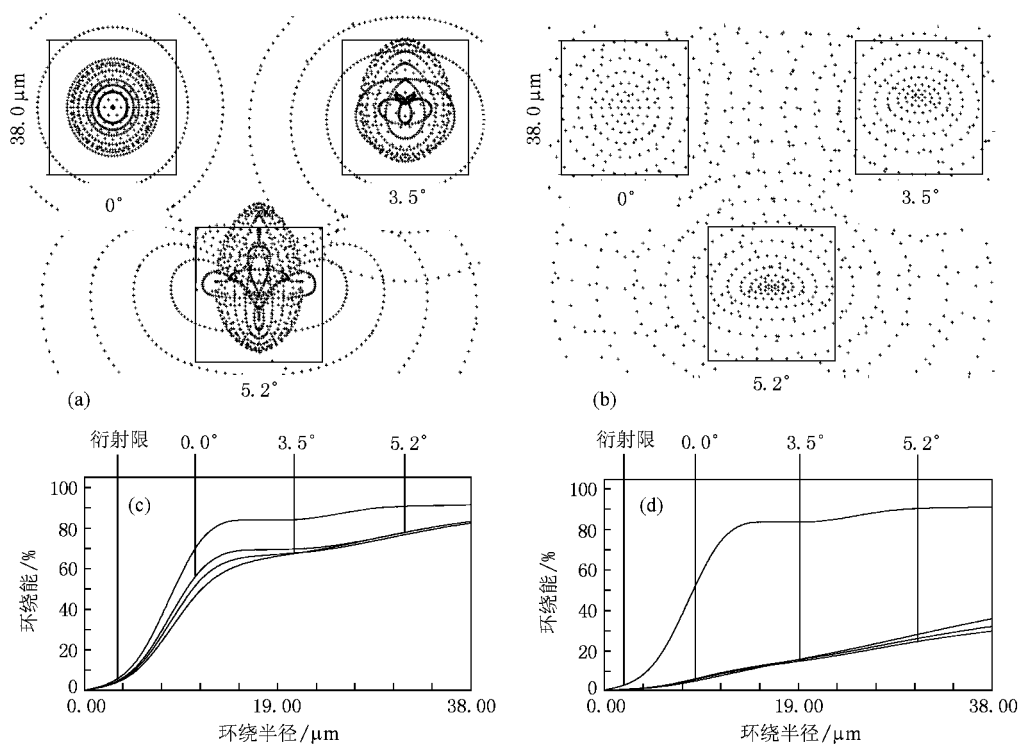


图8 8.5 和 $8.572\ \mu\text{m}$ 分别在 $8.5\ \mu\text{m}$ 最佳像面位置上的点列图和衍射环绕能的对比 (a) $8.5\ \mu\text{m}$ 时的点列图, (b) $8.572\ \mu\text{m}$ 时的点列图, (c) $8.5\ \mu\text{m}$ 时的环绕能量曲线图, (d) $8.571\ \mu\text{m}$ 时的环绕能量曲线图

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.文中推导了折射/谐衍射混合结构和纯衍射元件的光谱分辨率公式以及光谱在光轴上的色散范围公式,在公式推导过程中,充分考虑了焦深和像元尺寸对光谱分辨率的影响,其中(18)和(23)式更具有普遍性和实用价值.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,分析了该超光谱系统成像性能,并验证了长波红外 $8.5\ \mu\text{m}$ 处的光谱分辨率.通过对光学系统最佳优化设计后,中波红外波段,在 18 对线/mm 处光学 MTF 大于 0.55;长波红外波段,在 13 对线/mm 处光学 MTF 大于 0.5;成像质量接近衍射极限.而且光学系统的衍射环绕能,在中波红外波段 $30\ \mu\text{m}$ 半径范围内大于 85%,在长波红外波段 $38\ \mu\text{m}$ 半径范围内大于 80%,能满足国内现有探测器的单个像元尺寸范围内对能量的需求.光谱分辨率,在 $4.25\ \mu\text{m}$ 处为 $0.039\ \mu\text{m}$,在 $8.5\ \mu\text{m}$ 处为 $0.072\ \mu\text{m}$.因此,本文设计的成像光谱仪系统实现了轻小、简洁、信息量大和方便使用的设计要求.

-
- [1] Dubreuil D, Baudrand J, Abergel A, Bensammar S, Cretolle J B, Dargent P, Galdemard P, Gay J, Lacombe F, Lagage P O, Martin L, Prieto E, Rabbia Y, Reess J M, Riaud P, Rouan D, Mols P J, Salasca S, Semery A, Wright G S 2003 *Proc. SPIE* **4850** 564
 - [2] Davila P S, Bolcar M R, Bos B J, Bean B, Hagopian J G, Howard J M, Unger B L, Wilson M E 2006 *Proc. SPIE* **6265** 626512
 - [3] Sweeney D W, Sommargren G E 1995 *Appl. Opt.* **34** 2469
 - [4] Lyons D M 1995 *Proc. SPIE* **2480** 123
 - [5] Faklis D, Morris G M 1995 *Appl. Opt.* **34** 2462
 - [6] Hinnrichs M, Gupta Neelam, Goldberg A 2003 *32nd Applied Image Pattern Recognition Workshop (AIPR 2003)*, *Image Data Fusion* Washington DC, USA, October 15—17, 2003, p73
 - [7] Smith D J, Gupta N 2005 *Proc. SPIE* **5881** 588106
 - [8] Sun Q, Yu B, Wang Z Q, Mu G G, Lu Z W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 756 (in Chinese) [孙 强、于 斌、王肇圻、母国光、卢振武 2004 物理学报 **53** 756]
 - [9] Dong K Y, Pan Y L, Wang X J, Sun Q, Lu Z W 2008 *Opt. Precision Eng.* **16** 764 (in Chinese) [董科研、潘玉龙、王学进、孙 强、卢振武 2008 光学精密工程 **16** 764]
 - [10] Liu Y, Pan Y L, Wang X J, Sun Q, Lu Z W, Liu H, Zhang H X 2008 *Opt. Precision Eng.* **16** 2065 (in Chinese) [刘 英、潘玉龙、王学进、孙 强、卢振武、刘 华、张红鑫 2008 光学精密工程 **16** 2065]
 - [11] Dong K Y, Sun Q, Li Y D, Zhang Y C, Wang J, Ge Z J, Sun J X, Liu J Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4602 (in Chinese) [董科研、孙 强、李永大、张云翠、王 健、葛振杰、孙金霞、刘建卓 2006 物理学报 **55** 4602]
 - [12] Sun J X, Sun Q, Li D X, Lu Z W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3900 (in Chinese) [孙金霞、孙 强、李东熙、卢振武 2007 物理学报 **56** 3900]
 - [13] Wolf E, Born M 1981 *Principles of Optics* (Cambridge: Cambridge University) p439—450

Hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and far infrared^{*}

Liu Ying¹⁾ Sun Qiang^{1)†} Lu Zhen-Wu¹⁾ Qu Feng¹⁾²⁾ Wu Hong-Sheng¹⁾ Li Chun¹⁾

1) (*Opto-electronic Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

2) (*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 7 July 2009; revised manuscript received 11 January 2010)

Abstract

In order to obtain enough information about the target and make full use of medium- and long-wave infrared spectral data, this article describes a harmonic diffractive/refractive (HDE) optical imaging system. Taking advantage of its special dispersion capability, the application of HDE in the infrared dual-band provides hundreds of spectral images in infrared band, medium-wave infrared band of 3.7—4.8 μm and long-wave infrared band of 8—12 μm . The design results show that: at 18 lines/mm, the optical modulation transfer function is greater than 0.55 in medium-wave infrared band; at 13 lines/mm the optical modulation transfer is greater than 0.5 in long-wave infrared band; in the circle of 30 μm radius, the encircled energy is greater than 85% in medium-wave infrared band; in the circle of 38 μm radius, the encircled energy is greater than 80% in long-wave infrared band; the spectral resolution is 0.039 μm at 4.25 μm and 0.072 μm at 8.5 μm respectively. So the optical modulation transfer function in infrared dual-band is close to the diffraction limit, and the encircled energy meets the energy requirement of one pixel of existing domestic detectors.

Keywords: infrared dual-band, harmonic diffraction lens, hyper-spectral, imaging optical system

PACC: 4225F, 4215E

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grand No. 2007AA12Z110) and the National Natural Science Foundation of China (Grand No. 60507003).

[†] Corresponding author. E-mail: sunq@ciomp.ac.cn