

谐衍射双波段红外超光谱探测系统研究*

孙 强¹⁾²⁾ 于 斌¹⁾ 王肇圻²⁾ 母国光²⁾ 卢振武¹⁾

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, 长春 130022)

²⁾南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学国家教育部重点实验室, 天津 300071)

(2003 年 5 月 13 日收到, 2003 年 6 月 23 日收到修改稿)

根据谐衍射元件的特殊色散原理及红外波段的窗口特性, 将谐衍射透镜应用于红外超光谱探测器中. 阐述了利用衍射光学元件色散特性的新型红外双波段超光谱探测成像的基本原理, 给出了具体的系统设计实例. 设计结果表明, 此系统提高了图像的分辨率, 增大了接收光能量的能力. 在两个波段内同时较好地完成了系统的像差校正, 波前差都小于 $1/4$ 波长. 在 20 线对/mm 时, 光学传递函数在这两个波段内的各个变焦位置均达到衍射极限.

关键词: 谐衍射元件, 超光谱探测, 光学设计

PACC: 4225F, 0765, 4215E

1. 引 言

现代军事侦查要求全天候、高分辨率、实时传输的侦查系统. 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. 红外超光谱侦查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它们, 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. 在过去的十几年里, 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, 其中有一些已在实际系统中得到应用^[1-5]. Lyons^[6]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. 在这里, 衍射透镜既是分光元件又是成像元件, 这种光谱仪只能探测一个波段的信号, 因此探测精度低, 并且透镜的焦距随波长变化改变了系统的数值孔径, 改变了系统的放大率. 这将引起光谱图像的像元配准误差, 影响探测精度和容易混淆被探测目标, 得到并不真实的信号强

度. 1995 年 Sweeney, Sommargren, Faklis 和 Morris 等人^[7,8]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.

利用 HDE 的特性, 本文讨论了含有 HDE 的混合超光谱探测的谐衍射双波段光学系统研究, 从变焦光学系统的理论出发, 弥补了多光谱成像过程中的缺点, 并给出了设计公式和具体设计实例, 在 $3.7-4.3\mu\text{m}$ 波段和 $8.7-11.7\mu\text{m}$ 热红外波段具有较大视场, 成像质量接近衍射极限, 适应超光谱探测要求的混合光学系统. 此光学系统集成能力强、透射比高, 便于实现高精度的精密探测.

2. 红外谐衍射元件理论与色散原理

首先在标量衍射理论框架内讨论近轴 HDE 的衍射特性, 那么菲涅尔全周期衍射环带结构中第 j 周期的环带的光程差, 等于

$$P = f_0 + jp\lambda_0, \quad (1)$$

其中 λ_0 为设计波长, f_0 为设计波长的焦距, p 为整数, 代表最大位相调制 (2π) 的整数倍. 在近轴区域, 透镜环带位相的位置为

$$r_j^2 = 2jp\lambda_0 f_0. \quad (2)$$

衍射透镜的位相为

* 国家自然科学基金(批准号: 60277021)及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基金联合资助(批准号: DA01Q02D)的课题.

$$\phi(r) = 2\pi\alpha p \left(j - \frac{r^2}{2p\lambda_0 f_0} \right),$$

$$r_j \leq r < r_{j+1}, \quad (3)$$

α 为 2π 位相的延迟系数,适用于所有入射波长而不是专指设计波长,如

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right], \quad (4)$$

n 为材料的折射率,浮雕面型的最大高度为

$$h_{\max}(r) = \frac{p\lambda_0}{n(\lambda_0 - 1)}. \quad (5)$$

衍射透镜的振幅透过函数的傅里叶级数形式为

$$t(r) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp[-i\pi(\alpha p - m)] \times \text{sinc}(\alpha p - m) \exp\left(-\frac{i\pi n r^2}{p\lambda_0 f_0}\right), \quad (6)$$

其中 $\text{sinc}(x) = \text{sinc}(\pi x) / \pi x$ 和 m 表示第 m 级衍射,透过函数 $t(r)$ 代表近轴近似的衍射透镜,而传统折射透镜的透过函数一般表示为

$$t(r) = \exp\left(-\frac{i\pi r^2}{\lambda f}\right), \quad (7)$$

f 为焦距,依赖与透镜材料特性和面形,对比(6)和(7)式,可以得到具有无限多焦距的公式为

$$f_{m,\lambda} = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0. \quad (8)$$

由于衍射作用,此透镜产生色差的有效焦距与波长成反比.与普通的衍射透镜相比较,其环带间光程差为 $p\lambda_0$,相当于设计波长为 $p\lambda_0$,焦距为 f_0 的特殊透镜,这就是 HDE.

如果要求 $f_{m,\lambda}$ 与设计焦距 f_0 重合,即应满足:

$$\lambda m = p\lambda_0. \quad (9)$$

这说明对于 HDE,凡波长满足(9)式的整数 m 所对应的谐振光波均将汇聚到共同的焦点 f_0 处.由于 p 是设计时确定的元件厚度参数,根据红外波段的窗口特性,谐振波长可由(9)式选取,则对于其中 m 级次的谐振波成像,可简单地使用衍射一级透镜公式(10)计算,将(8)式代入(10)式,得到(11)式的 HDE 像距计算.

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}, \quad (10)$$

其中 s_i 和 s_o 分别为像距和物距,

$$s_i(\lambda) = \frac{f s_o}{s_o - f} = \frac{p\lambda_0 f_0 s_o}{m\lambda s_o - p\lambda_0 f_0}. \quad (11)$$

衍射透镜用于成像时,沿光轴方向的像距依赖于波长 λ ,当已知 s_i 和 s_o 时,求出波长 λ ,根据这一

原理可设计在不同谐振波带处同时探测目标的红外多波段超光谱探测仪器.

$$\lambda = \frac{p\lambda_0 f_0}{m} \left(\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} \right). \quad (12)$$

因此,与棱镜或光栅等元件将光线垂直于光轴方向色散的特性不同,HDE 将入射光线沿光轴方向进行色散,同一谐振波段内不同波长的光线会聚于光轴上不同的位置,同一目标不同谐振波段的图像将沿光轴方向分层排列,所有谐振波段的中心波长 $\lambda = p\lambda_0/m$ 均将处于中心 2 的位置,见图 1.将面阵探测器置于光轴的不同位置处,就可获取不同波段的图像.

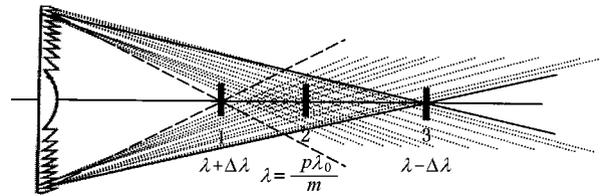


图 1 HDE 色散示意图

3. 具体设计实例与分析

3.1. 谐振波长的选择

根据(9)式,取 $p = 2$, $\lambda_0 = 10\mu\text{m}$ 为中心波长,则谐振波长分别为 $10, 6.7, 5, 4\mu\text{m}$,并分别对应衍射级次 $m = 2, 3, 4, 5$,经过 matlab 数学软件计算了各个谐振波长处的衍射效率,如图 2 所示,从图 2 看到谐振波长为 6.7 和 $5\mu\text{m}$ 中心波长衍射效率所覆盖的带宽恰好不是红外窗口区,所以可不考虑这两个谐振中心波长,而 10 和 $4\mu\text{m}$ 中心波长恰好分别位于热红外和中红外频谱区.所以利用 $m = 2$ 和 5 谐振级次覆盖的衍射效率达 80% 的频谱区作为我们设计的红外系统的波长范围,取 $3.7\text{--}4.3\mu\text{m}$, $8.7\text{--}11.7\mu\text{m}$ 为工作波段.

3.2. 变焦系统的设计

在此红外超光谱成像仪器设计中,谐衍射元件在某个波段处的横向放大率为

$$m_{\text{HDE}}(\lambda) = \frac{s_{i\text{HDE}}(\lambda)}{s_o}, \quad (13)$$

其中 $s_{i\text{HDE}}(\lambda)$ 和 s_o 分别为像距和物距.可看出系统放大率是波长的函数,这将引起不同波长光谱图像

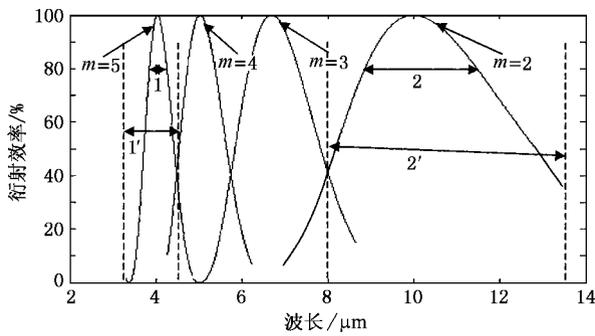


图 2 $p = 2$ 时 HDE 不同级次的衍射效率(对应的谐振波长分别为 4.5 6.7 $10\mu\text{m}$)

像元配准误差,得到不精确的相对光谱信号强度,从而限制了计算机处理图像的精度和准确度.为了弥补这一缺陷,利用光学变焦系统来使系统的放大率基本保持恒定.

根据具体的需要,确定了变焦系统的初始结构,利用光学设计软件(ZEMAX)的计算能力,对这个系统进行优化.特别是注意变焦系统的不动透镜和变倍正透镜及补偿负透镜的轴向移动距离和光波长变化的关系,不能有重叠相交或负距离的产生.另外要留出足够大的后工作距离,以便安放分色片、滤光片、冷光栏.当这个系统设计好后,在变焦系统的后面加入一个分色片,这个分色片具有良好的透热红外波段的光束和反中红外光束的分光能力.系统再加入中红外的波长,使之通过分色片反射成像.系统的像平面前加入孔径滤光片,以消除杂散光和避免冷像的产生.当这个系统工作时,由卡塞格林收集的光束通过校正镜成为平行光,通过变焦系统后,中波

红外和热红外的光束分别在两个像平面上成像,然后再利用 ZEMAX 重新进行优化,使系统在两个波段内很好地消像差.当变焦系统中的运动组元分别在轴上有控制移动时,中波红外和热红外波段中的各波长光线分别同时在这两个像面上成清晰像.然后再通过计算机进行图像重构处理,以消除临近模糊和增强像质,所以此原理可用来同时收集两个波段的红外超光谱信息.

3.3. 红外超光谱变焦系统的具体设计方案

红外系统往往要采用大视场、大相对孔径,这样才能集光能力强和获得高分辨率,如果将透射式物镜直接接收红外热辐射,则由于系统所选用的锗和硒化锌红外材料的折射率较高,界面的反射损失较大,多片组合透镜由于存在反射、吸收、散射损失,使总的透过率不高,因此在变焦系统的光接收前面加上卡塞格林系统.为了消除不同的像差和便于加工,主镜和次镜都采用一般的非球面镜,后面的变焦系统接收到无球差、无彗差、无色差的光束.为此首先设计在零视场情况下,出射光为平行光的卡塞格林系统,并使用标准透镜作了矫正.然后再根据此系统的基本设计参数设计含有三片元件的变焦系统,最后将两部分对接起来合为一个系统.具体的系统参数为:总长为 1170mm,口径为 568mm,视场角为 2° , F 数为 2.6,遮拦比为 0.375.这是一个具有反射、衍射、折射的混合光学系统,如图 3 所示.图 4 给出运动组元的位置随波长的改变而变化的模拟曲线.从图 4 可看到运动组元的移动平滑、无拐点,具有变焦稳像好、结构简单的特点.

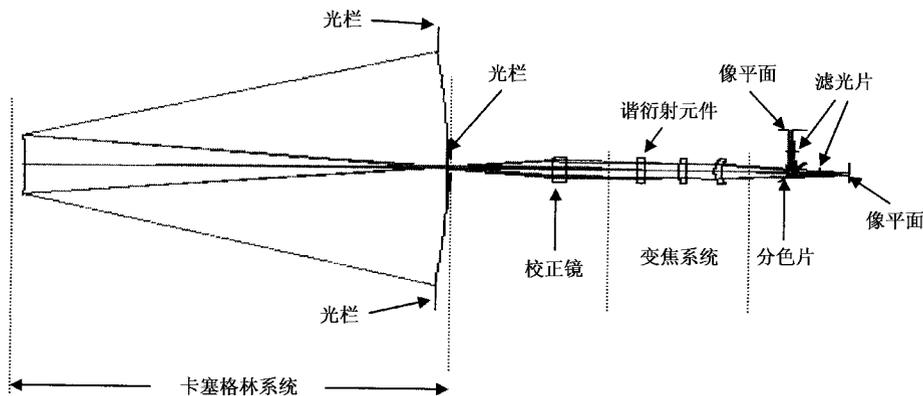


图 3 双波段超光谱光路示意图

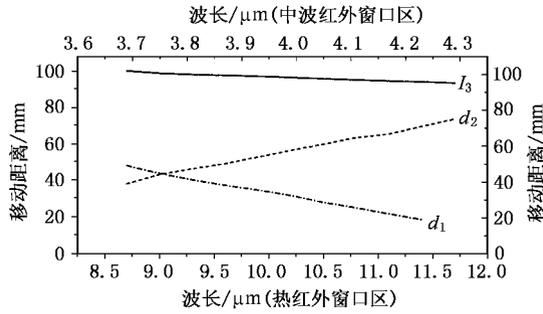


图 4 变焦系统中运动元件随两个波段内波长的变化而移动的曲线 d_1 代表变焦系统中第一片透镜到第二片透镜的距离; d_2 代表第二片透镜到第三片透镜的距离; I_3 代表第三片透镜到像平面的距离

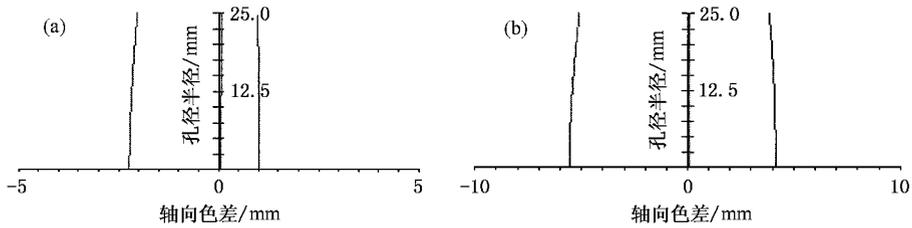


图 5 系统在 3.7—4.3 μm (a) 和 8.7—11.7 μm (b) 波段范围内分别具有的色差宽度

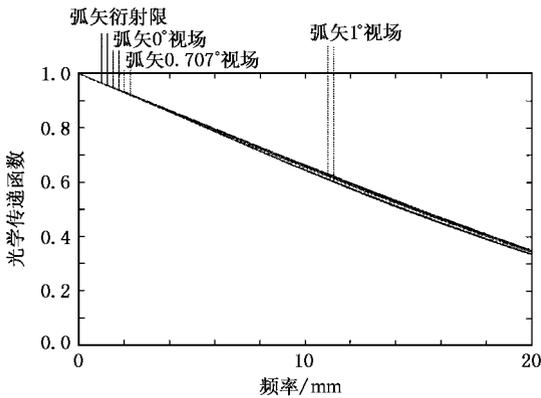


图 6 系统在 4 μm 波长时的传递函数

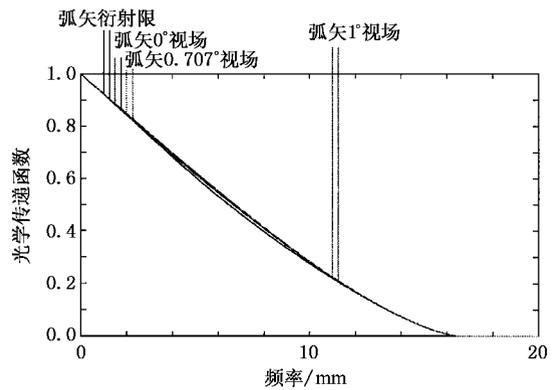


图 7 系统在 10 μm 波长时的传递函数

光学系统在 3.7—4.3 μm 波段具有的色差范围为 3.3mm, 8.7—11.7 μm 波段具有的色差范围为 9.9mm, 如图 5 所示。根据红外焦平面探测器的分辨率精度和变焦系统中的变焦透镜和补偿透镜的机械移动精度,可以在这个色差范围内确定通道数和多光谱的通道宽度。图 6 和图 7 分别为此系统具有代表性系统光学传递函数(MTF)曲线。从这两个图中能看到系统在 4 和 10 μm 波长处 20 线对的 MTF 达到衍射极限,衍射线都偏低,这是由卡塞格林反射镜

存在遮拦比的原因造成的。图 8 给出系统在 3.7—4.3 μm 和 8.7—11.7 μm 波段范围内的波前差与波长的关系曲线,从图 8 能够看出系统在此波段范围内所有的通道的波前差都小于各个通道中心波长的 1/4 倍,小于像质评价“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,此波面可看作无缺陷,也小于整个波段内的波长,且波前差非常小,说明这套系统具有实用性。

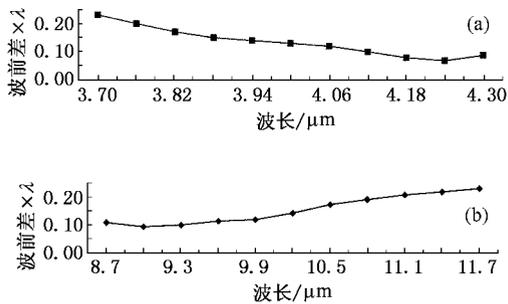


图 8 光学系统在 3.7—4.3 μm (a)和 8.7—11.7 μm (b)波段的波前差与波长的关系曲线

4. 结 论

本文利用谐衍射元件具有分光能力的特性,探

讨了谐衍射元件在红外超光谱探测的应用,阐述了谐衍射元件色散特性的新型红外双波段超光谱成像的基本原理.根据反射镜、HDE、折射透镜的成像特性,以及变焦光学系统的理论,成功地解决了普通超光谱系统的集光能力弱,配准精度差,波段少等缺点,并给出了具有红外双波段探测能力的超光谱设计实例.实例结合卡塞格林系统的折衍混合变焦光学系统.设计结果表明,此系统提高了图像的分辨率,增大了接收光能量的能力,特别是增加了红外光谱接收的窗口数量,降低了对材料的要求,保证了红外焦平面凝视阵列探测器的配准精度和探测精度,有利于不同地区和各种气候条件下的探测,便于实现高精度的精密探测.结构设计简单,片数少,光能接收率高,具有很好的消像差特性,为红外超光谱探测探索了一条新路.

- [1] Porter W M and Enmark H T 1987 *Proc. SPIE* **834** 166
 [2] Donald E and Rockey J P L 1990 *Proc. SPIE* **1298** 93
 [3] Dozier J D 1988 *Proc. SPIE* **924** 23
 [4] Charles L *et al* 1993 *Proc. SPIE* **1937** 191
 [5] Li Y J, Yang J L and Zhang J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 863 in

Chinese] 李英骏、杨建伦、张 杰 2000 物理学报 **49** 863]

- [6] Lyons D 1995 *Proc. SPIE* **2480** 123
 [7] Donald W *et al* 1995 *Appl Opt.* **34** 2469
 [8] Faklis D *et al* 1995 *Appl Opt.* **34** 2462

Study on hyperspectral detection system with the harmonic diffractive element in infrared dual-band^{*}

Sun Qiang^{1,2)} Yu Bin¹⁾ Wang Zhao-Qi²⁾ Mu Guo-Guang²⁾ Lu Zhen-Wu¹⁾

¹⁾*State Key Laboratory of Applied Optics , Changchun Institute of Optics ,*

Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022 , China)

²⁾*Institute of Modern Optics , Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology ,*

Ministry of Education of China , Nankai University , Tianjin 300071 , China)

(Received 13 May 2003 ; revised manuscript received 23 June 2003)

Abstract

In this paper , the application of harmonic diffractive element(HDE) in the infrared hyperspectral detection system is investigated based on the special large dispersion capability of HDE and window character of infrared bands. The fundamental principle of the new infrared hyperspectral imaging is described , and a design sample is presented. It is shown that the resolution is improved and the optical power received is enlarged. The rectification of the ray aberrations in both band has been simultaneously accomplished. Wave front aberrations are less than 1/4 wavelength ,and the modulation transfer function of the dual-band in every zoom focus location approaches or attains the diffraction limit of 20 cycles/mm.

Keywords : harmonic diffractive element , hyperspectral detection , optical design

PACC : 4225F , 0765 , 4215E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60277021) ,and the Foundation of State Key Laboratory of Applied Optics , Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences(Grant No. DA01Q02D).