

文章编号 : 0253-2239(2002)11-1382-05

# 放大率恒定的二元光学超光谱成像仪光学系统设计

于 斌 禹秉熙

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学部, 长春 130022)

摘要: 二元光学元件具有多种应用。用作透镜, 在原理上色差非常大, 若不在设计上做出补偿, 则会限制其在宽波段上的使用。从理论上简单阐述了利用具有独特色散特性的二元光学元件的新型超光谱成像仪的基本原理和应用前景。在此超光谱成像仪中, 二元光学透镜焦距随波长的变化改变了系统的  $F$  数, 因此改变了系统的放大率, 即系统放大率是波长的函数, 这将引起光谱图像的像元配准误差, 得到并不精确的相对光谱信号强度, 从而限制了光谱图像重建算法的精度, 为了补偿这一缺点, 通过光学二组元法设计的变焦系统成功地解决了这一问题, 并给出了理论设计公式。

关键词: 超光谱成像; 二元光学元件; 成像光谱仪; 变焦透镜; 光学二组元

中图分类号: O436: O435.2 文献标识码: A

## 1 引 言

20 世纪 80 年代, 遥感技术的重要成就之一是超光谱遥感技术的兴起, 它是遥感技术的重要进步和发展。成像光谱仪亦称为超光谱成像仪, 它能够在波长相邻、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多光谱图像数据, 可以根据地球表面众多物体的光谱特征识别它们, 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它技术手段无可比拟的优势。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, 它们中的一些已在实际系统中得到应用<sup>[1-5]</sup>。美国光子中心罗姆实验室的 Lyons<sup>[6]</sup>在 1995 年 4 月国际光学工程学会上, 提出一种新颖结构, 利用二元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。此光谱仪光学系统简单, 体积小、重量轻、坚固耐用、价格低廉, 便于实现小型化和轻量化。在二元光学超光谱成像仪中, 二元光学透镜既是分光元件又是成像元件, 二元光学透镜的焦距随波长变化改变了系统的  $F$  数, 因此改变了系统的放大率, 即系统放大率是波长的函数, 这将引起光谱图像的像元配准误差, 得到并不精确的相对光谱信

号强度。为了补偿成像过程中这一缺点, 本文通过光学二组元法设计的简单的变焦系统从理论上解决了这一问题, 并给出了设计公式, 以期待对二元光学超光谱成像仪的研制开发及应用有所裨益。

## 2 二元光学超光谱成像仪的基本原理

二元光学超光谱成像仪是一种沿光轴方向色散的仪器, 它采用了 PAT 公司发明并取得专利的创新技术<sup>[7]</sup>——成像多光谱检测 (IMSS)。二元光学超光谱成像仪使用单一的二元光学衍射透镜同时完成成像和色散功能, 其基本概念如图 1 所示。在图中, 比较了二元光学超光谱成像仪和普通单色仪。在一台普通 (常规) 单色仪中, 基本的元件是入射狭缝、出射狭缝, 色散介质 (棱镜或光栅)。为了得到高分辨率图像, 入射狭缝和出射狭缝都必须很窄, 这样就缩减了系统的光通量。普通单色仪将光线垂直于光轴方向色散, 因此可通过狭缝沿光线色散方向扫描来获取光谱图像。

在二元光学超光谱成像方法中, 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<sup>[7]</sup>:

$$f(\lambda) = \frac{\lambda_0}{\lambda} f_0, \quad (1)$$

式中,  $f_0$  是设计波长  $\lambda_0$  的焦距。

将这种波长依赖关系代入衍射一级透镜公式则有

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

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

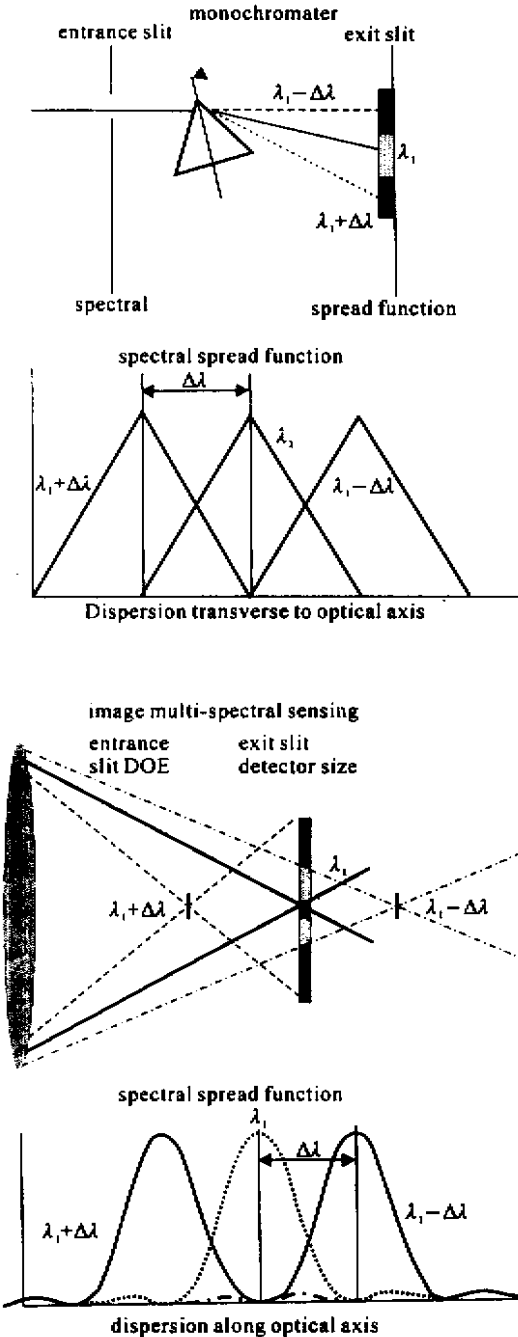


Fig.1 The concept for the IMSS Imaging spectrometer compared with a monochromator

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 $\lambda$ ,当已知 $s_i$ 和 $s_o$ 时,求出波长 $\lambda$ 。根据这一原理可设计出光谱仪。

$$\lambda = \lambda_0 f_0 \left( \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} \right), \quad (4)$$

式中 $s_i$ 和 $s_o$ 分别为像距和物距。

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2表示该系统的结构示意图。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。除图2表示的部分系统外,还有同阵列探测器相联的电子学系统、计算机等,用于事后图像处理和显示。

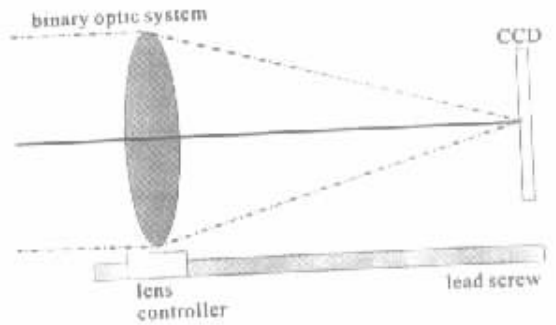


Fig.2 Binary optic image spectrometer basic scenario

### 3 超光谱成像仪中放大率补偿光学系统设计

在二元光学超光谱成像仪中,当只含有单一二元光学元件时,光学系统的横向放大率

$$m_{\text{doe}}(\lambda) = \frac{s_{\text{idoe}}}{s_o}, \quad (5)$$

式中 $s_{\text{idoe}}(\lambda)$ 和 $s_o$ 分别为像距和物距。

从上式中,我们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,从而限制了图像重建算法的精度。

为了弥补这一缺陷,本文讨论利用光学二组元法设计的变焦系统来使系统的放大率保持恒定<sup>[8]</sup>。将变焦系统划分为由二个光学组元组成,而光学组元又由薄透镜组构成。通过求解独立的光学组元,就能计算出两个光学组元主平面位置和调整距离,即可求解出整个变焦系统。

#### 3.1 基本计算公式

本文所述公式将用到以下符号(见图3):

1)  $u$  和  $u'$  分别是物方孔径角和像方孔径角。由

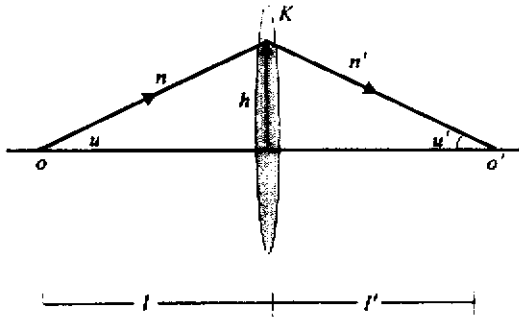


Fig.3 The sign rules of imaging by a single lens

光轴以锐角方向转向法线,顺时针规定为正,逆时针规定为负。

2) \$l\$ 是物方主平面到物的距离, \$l'\$ 是像方主平面到像的距离。对薄透镜组,可认为物方主平面和像方主平面重合。符号规定为:由物方(像方)主平面到物(像),自左至右为正,反之为负。

3) \$h\$ 为近轴光线的投射高。以光轴为基准,在光轴之上为正,光轴之下为负。

4) \$n\$ 和 \$n'\$ 分别为物方和像方的折射率。

5) \$F\$ 和 \$K\$ 分别为系统的焦距和光焦度(\$K = 1/F\$)。

6) \$H\$ 和 \$H'\$ 分别为光学组元的物方主点和像方主点。

对理想光学系统(认为是薄透镜组构成),大多数情况下,光学系统位于同一介质中(例如在空气中),当物像空间的介质折射率相同时,有

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = K \quad \text{or} \quad u' - u = hK, \quad (6)$$

横向放大率 \$M\$ 定义为

$$M = \frac{l'}{l} = \frac{u}{u'}. \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式有

$$l = \left(\frac{1}{M} - 1\right)F. \quad l' = (1 - M)F.$$

物像之间的距离为

$$T = l' + (-l) = (2 - M - 1/M)F. \quad (8)$$

### 3.2 放大率恒定的二元光学成像光谱系统的光学设计

由三片透镜构成的变焦系统,同样将其认为是光学二组元系统,第一光学组元由一片透镜组成,另一光学组元由二片透镜组成。在二元光学成像光谱仪中,光学系统可看作由三片透镜构成的变焦系统,二元光学透镜作为固定组,并认为它是光学二组元系统中的第一组元。第二透镜与第三透镜组合成为第二光学组元,组合放大率为 \$M\_{23}\$,物与像的距离为

\$T\_{23}\$, 焦距为 \$F\_{23}\$, 光焦度为 \$K\_{23}\$、物方主平面与像方主平面的间隔为 \$\Delta\$, 物距和像距分别是 \$l\_H\$、\$l'\_H\$。\$\delta\$ (\$\delta'\$) 是第二透镜与第三透镜组元中第一个透镜(第二个透镜)到物方主点(像方主点)的距离。如图4,对物在无穷远时,同上述相似,可以推出以下公式:

$$T_{23} = (2 - M_2 - 1/M_2)F_2 + (2 - M_3 - 1/M_3)F_3 + (2 - M_{23} - 1/M_{23})F_{23} + \Delta, \quad (9)$$

$$\delta = K_3 d_2 / K_{23}, \quad (10)$$

$$\delta' = -K_2 d_2 / K_{23}, \quad (11)$$

$$\Delta = d_2 + \delta' - \delta = -K_2 K_3 d_2^2 / K_{23}, \quad (12)$$

$$D_1 = d_1 + \delta = l'_1 - l_H, \quad (13)$$

$$l_H = (1/M_{23} - 1)F_{23} = l'_1 - D_1, \quad (14)$$

$$l'_H = (1 - M_{23})F_{23} = l'_3 - \delta', \quad (15)$$

$$K = K_1 + K_{23} - D_1 K_1 K_{23}, \quad (16)$$

$$F = F_1 M_{23}. \quad (17)$$

\$T\_{23}\$ 是由初始结构决定的常数。将(12)式代入(9)式得

$$T_{23} = (2 - M_{23} - 1/M_{23})F_{23} - K_2 K_3 d_2^2 / K_{23}, \quad (18)$$

$$K_{23} = K_2 + K_3 - d_2 K_2 K_3. \quad (19)$$

在变焦过程中, \$M\_{23}\$ 随之变化,则由(18)式求解 \$d\_2\$ 得

$$d_2 = \frac{-b \pm (b^2 - 4ac)^{1/2}}{2a}, \quad (20)$$

其中

$$a = K_2 K_3,$$

$$b = -T_{23} K_2 K_3,$$

$$c = T_{23}(K_2 + K_3) - (2 - M_{23} - 1/M_{23}).$$

以上各式中, \$l'\_1\$、\$l'\_2\$、\$l'\_3\$ 分别是薄透镜1、2、3的像方主平面到像的距离; \$M\_1\$、\$M\_2\$、\$M\_3\$ 分别是薄透

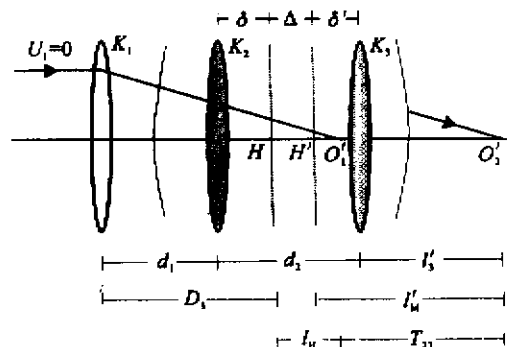


Fig.4 A three-component zoom system operating at infinite conjugates

镜 1、2、3 的横向放大率； $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别是薄透镜 1、2、3 的光焦度。

从 (13) 式、(14) 式、(15) 式，可以计算出变焦系统的  $D_1$ 、 $d_1$ 、 $l'_3$  和其他一些基本参量。

当物是有限距离时，因第一透镜在变焦系统中作为固定组， $M_1$  保持不变，则 (17) 式演变为  $M = M_1 M_{23}$ 。在变焦过程中  $M_{23}$  随之变化，由  $M_{23}$ 、 $M_1$  可很方便地计算出  $M$ 。用 (19) 式、(20) 式及其他一些相关公式可计算出整个变焦系统的其余参量。

对于二元光学超光谱成像仪，衍射透镜作为第一固定组，并认为它是光学二组元系统中的第一组元。第二透镜与第三透镜组合成为第二光学组元。设计系统的横向放大率  $M$  为常数，系统机械筒长即  $d_1 + d_2 + l'_3$  为常数，衍射透镜的横向放大率

$$M_1 = m_{\text{doc}}(\lambda) = \frac{s_{\text{idoc}}(\lambda)}{s_0}$$

为波长的函数，而  $M_{23} = M/M_1$  也是波长的函数，因此根据上述公式可求出对于不同波长  $\lambda$  时的  $M_{23}$ ，代入 (20) 式及其他一些相关公式，可求出  $d_1$  和  $d_2$ ，即透镜 2 和透镜 3 处于不同位置时，探测器 CCD 获得的是不同波长的光谱图像。

## 4 设计实例

为了验证上述方法的合理性，利用计算机模拟计算了变焦系统的位置参量。二元光学透镜设计波长  $\lambda$  为 588 nm，焦距  $F_0 = 200$  mm，透镜 2 为双凹透镜，焦距为  $F_2 = -150$  mm，透镜 3 为双凸透镜，焦距  $F_3 = 100$  mm，系统筒长为 300 mm，目标距离为 1.7 m，系统的总放大率  $M$  为 0.1，将这些数据代入上述公式可求出不同波长对应的  $d_1$ 、 $d_2$  和  $l'_3$ ，如表 1 所示。

Table 1. The distances between lenses at various wavelengths

$\lambda$ /nm	$d_1$ /mm	$d_2$ /mm	$l'_3$ /mm
400	119.48	53.10	127.42
450	118.19	66.90	114.90
500	111.13	83.95	104.91
550	100.62	102.18	97.20
588	91.75	115.79	92.46
600	88.91	119.97	91.11
650	77.31	136.59	86.10

因此，透镜 2 和 3 在不同位置进行扫描，CCD 可获得不同波长的光谱图像。

图 5 为改进后的二元光学超光谱成像仪简单结构示意图。从中我们可看出，在二元光学透镜系统之后，放置一个变焦系统，可使系统的整体放大率保持恒定，解决了放大率随波长变化的问题。

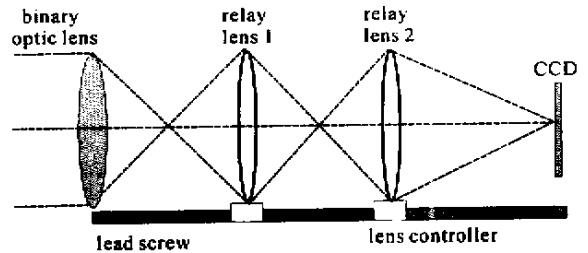


Fig. 5 A schematic of binary optic hyperspectral imager with constant magnification

结论 本文研究了二元光学超光谱成像仪中放大率补偿光学系统的设计。论述了利用光学二组元法设计的变焦系统，解决了光谱仪中放大率随波长改变的缺点，并从理论上验证了这一方法的可行性，这将对二元光学超光谱成像仪的研制具有一定的实际意义。

## 参 考 文 献

- [1] Porter W M, Enmark H T. A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Proc. SPIE*, 1987, **834**:166~174
- [2] Rockey D E. High resolution imaging spectrometer (HIRIS) a major advance in imaging spectrometry. *Proc. SPIE*, 1990, **1298**:93~104
- [3] Dozier J. HIRIS-the high resolution imaging spectromete. *Proc. SPIE*, 1988, **924**:23~30
- [4] Bennett C L, Carter M, Fields D J *et al.*. Imaging Fourier-transform spectrometers. *Proc. SPIE*, 1993, **1937**:191~200
- [5] Liu Lliangyun, Xiang Libin, Yang Jianfeng *et al.*. Simulation study of computed-tomography imaging spectrometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(6):805~809 (in Chinese)
- [6] Lyons D. Image spectrometry with a diffractive optic. *Proc. SPIE*, 1995, **2480**:123~131
- [7] Hinrichs M, Massie M. New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics. *Proc. SPIE*, 1997, **3118**:194~205
- [8] Li Jidong. Design zoom system by means of optical bi-component. *Yunguang Technology* (云光技术), 1997, **29**(1):26~34 (in Chinese)

## Optical Design for Binary Optic Hyperspectral Imager with Constant Magnification

Yu Bin Yu Bingxi

( *Department of Space Optics , Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics ,  
The Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022* )

( Received 22 October 2001 ; revised 28 January 2002 )

**Abstract :** Binary optical elements have many applications. One of the principal limitations of these lenses is abundant chromatic aberration that prohibits broadband use without design compensation. A novel configuration is presented that exploits this typically unwanted effect to create a hyperspectral imager. Diffractive lens' focal length is inversely proportional to wavelength. The change in the focal length changes the  $F$ -number of the system and therefore the magnification changes as a function of wavelength. The magnification is different for each wavelength in the recorded spectra , which creates image registration error , and provides inaccurate relative spectral signal strength. In result , the precision of object image reconstruction algorithms is restricted. To compensate for this shortcoming , the optical system with a zoom lens is designed by means of optical two-component . The problem is solved successfully in theory . The theoretical formulas are provided .

**Key words :** hyperspectral imager ; binary optical elements ; imaging spectrometer ; zoom lens ; optical two-component