

二元光学双波段红外成像光谱仪*

于斌^{1,2} 彭翔^{1,2} 牛憨笨²

(1 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

(2 深圳大学光电子学研究所光电子器件与系统教育部重点实验室,深圳 518060)

摘要 根据红外辐射的大气窗口特性、二元光学元件特殊的色散特性和多级衍射特性,提出了利用二元光学透镜的新型中波和长波红外双波段成像光谱技术,从理论上阐述了二元光学双波段红外成像光谱仪的基本原理和设计方法,实际例子证明了设计的可行性,利用此方法可研制轻型、价格低廉的双波段红外成像光谱仪。

关键词 应用光学;成像光谱仪;二元光学元件;双波段;红外成像

中图分类号 O436.1;O439

文献标识码 A

0 引言

在太阳反射光谱波段(0.4~2.5 μm),成像光谱技术已相当成熟^[1-5],但在中波红外MWIR(3~5 μm)和长波红外LWIR(8~13 μm)波段,还相对比较落后,其主要原因是这一波段辐射强度较弱,固态成像器件昂贵,红外成像与色散系统昂贵。但对红外遥感和精密制导技术的应用来说,这两个红外波段的成像光谱探测具有非常重要的意义,而且单一波段的红外成像光谱技术已不能满足探测准确度需求^[6],根据目标和背景的辐射和反射特性,对红外光谱中的中波和长波波段的辐射进行同时探测已显得非常重要,因而国际上提出了双波段成像系统的研究^[7-9]。双波段红外成像光谱技术能在存在杂乱回波的情况下探测目标,区分目标和诱饵,并能使采取的诸如施放烟雾、伪装以及发射照明弹之类的红外对抗措施失效。由于采用两个通道,且来自不同的电磁波段区,所含的目标背景的信息量增加一倍,同时采用融合技术,提高了成像系统探测、识别目标的能力。因此,双波段成像光谱技术的研究对军事领域和民用技术发展均有重大意义。

最近出现的利用二元光学元件的红外成像光谱技术^[10-13]采用二元光学透镜同时完成色散和成像,通过简单的光学设计就可获得红外波段的超光谱图像,它具有光学系统简单、价格低廉、重量轻,便于实现小型化和轻量化等优点,是一种具有发展潜力的新型成像光谱技术。本文通过对二元光学透镜的色散特性的分析,讨论了二元光学透镜在红外双波段成像光谱技术中的应用,从理论上阐述了利用二元光学元件的新型红外双波段成像光谱仪的基本原理和设计方法,希望对二元光学红外双波段成像光谱

仪研制开发及应用有所裨益。

1 二元光学成像光谱仪的基本原理

在二元光学成像光谱仪中,二元光学衍射透镜同普通透镜一样会聚入射光线,但它不是根据折射,而是衍射原理。由于衍射作用透镜产生色差的有效焦距同波长成反比^[10]

$$f(\lambda) = (\lambda_0/m\lambda)f_0 \quad (1)$$

式中: f_0 是设计波长 λ_0 的焦距, m 是衍射级次(一般取 $m=1$)。

将这种波长依赖关系代入衍射一级透镜公式,则

$$(1/s_o) + (1/s_i) = 1/f \quad (2)$$

$$s_i(\lambda) = \frac{fs_o}{s_o - f} = \frac{\lambda_0 f_0 s_o}{\lambda s_o - \lambda_0 f_0} \quad (3)$$

式中: s_i 和 s_o 分别为像距和物距。

衍射一级透镜公式用于衍射透镜时,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出光谱仪。

$$\lambda = \lambda_0 f_0 [(1/s_o) + (1/s_i)] \quad (4)$$

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,二元光学透镜将入射光线沿光轴方向进行色散(图1),不同波长的光会聚于光轴上不同的位置,同一目标的不同波段的图像将沿光轴方向分层排列,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。

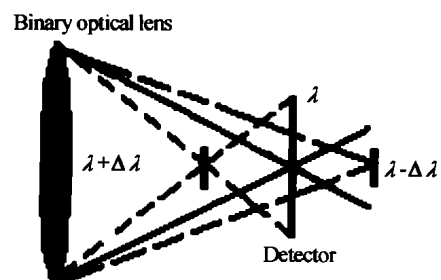


图1 二元光学成像光谱仪概念图

Fig. 1 Concept of the binary optical Imaging spectrometer

图2表示该系统的结构. 探测器 CCD 元件固定, 二元光学透镜沿光轴方向扫描, 就可获得不同波段的光谱图像, 同 CCD 摄像机相联的电子学系统、计算机等, 用于事后图像处理和显示.

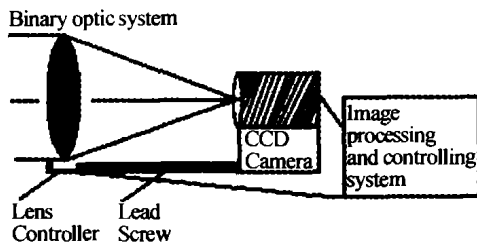


图2 二元光学超光谱成像仪结构

Fig.2 The schematic diagram of binary optic hyperspectral imager

2 红外双波段成像光谱系统设计

二元光学透镜是一种衍射光学元件, 而衍射元件的衍射效率是一个非常重要的指标, 它的高低决定着二元光学透镜能否被应用到成像光谱系统中. 由于衍射元件在偏离中心波长时将导致衍射效率的下降, 衍射元件应用的波段宽度将受到这个因素的限制. 对于连续的衍射面, m 级衍射光的衍射效率与波长的关系为^[14]

$$\eta_m(\lambda) = \text{sinc}^2(\lambda_0/\lambda - m) \quad (5)$$

式中: m 为衍射级次.

对于中波红外和长波红外, 我们取主设计波长 λ_0 为 $7.5 \mu\text{m}$, 这时两个波段的衍射效率如图3所示. 在长波红外对应的一级衍射在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 范围内衍射效率都大于 50%, 在中波红外对应的二级衍射在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 范围内衍射效率都大于 40%.

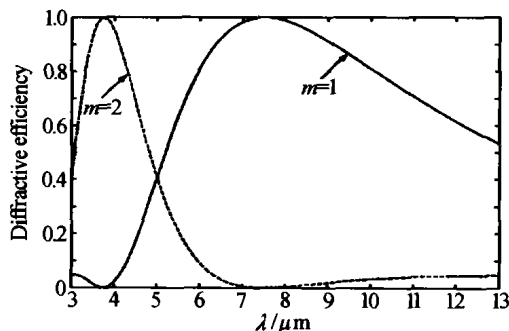


图3 长波红外一级和中波红外二级衍射效率

Fig.3 Diffraction efficiency for the first in the LWIR region and the second order in the MWIR region

由上述衍射效率和式(1)可知, 当用二元光学透镜观测宽波段的目标辐射时, 不同级次的像平面相互重合, 这对于单波段成像光谱仪是非常不利的, 但从图3可知, 当主设计波长工作在一级衍射时, 中波红外波段的二级衍射和长波红外的一级衍射正好都处于衍射极大, 我们可利用这一效应来设计双波段成像光谱仪.

对于长波红外, 二元光学透镜工作在一级衍射,

而在中波红外区, 二元光学透镜工作在二级衍射, 这样可用一个红外双波段探测器^[6], 同时获得两个波段的光谱图像, 然后利用光学切片显微技术中的去卷积图像处理技术^[15]滤除每个波段中其它相邻波段杂光模糊的影响, 就可获得目标场景的光谱图像数据立方, 这样就拓宽了二元光学透镜在红外波段的应用, 具有非常重要的意义.

3 设计实例

根据上述分析, 考虑到实验加工条件, 二元光学双波段成像光谱仪结构参数如下: 光谱范围, 长波红外 $8 \sim 13 \mu\text{m}$; 中波红外 $3 \sim 5 \mu\text{m}$; 主设计波长 λ_0 : $7.5 \mu\text{m}$; 设计焦距 f_0 : 111 mm ; 入瞳直径为 42 mm , $F_\#$ 数为 2.6. 根据式(1)可求出在二元光学透镜在不同波段, 不同级次时焦距的变化.

从表1中可看出, 在中波红外 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 轴向焦距变化大约有 56 mm , 在长波红外 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 光谱范围内, 轴向焦距变化大约有 40 mm , 可

表1 二元光学透镜的焦距

$\lambda_1/\mu\text{m}$	$\lambda_2/\mu\text{m}$	f/mm
6	3	138.8
6.5	3.25	128.1
7	3.5	118.9
7.5	3.75	111
8	4	104.1
8.5	4.25	97.9
9	4.5	92.5
9.5	4.75	87.6
10	5	83.3
10.5	5.25	79.3
11	5.5	75.4
11.5	5.75	72.4
12	6	69.4
12.5	6.25	66.6
13	6.5	64.0

以满足成像光谱仪波段的需要. 根据上述参数, 由衍射透镜的波带数和最小周期公式^[16]

$$N = (f_0/8F_\#^2\lambda_0) \quad (6)$$

$$T = 2\lambda_0F_\# \quad (7)$$

可知衍射透镜的最小周期大约 $39 \mu\text{m}$, 波带数 274 个, 在试验室现有条件下, 能够加工此二元光学衍射透镜系统.

4 结论

本文从军事目标红外探测的基本原理出发, 利用二元光学元件色差大的特性, 探讨了二元光学元件在红外双波段成像光谱中的应用前景, 从理论上给出了基本的设计原理和方法, 并用具体的实例验证了这一方法的可行性, 这将对二元光学双波段成

像光谱仪的研制具有一定的实际意义和价值.

参考文献

- Porter W M, Enmark H T. A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *SPIE*, 1987, **834**:166 ~ 174
- Rokey D E, JPL. High resolution imaging spectrometer (HIRIS) a major advance in imaging spectrometry. *SPIE*, 1990, **1298**:93 ~ 104
- Dozier J. HIRIS-The high resolution imaging spectrometer. *SPIE*, 1988, **924**:23 ~ 30
- Bennett C L, Carter M, et al. Imaging fourier-transform spectrometers. *SPIE*, 1993, **1937**:191 ~ 200
- 刘良云, 杨建峰, 相里斌, 等. 层析型线阵推扫成像光谱技术及其仿真研究. *光子学报*, 2000, **29**(1):58 ~ 62
Liu L Y, Yang J F, Xiangli B, et al. Computed-tomographic pushbroom imaging spectrometer with a linear ccd and its simulated experiment. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(1): 58 ~ 62
- 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术. 北京: 国防工业出版社, 1998. 286 ~ 300
Wu Z F, Liu M L, Zhang S J, et al. Infrared and glimmer technology. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 286 ~ 300
- Ritter G X, Wilson J N, Davidson J L. Data compression of multispectral images. *SPIE*, 1987, **829**:58 ~ 64
- Jiang H, Qian Y, Rhee K T. High-speed dual spectra infrared imaging. *Optical Engineering*, 1993, **32**(6): 1281 ~ 1283
- Pratt W K. Correlation techniques of image registration. *IEEE Tran on Aero and Electronic System*, 1974, **10**(3):353 ~ 358
- Lyons D. Image spectrometry with a diffractive optic. *SPIE*, 1995, **2480**:123 ~ 131
- Hinnrichs M, Massie M. New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics. *SPIE*, 1997, **3118**:194 ~ 205
- 于斌, 禹秉熙. 放大率恒定的二元光学超光谱成像仪光学系统设计. *光学学报*, 2002, **22**(11):1382 ~ 1386
Yu B, Yu B X. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11):1382 ~ 1386
- 于斌, 李宏升, 禹秉熙, 等. 二元光学超光谱成像仪分光系统设计. *光学技术*, 2003, **29**(1):73 ~ 75
Yu B, Li H S, Yu B X, et al. *Optical Technique*, 2003, **29**(1):73 ~ 75
- Buralli D A, Morris G M, Rogers J R. Optical performance of holographic kinoforms. *Applied Optics*, 1989, **28**(5):976 ~ 983
- Castleman K R. Digital image processing. Prentice hall. 1996. 563 ~ 575
- 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学. 北京: 国防工业出版社, 1998. 94
Jin G F, Yan Y B, Wu M X, et al. Binary optics. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 94

Binary Optic Dual-band Infrared Imaging Spectrometer

Yu Bin^{1,2}, Peng Xiang^{1,2}, Niu Hanben²

¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072

² Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education, Shenzhen 518060

Received date:2004-06-15

Abstract On the basis of the characteristics of the infrared radiation and binary optical elements, a novel binary optic dual-band infrared imaging spectrometer is described. The design methodology is presented and theoretical formulas are established. A practical example proves proposed method valid and feasible. It shows that the method is useful in designing compact, economical, lightweight dual-band infrared imaging spectrometer.

Keywords Applied optics; Imaging spectrometer; Binary optical elements; Dual-band; IR imaging

Yu Bin was born in 1976. He received the Ph. D. degrees in optics from Changchun Institute of optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2003. He is presently a post-doctoral fellow at the Institute of Optoelectronics, Shenzhen University. His research interests include imaging spectrometer, optical information processing, optical encryption, 3D digital imaging.