

一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪结构研究

刘 洋¹ 廖宁放² 白廷柱^{1,2} 吕 航² 廉玉生²

(¹ 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)
² 北京理工大学光电学院颜色科学国家重点学科实验室, 北京 100081)

摘要 根据刑侦、物证等领域的应用要求,研制了一种工作波段为254~380 nm的大孔径傅里叶变换成像光谱仪。该系统采用具有高光通量的时间-空间调制型结构以解决现有系统能量不足的问题。系统采用像平面式干涉仪与全反射式Offner成像镜相配合的方案,可实现干涉图上光程差近似线性分布。其在紫外波段最大可获得光程差与空间调制型干涉结构相同,理论最大波数分辨率为 80 cm^{-1} 。系统前置物镜、分光立方体为熔石英材质,成像镜为全反射系统,在全工作波段内具有较高透射率。实验结果表明,系统可获取工作波段短波段附近的原始干涉图,能正确采集及重构目标的紫外波段光谱数据立方体;在使用汞灯照明时,可正确识别365 nm处发射峰。

关键词 光谱学;成像光谱仪;傅里叶变换;紫外

中图分类号 TH744 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0330001

Study of the Structure of Large Aperture Ultraviolet Fourier Transform Imaging Spectrometer

Liu Yang¹ Liao Ningfang² Bai Tingzhu^{1,2} Lü Hang² Lian Yusheng²

¹ Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

² National Laboratory of Color Science and Engineering, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract According to the application requirements of criminal investigation and material evidence, a kind of large aperture ultraviolet (UV) Fourier transform imaging spectrometer is developed which works in the wavelength range of 254~380 nm. The time-spatial modulated structure with high flux is used for the prototype to overcome the problem of insufficient energy in existing systems. The prototype uses image plane interferometer combined with Offner imaging lens to achieve approximately linear distribution of optical path difference (OPD) on raw interferogram. The maximum OPD can be achieved as large as the spatial modulated interferometers in UV band, and the maximum resolution of wavenumber is 80 cm^{-1} in theory. As the front objective lens and the UV beam splitting cube are made of fused silica and the imaging lens is catoptric, the transmittance is high in the whole working waveband. The experimental result shows that the raw interference pattern can be taken by the prototype on the short wave end. The spectral image data cube can also be taken and rebuilt correctly. The prototype can identify the emission peak at 365 nm when the mercury lamp is used as the illuminator.

Key words spectroscopy; imaging spectrometer; Fourier transform; ultraviolet

OCIS codes 300.6190; 300.6300; 300.6540

1 引 言

紫外(UV)成像光谱技术不仅可以获取可见光

难以发现的紫外图像信息,还可通过目标的光谱信息确定目标物质种类,在刑侦、物证等领域有着广阔

收稿日期: 2013-09-02; 收到修改稿日期: 2013-10-25

基金项目: 公安部重点研究计划(2010ZDYJBJLG006)、国家科技支撑计划(2012BAK02B04)

作者简介: 刘 洋(1982—),男,博士研究生,主要从事光谱仪器结构与数据处理方面的研究。

E-mail: 10801040@bit.edu.cn

导师简介: 白廷柱(1955—),男,博士,教授,主要从事光电成像及信息工程等方面的研究。E-mail: tzhbai@bit.edu.cn
(中国光学学会会员号: 1000073)

的应用前景,目前已经成为该领域国际前沿性关键技术^[1-2]。

紫外成像光谱仪主要应用于空间遥感领域,多采用光栅色散式结构^[3-4]。该结构需使用狭缝限制视场,光通量较小,在地面环境应用时会因大气对紫外辐射的吸收及散射导致目标能量较弱,无法获得足够的信噪比。因此在地面环境应用的此类型仪器多采用具有较高光通量的声光调制滤光器(AOMF)结构^[5]及基于迈克耳孙干涉仪的时间调制型结构。前者具有结构简单、光通量大、采集速度快的优点,但其透过波段受限,光谱分辨率较低;后者具有较高的空间及光谱分辨率,但需超高精度运动伺服系统,环境适应能力差。由此可知,现有紫外成像光谱系统无法满足刑侦、物证鉴定等地面应用领域的需求,需研制一种具有较高空间及光谱分辨率、高光通量及较强环境适应能力的紫外成像光谱仪。

本文通过采用大通光孔径、干涉过程静态的时间-空间调制型干涉结构来获得较高的光通量、较高的空间与光谱分辨率及较好的环境适应能力,提出并验证了一种可用于物证鉴定等领域的紫外波段傅里叶变换成像光谱仪结构。

2 时间-空间调制型干涉结构原理

时间-空间调制型干涉结构于 20 世纪 90 年代被提出,其原理相当于将目标的光谱维信息在空间维展开,并由图像传感器分时探测。其光学结构与空间调制型类似,但取消了视场限制狭缝,从而使目标图像被其自相关函数调制,干涉图呈现为受干涉条纹调制的目标图像。图像传感器每次采集的图像为包含所有通道信息的调制全色图,其经时间积累后可得到完整的干涉图,因此也被称为成像光谱领域中的时间延迟积分(TDI)技术。

时间-空间调制型干涉结构从光程差产生的方式可分为像平面式^[6-7][如高通量成像傅里叶变换光谱仪(HEIFTS)]及横向剪切式^[8-10][如断层高光谱遥感成像傅里叶变换干涉仪(THRIFTI)、大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS)等]。两者的理论最大光程差均可表示为

$$\delta_{\max} = \omega \times \lambda / 2, \quad (1)$$

式中 λ 为工作波段的短波端波长, ω 为 CCD 干涉维像素数。由(1)式可知,当工作波段及探测器干涉维像素数相同时,两者的理论最大光程差相同。但在实际应用时,像平面式干涉结构的最大光程差还受到系统最大离焦量的限制,在波长较长的系统中(如

可见光、红外波段)难以达到理论最大值,因此在应用中以后者为主。但在本系统的工作波段(254~380 nm)中应用时,像平面式干涉结构与后者相比具有以下特点:1)其最大可获得光程差与横向剪切式结构基本相当。本系统中 $\omega=1024$, $\lambda=254$ nm,将以上参数代入(1)式可得本系统的理论最大光程差 $\delta_{\max}=130$ μm 。该值小于常用光学系统的最大允许离焦量,因此在此波段两种结构都可以达到理论最大光程差。2)像平面式干涉结构无需使用傅里叶镜。横向剪切式干涉结构需使用傅里叶成像镜以保证干涉图光程差线性分布,目前常使用普通成像镜代替以简化系统,但会使干涉图上光程差呈非线性分布,影响光谱精度,而像平面式干涉结构无需使用傅里叶成像镜仍可保证干涉图上光程差近似线性分布。由以上两点可知,在紫外波段应用时,像平面式干涉结构与横向剪切式结构相比具有优势。

以往的像平面式干涉结构成像光谱仪中采用普通物镜作为成像镜,在紫外波段应用时,由于紫外物镜可用的光学材料少,各种像差校正困难,其物像难以保证严格的共轭关系,会导致调制度下降等问题。有鉴于此,本文提出并验证了 Offner 系统与像平面干涉结构相组合的紫外成像光谱仪方案。Offner 系统的全反射、无 Seidel 像差的优点使其适用于紫外波段,其具有的物像严格共轭关系恰好符合像平面式干涉结构的需求。该方案不仅将像平面式干涉结构应用于紫外波段,还解决了以往像平面式成像光谱仪结构在紫外波段应用时存在的问题。

3 系统结构

3.1 系统组成及原理

本系统组成与空间调制型干涉系统类似,主要由前置物镜、干涉仪、成像镜及图像探测器组成。但与之相比有两个主要区别:本系统取消了狭缝,使系统的通光孔径扩大至成像系统的水平,与色散式紫外成像光谱仪相比,光通量提升了至少两个数量级;成像镜的作用不同,本系统中成像镜的主要作用是对实像面进行中继二次成像,而非会聚平行光成像。系统总体结构如图 1 所示。

目标辐射经扫描镜反射,并经前置物镜会聚后进入干涉仪,所形成的一对相干的一次像面由 Offner 系统二次成像在 CCD 表面,形成像平面干涉,干涉原理如图 2 所示。

像平面 A、B 分别为反射及透射分量的二次像面,像平面 A 与 CCD 重合,与像平面 B 中心对齐且

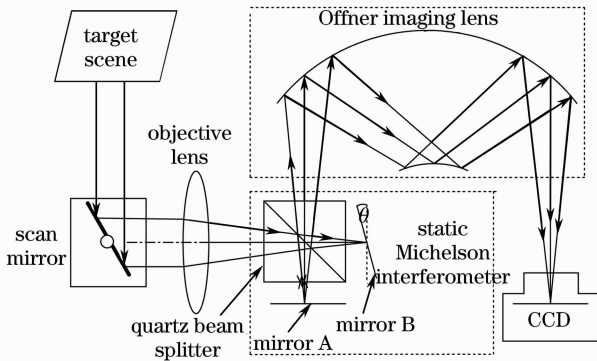


图 1 紫外成像光谱仪结构图

Fig. 1 Structure of UV imaging spectrometer

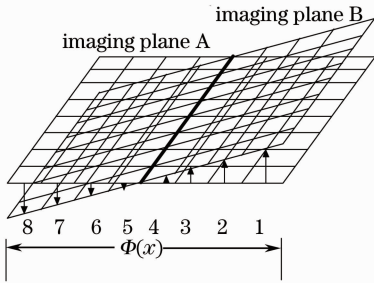


图 2 像平面干涉原理

Fig. 2 Principle of imaging plane interference

成 θ 夹角。两者具有相干性，目标图像上各点被其自相关函数调制，从而形成干涉图。像平面 A、B 上对应点之间的距离即为该点处的光程差，因此干涉图上的光程差沿干涉维方向基本呈线性分布。

系统通过推扫使目标图像各像素点获得相同的光程差变化范围，以完成各点光谱信息的获取^[11]。系统扫描机构为步进电机驱动的旋转镜，采用物镜前扫描方式。旋转镜步进角由前置物镜焦距及 CCD 像元尺寸确定。当进行单像素步进扫描时，步进角为单个像元对应的视场角的一半，在本系统中为 0.00375° 。扫描机构与相机设有同步机构。紫外相机及扫描镜控制器通过通用串行总线(USB)集线器连接至计算机。

3.2 系统光学结构

本系统为二次成像系统，其成像过程如图 3 所示。系统前置光学系统为成像物镜，其取消了狭缝并将焦面延伸至干涉仪内部，以减小分光立方体的尺寸。系统中采用了 XY-100 型石英制紫外物镜，其光谱透过范围为 $190 \sim 2500 \text{ nm}$ ，焦距 $f = 100 \text{ mm}$ ，最大 F 数为 $1/5.6$ ，后截距为 46.5 mm 。

本系统的干涉仪与迈克耳孙干涉仪结构基本相

同，但其两臂长度相等且均为静止臂。透射臂反射镜 Mirror B 与垂直方向成 θ 夹角。由于内部无运动部件，因此称为静态迈克耳孙干涉仪。紫外分光立方体的透射反比为 $1:1$ ，光谱透过范围为 $235 \sim 900 \text{ nm}$ 。为减少能量损失，反射镜表面均镀有紫外增强的铝反射膜。

本系统采用 Offner 系统作为成像镜，其为同心三反射光学系统，由两片同球面反射镜组成。当凹面镜与凸面镜的曲率半径 R_1 及 R_2 满足 $R_1 = 2R_2$ 时，系统可自动消 Seidel 像差，只剩 5 级像散^[12]。此外该系统的物面与像面具有共轭关系，当物面倾斜时，像面的倾斜角度与物面相同，因此可高质量地将干涉仪中的一次像面按相同角度二次成像在 CCD 表面，从而形成像平面干涉。

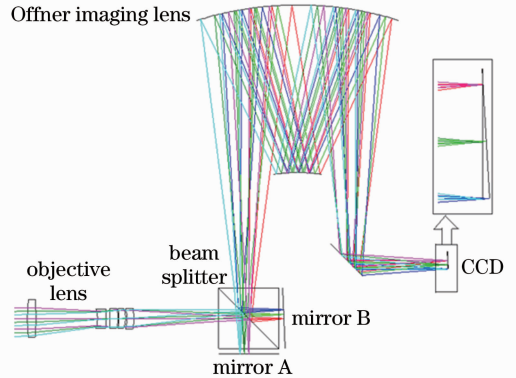


图 3 紫外成像光谱仪成像示意图

Fig. 3 Imaging schematic of UV imaging spectrometer

3.3 数据采集及处理

系统推扫及数据处理过程如图 4 所示。目标场景在扫描开始时刻从 CCD 左侧进入，每步扫描移动一个像素，与此同时 CCD 采集一张原始干涉图。当扫描完成时，目标场景刚好从 CCD 右侧移出。采集的原始干涉图序列长度为 CCD 横向像素数的 2 倍，需去除其中的冗余数据并将其重新排列为标准的干涉图立方体，再对其进行快速傅里叶变换(FFT)，即可得到目标的光谱数据立方体^[13]。

本系统中采用 Andor ikon-934M 型紫外 CCD 相机，光谱响应范围为 $190 \sim 950 \text{ nm}$ 。实验中只采集视场中心 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 区域内的图像，共采集 1024 张 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的原始干涉图。干涉条纹在 254 nm 处满足奈奎斯特条件，采集方式为过单边，干涉维有效像元数 $\omega = 492$ ，因此本系统实际最大光程差 $\delta_{\max} = 6.25 \times 10^{-3} \text{ cm}$ ，相对应的波数分辨率 $\Delta V = 80 \text{ cm}^{-1}$ 。系统参数如表 1 所示。

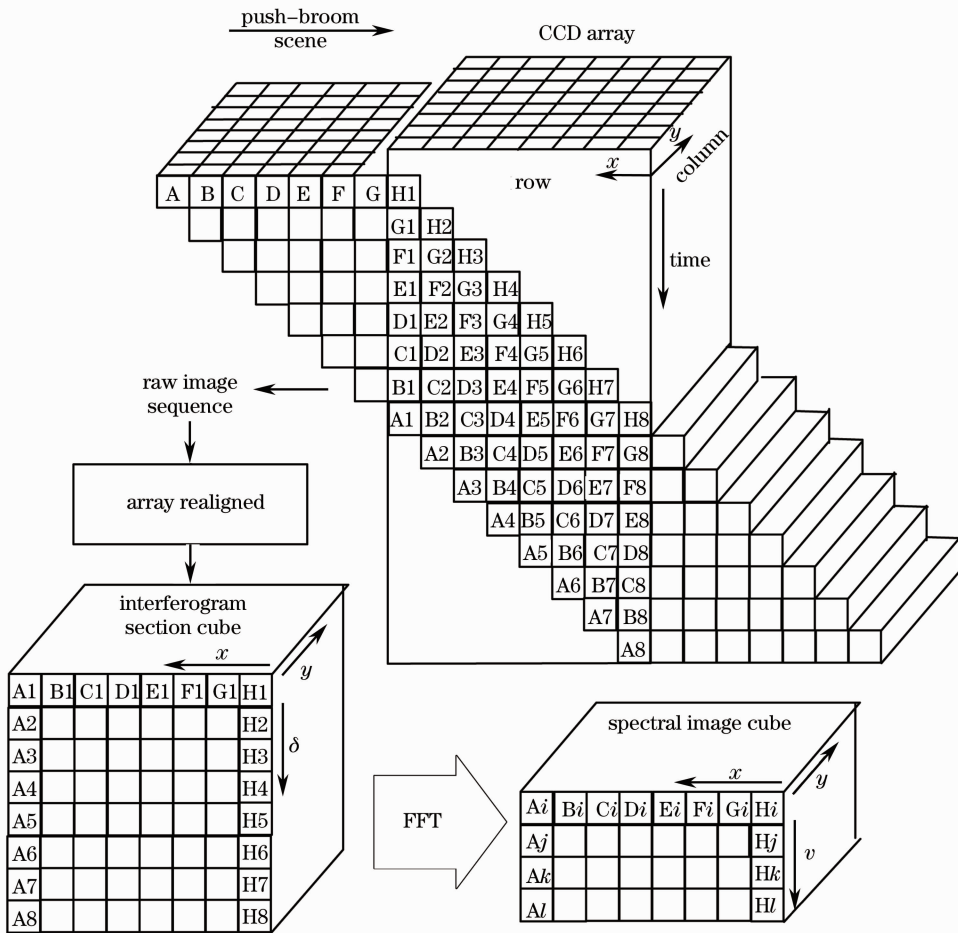


图 4 推扫及数据处理过程

Fig. 4 Push-broom and data processing procedures

表 1 紫外成像光谱仪的规格

Table 1 Specifications of UV imaging spectrometer

Parameter	Value
Working wavelength /nm	254~380
Focal length /mm	100
F number	1/8
Field of view /(°)	3.8
Step angle of scan mirror /(°)	0.00375
Active pixel /pixel	512×512
Model of camera	Andor ikon-M DU934
Wavenumber resolution /cm ⁻¹	80

4 实验过程及结果

系统原理样机如图 5 所示。实验中通过紫外带通滤光片限制其他波段辐射,其通带范围为 235~275 nm 及 275~380 nm,紫外光源分别为氙灯及高压汞灯。

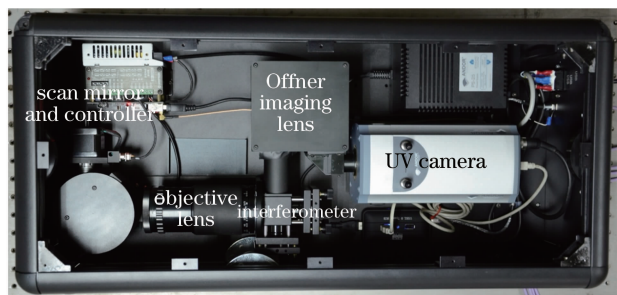


图 5 紫外成像光谱仪样机

Fig. 5 Prototype of UV imaging spectrometer

4.1 工作波段短波端实验

本实验中以沾有黑色油墨指纹的白瓷板为目标,氙灯沿 45°方向照明,前物镜前加装 235~275 nm 带通滤光片以限制其他波段能量。CCD 采集的原始干涉图像如图 6(a)所示,可见其为受干涉条纹调制的指纹图像。图 6(b)为干涉图中第 256 行像素,可见零级条纹位于 492 pixel 处。由此可知,系统在工作波段的短波端可正常工作。

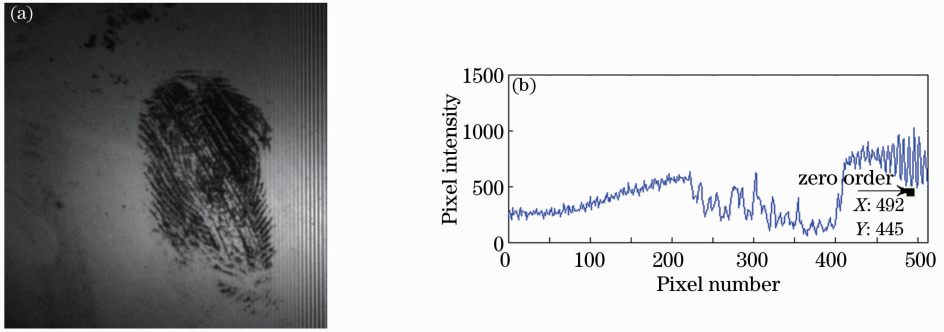


图 6 短波端实验结果。(a) CCD 采集的原始干涉图；(b)第 256 行像素

Fig. 6 Experimental results of short-wave end. (a) Raw interference image from CCD; (b) pixels on row 256

4.2 紫外单色光谱实验

此实验中的目标为白瓷板表面的黑色记号笔迹，并采用高压汞灯照明，滤光片的通带为 275~380 nm (对应波数为 36363~23165 cm^{-1})。在滤光片通带内，高压汞灯有唯一的强发射峰，位于 365 nm 处，因此为单色光实验。系统采用干涉图过单边采集，单步长扫描方式，扫描步数为 1024 步。系统采集的原始干涉图如图 7 所示。图 8 是经过光谱复原处理后的实验结果，其中图 8(a)为发射峰处的图像切片，图 8(b)为图像中心点光谱曲线。由图 8(b)可见，在工作波数范围内具有唯一的强发射峰，对应波数为 27397 cm^{-1} (对应波长为 365 nm)，该波长处的图像切片清晰可见。

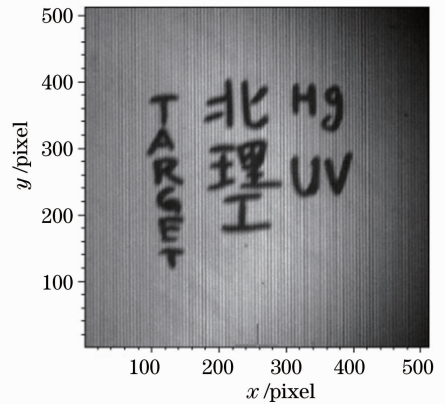


图 7 汞灯实验原始干涉图

Fig. 7 Raw interference image of mercury lamp experiment

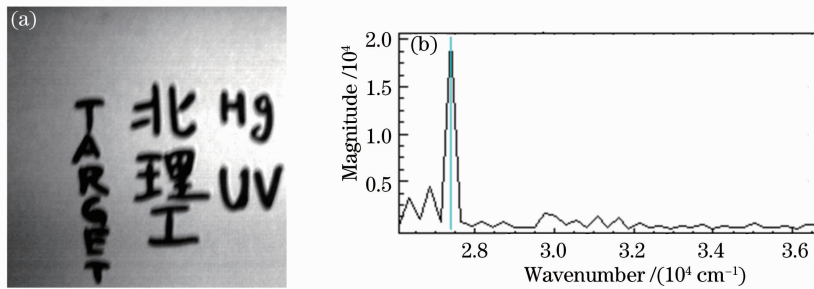


图 8 汞灯实验结果。(a) 365 nm 处图像切片；(b)光谱曲线

Fig. 8 Experimental results of mercury lamp experiment. (a) Image section at 365 nm; (c) spectral curve

5 结 论

分析了像平面式干涉结构在紫外波段应用的特点，并据此提出了一种像平面式干涉结构与 Offner 系统相组合的紫外成像光谱仪方案。该方案不仅将像平面式干涉结构应用于紫外波段，还解决了以往像平面式成像光谱仪结构在紫外波段应用时存在的问题。其理论最大波数分辨率为 $\Delta V = 80 \text{ cm}^{-1}$ ，高于声光调制滤光器型结构。基于该方案，研制了原理样机，并在工作波段短波端及单色光照明条件下

对目标进行实验。实验结果表明，系统可在短波端正常采集原始干涉图，可正常重建目标的紫外光谱图像立方体，能正确识别出汞灯在 365 nm 处的发射峰。该方案具有大通光孔径、高环境适应能力及高光谱分辨率的优点，在刑侦、物证等领域有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 L J Paxton, A B Christensen, D Morrison, *et al.*. GUVI: a hyperspectral imager for geospace [C]. SPIE, 2004, 5660: 228-

- 240.
- 2 N Akiba, N Saitoh, K Kuroki. Fluorescence spectra and images of latent fingerprints excited with a tunable laser in the ultraviolet region [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2007, 52(5): 1103—1106.
- 3 Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng, *et al.*. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0122001.
吴 雁, 唐 义, 刘建鹏, 等. 电离层遥感远紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0122001.
- 4 Yu Lei, Lin Guanyu, Yu Xiangyang. Optical system of far ultraviolet imaging spectrometer for space-based upper atmosphere remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122001.
于 磊, 林冠宇, 于向阳. 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122001.
- 5 N Gupta, V Voloshinov. Hyperspectral imager, from ultraviolet to visible, with a KDP acousto-optic tunable filter [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(13): 2752—2759.
- 6 R F Horton, C A Conger, L S Pellegrino. High étendue imaging Fourier transform spectrometer-initial results [C]. SPIE, 1997, 3118: 380—390.
- 7 Tang Yi, Ni Guoqiang, Liao Ningfang, *et al.*. Spatial modulation imaging spectrometer based on the Michelson interferometer [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(3): 427—429.
唐 义, 倪国强, 廖宁放, 等. 基于迈克耳逊干涉仪的空间调制型干涉成像光谱仪[J]. *光学技术*, 2007, 33(3): 427—429.
- 8 W J Slough, J B Rafert, C A Rohde, *et al.*. THRIFTI: tomographic hyperspectral remote imaging Fourier transform interferometer [C]. SPIE, 1998, 3393: 207—216.
- 9 Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Analysis of interferometer system in a large aperture static imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3): 330—334.
董 瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J]. *光学学报*, 2001, 21(3): 330—334.
- 10 Li Jianxin, Meng Xin, Zhou Wei, *et al.*. Image plane interferometric hyperspectral imaging based on reimaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1230001.
李建欣, 孟 鑫, 周 伟, 等. 基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1230001.
- 11 P Z Mouroulis. Spectral and spatial uniformity in pushbroom imaging spectrometers [C]. SPIE, 1999, 3753: 133—141.
- 12 Offner. Unit Power Imaging Catoptric Anastigmat [P]. US Patent 3748015, 1973-07-24.
- 13 Liang Minyong, Liao Ningfang, Luo Yongdao, *et al.*. Study on the data processing and error correction of windowing Fourier transform imging spectrometer [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(z1): 243—246.
梁敏勇, 廖宁放, 罗永道, 等. 窗扫型成像光谱仪数据处理及误差校正研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(z1): 243—246.

栏目编辑: 史 敏