

像平面式干涉成像光谱仪光程差分析与计算

刘 洋¹ 白廷柱^{1,2} 廖宁放² 吕 航² 郑海晶¹

(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 像平面式干涉成像光谱仪的光程差(OPD)线性度与光谱及图像重建精度直接相关。分析了光程差产生原理,通过分别对单个像面的正离焦及负离焦部分光程差进行讨论,给出了像平面式干涉结构在单侧及双侧离焦模式下的光程差表达式,并对两者在不同波长满足奈奎斯特条件时的光程差及其非线性残差进行仿真,并通过实验验证。仿真结果表明:系统在两种工作模式下的光程差非线性残差均随像面夹角增加而增大,单侧离焦模式零级点两侧光程差不对称,且负离焦部分残差较小;双侧离焦模式零级点两侧光程差对称,但非线性残差大于前者。实验结果表明,当工作波长较短时(如紫外),单侧离焦模式负离焦部分在实际应用中可认为满足光程差线性分布关系。

关键词 光谱;成像光谱仪;像平面式干涉结构;光程差

中图分类号 TH744 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0611003

Analysis and Calculation of Optical Path Difference in Image Plane Interference Imaging Spectrometer

Liu Yang¹ Bai Tingzhu^{1,2} Liao Ningfang² Lü Hang² Zheng Haijing¹

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

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

Abstract The linearity of optical path difference (OPD) in image plane interference imaging spectrometer (IPIIS) is directly related to the rebuilt accuracy of the spectrum. The generation principle of OPD is studied. By analyzing the OPD of positive defocus and negative defocus of one single image plane separately, the expression of OPD in both single-side defocus and dual-side defocus working mode of IPIIS is given. The simulation result of OPD and its nonlinear residual in the two aforementioned working modes when Nyquist constraint is satisfied for different wavelengths is also given, which shows that both the OPD and its nonlinear residual increase with the angular value between two image planes. The OPD on both sides of the zero-order fringe is dissymmetried in single-side defocus working mode and the negative defocus has small residual. However, there is symmetric OPD in dual-side defocus working mode and has more residual than that before. The experimental results show that the OPD of negative defocus in single-side defocus mode, when the IPIIS works in relatively short wave-length (such as ultraviolet), can be regarded as linear distribution in practical application.

Key words spectroscopy; imaging spectrometer; image plane interference; optical path difference

OCIS codes 110.3175; 110.4234; 300.6190; 300.6300

1 引言

时间-空间调制型干涉成像光谱仪同时具有时

间调制型光通量大及空间调制型干涉过程静态、环境适应能力强的特点,是目前成像光谱领域研究的

收稿日期: 2013-11-20; **收到修改稿日期**: 2014-01-28

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,博士生导师,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)

热点^[1]。时间-空间调制型干涉成像光谱仪主要结构分为横向剪切式^[2]、偏振式^[3]及像面平面式。由于偏振式结构应用波段受光学晶体材料透射波段限制,因此横向剪切式及像面平面式结构是目前更为常用的结构。Horton 等^[4]提出的像平面式结构具有结构简单,无需使用傅里叶镜的优点,但由于其存在光程差受离焦量限制等缺点,因而其在使用范围方面没有横向剪切式结构广泛。Horton 等^[5-6]对像平面式干涉结构进行了分析,推导了光程差公式,并将其简化为线性函数,但未对光程差的线性度进行分析,不能为基于该结构的成像光谱仪设计提供依据。为此,本文分析了像平面式干涉结构的干涉原理及过程,推导了像平面式干涉结构光程差的非简化表达式,并对其进行计算机仿真,从而为确定该

型干涉结构的适用范围及设计提供此方面的理论依据。

2 像平面式干涉仪结构及原理

像平面式干涉仪有多种结构,其中基于马赫-曾德尔干涉仪的高通量成像傅里叶变换光谱仪实验装置(HEIFTS)及静态迈克尔逊干涉仪^[7]是最具有代表性的结构。虽然两者的具体结构有所差异,但核心原理相同,即:将目标的像等振幅分为两个相干且成一定夹角的等光程像面,使目标图像被其自相关函数调制,形成干涉图。像平面式干涉仪中像面与 CCD 空间位置关系及其等效光学结构分别如图 1(a)及图 1(b)所示。

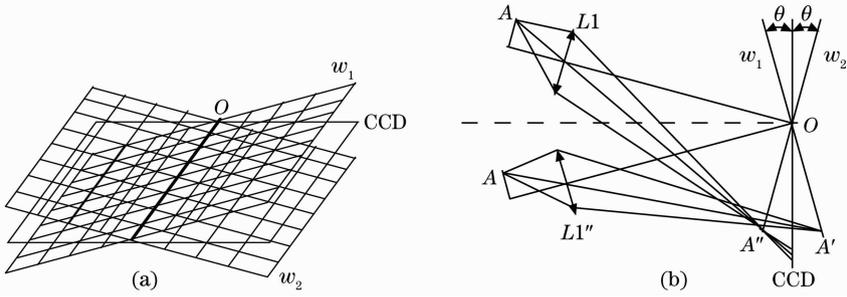


图 1 像平面式干涉仪结构。(a)像面与 CCD 位置关系;(b)等效光学结构

Fig. 1 Structure of image plane interference. (a) Spatial relationship of image plane and CCD; (b) equivalent optical structure

目标场景经干涉仪后产生一对相干像面 w_1 与 w_2 , 两者中心对齐且均与 CCD 成夹角 θ 。A' 及 A'' 分别为目标点 A 在 w_1 及 w_2 面上所成的像。由于两个像面与 CCD 不重合,因此 A' 及 A'' 在 CCD 上的像会因离焦而扩展为弥散斑。两个弥散斑相干且基本重合[在图 1(b)中为了清晰展示结构,加大了夹角 θ , 使两个弥散圆未重合], 因此形成干涉, 使干涉图呈现为受干涉条纹调制的目标图像。该点处的光程差 δ 在数值上等于 A' 及 A'' 的离焦量之和。设 $B(\nu)$ 为目标上某点的光谱曲线(ν 单位为波数), 则干涉图上该点处的干涉强度可记为^[8]

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) [1 + \cos(2\pi\nu\delta)] d\nu. \quad (1)$$

在像平面式干涉结构中, CCD 上某点处的光程差 δ 为该点与零级条纹距离 x 的函数。设其为 $\delta(x)$, 并消去直流项, 则目标干涉图可由下式表示:

$$I_{(x,y)}[\delta(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} B_{x,y}(\nu) \cos[2\pi\nu\delta(x)] d\nu, \quad (2)$$

式中 $B_{x,y}(\nu)$ 为采样时刻干涉图 (x,y) 处目标的光

谱曲线。在像平面式干涉结构中, 干涉图中任意点的光程差只与其距零级条纹的距离 x 相关。在匀速推扫获得的干涉图序列中, 干涉条纹位置固定而目标沿推扫方向运动, 因此目标上各点随着推扫运动可获得相应的光程差变化, 经重构后可获得目标上各点完整的干涉条纹 $I_{(n,y)}[\delta(x)]$ 。对其沿光程差变化方向进行逆傅里叶变换(\mathcal{F}^{-1})后即获得该点的光谱曲线, 可表示为

$$B_{(n,y)}(\nu) = \mathcal{F}\{I_{(n,y)}[\delta(x)]\} = \int_{-L/2}^{+L/2} I_{(n,y)}[\delta(x)] \times \exp[-j2\pi\nu\delta(x)] dx, \quad (3)$$

式中 $B_{n,y}(\nu)$ 为图像切片中 (n,y) 处的光谱曲线, δ 为该点处光程差, L 为 CCD 干涉维尺寸。当 δ 为 x 的线性函数时, (3) 式满足 \mathcal{F} 所需的均匀采样条件, 在此情况下重构出的光谱曲线 $B_{(n,y)}(\nu)$ 为等波数分布。由此可见, 光程差函数 δ 的非线性度会直接影响重构光谱的精度, 因此需对其进行深入的分析及计算^[9-11]。

3 光程差的分析与计算

由图 1 可知,像平面式干涉结构中两个像面 ω_1 及 ω_2 相对于 CCD 对称,因此本文只讨论 ω_1 的情

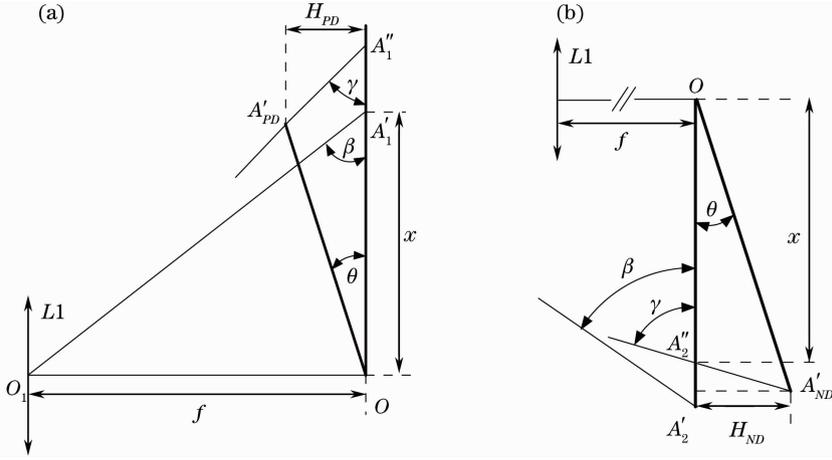


图 2 像平面干涉过程示意图。(a)正离焦侧;(b)负离焦侧

Fig. 2 Principle of image plane interference process. (a) Positive defocus side; (b) nagtive defocus side

ω_1 与 CCD 相交于 CCD 中线 O 处,该处的光程差为零,在干涉图中表现为零级条纹。讨论正离焦侧(PD)的光程差。该部分如图 2(a)所示,当对像平面式干涉仪中单个像面进行分析时,可将其简化为物镜成像系统,本系统的焦距为 f ,假设当 ω_1 与 CCD 间夹角 θ 为零时,目标上点 A 在 ω_1 上所成像与 CCD 重合,令该点为 A'_1 ,其与零级条纹的距离为 x ,则过前置物镜 L_1 的主点 O_1 且与 CCD 交于点 A'_1 的主光线与 CCD 的夹角 β 可由如下表示:

$$\beta = \arctan\left(\frac{f}{x}\right). \quad (4)$$

当 ω_1 与 CCD 的夹角 θ 不为零时,目标上点 A 在 ω_1 上所成像为 A'_{PD} ,过该点的主光线与 CCD 相交于 A''_1 。由于实际系统中 θ 较小,因此可近似认为 $A''_1O \approx A'_1O = A'_{PD}O = x$ 。则过 A''_1 的主光线与 CCD 的夹角 γ 及 A'_{PD} 到 CCD 的垂直距离 H_{PD} 可分别表示为

$$\gamma = \beta - \theta = \arctan\left(\frac{f}{x}\right) - \theta, \quad (5)$$

$$H_{PD} = x \sin \gamma. \quad (6)$$

与零级条纹距离为 x 处的正离焦侧光程差可表示为

$$\delta_{PD}(x, f, \theta) = A'_{PD}A''_1 = \frac{H_{PD}}{\sin \gamma} = x \sin \theta / \sin \left[\arctan\left(\frac{f}{x}\right) - \theta \right]. \quad (7)$$

同理,图 2(b)所示的负离焦侧(ND)的光程差可表示为

$$\delta_{ND}(x, f, \theta) = x \sin \theta / \sin \left[\arctan\left(\frac{f}{x}\right) + \theta \right], \quad (8)$$

况,且只讨论主光线的光程差。 ω_1 与 CCD 的相对位置关系如图 2 所示。

由(7)和(8)式可知, ω_1 在整个 CCD 范围内的光程差可由(9)式给出:

$$\delta_{w_1}(x, f, \theta) = \begin{cases} x \sin \theta / \sin \left[\arctan\left(\frac{f}{x}\right) - \theta \right] & (x \geq 0) \\ x \sin \theta / \sin \left[\arctan\left(\frac{f}{x}\right) + \theta \right] & (x < 0) \end{cases}, \quad (9)$$

式中 光学系统焦距 f 及像面夹角 θ 为常量。因此 ω_1 与 CCD 之间的光程差 $\delta_{w_1}(x, f, \theta)$ 是 x 的一元非线性方程,正负离焦侧的光程差相对于零点不对称。同理, ω_2 在 CCD 表面的光程差与 ω_1 相对零点对称。

以往的像平面式干涉结构均采用双侧离焦模式,即两个像平面相对于 CCD 对称,系统光程差由两个对称倾斜像面共同产生,其数值为两像面光程差之和;由于两像面 ω_1 及 ω_2 的光程差相对于零点对称,因此双侧离焦工作模式下的光程差可表示为

$$\delta(x, f, \theta) = x \sin \theta / \sin \left[\arctan\left(\frac{f}{x}\right) - \theta \right] + x \sin \theta / \sin \left[\arctan\left(\frac{f}{x}\right) + \theta \right], \quad (10)$$

由(10)式可知,像平面干涉结构工作在双侧离焦模式时,其零级条纹两侧的光程差是对称的。当系统在紫外等波长较短的波段应用时,其产生的最大光程差较小,无需两个像面共同提供光程差,因此本文提出一种像平面式干涉结构的新型工作模式,即单侧离焦模式。系统在此模式工作时,一个像面与 CCD 重合,另一像面与 CCD 成夹角 θ 。系统光程差完全由倾斜像面产生,因此单侧离焦模式下的系统

光程差可由(10)式表示。由此可知,单侧离焦模式的零级条纹两侧光程差不对称。

4 数据模拟仿真及实验结果

4.1 光程差及其非线性残差与 θ 关系

对单个倾斜像面产生的光程差及其非线性残差进行模拟。本文中光程差非线性残差可由表示为

$$\delta_{\text{residual}}(x) = \delta(x) - \delta_{\text{liner}}(x), \quad (11)$$

式中 $\delta(x)$ 为本系统实际光程差, $\delta_{\text{liner}}(x)$ 为系统由零级点到光程差最大处的线性函数,即理想线性光程差。两者之差 $\delta_{\text{residual}}(x)$ 即为光程差非线性残差。以实验室研制的大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪为例,该系统焦距 $f=100$ mm, CCD 分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$, 当系统采用双边采集时, ω_1 负离焦侧在不同波长下满足奈奎斯特条件时与 CCD 的夹角 θ 可由下式求出

$$\delta_{\text{max}} = n \times \lambda = \frac{x \sin \theta}{\sin \left[\arctan \left(\frac{f}{x} \right) + \theta \right]}, \quad (12)$$

式中 n 为单侧最大干涉周期数, 本系统中 $n=256$, x 为单侧干涉维长度, 本系统中 $x=6.656$ mm。将以上参数带入上式, 可求得当波长 $\lambda=250$ 、 500 及 750 nm 时, θ 分别为 0.551° 、 1.101° 及 1.652° 。将以上角度分别带入(11)式及(12)式, 则单侧离焦模式在此条件下的光程差及其非线性残差如图 3 及图 4 所示。

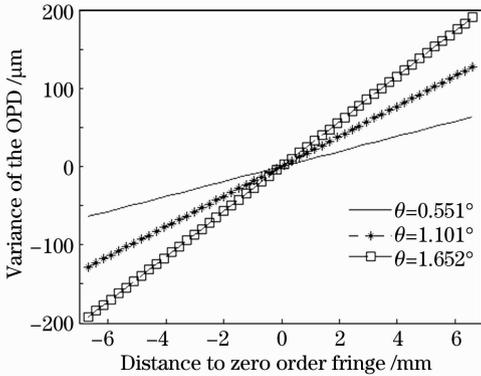


图 3 光程差在 CCD 干涉维分布

Fig. 3 Distribution of optical path difference (OPD) on interference dimension of CCD

由图 3 可知, ω_1 的光程差在整个 CCD 范围内近似线性分布, 斜率随着 θ 的增大而增大。在横坐标零点左侧的为负离焦 (ND) 侧, 右侧为正离焦 (PD) 侧。图 4 给出了不同夹角情况下两侧的非线性残差随 x 变化的关系, 其中横坐标轴为与零级点距离的绝对值。由图 4 可知, 两侧的非线性残差均随 θ 的增大而增大, 且负离焦侧的残差始终小于正

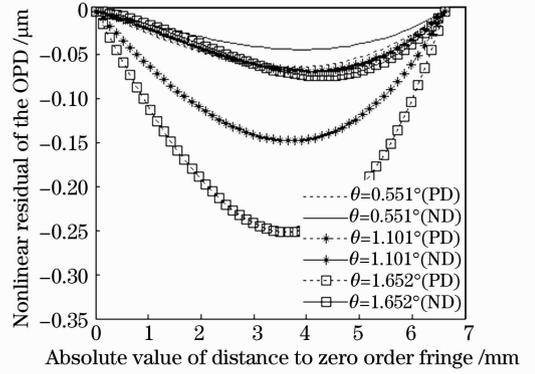


图 4 正离焦侧及负离焦侧光程差非线性残差

Fig. 4 Nonlinear residual of OPD on positive defocus and nagtive defocus side

离焦侧。负离焦侧在 250 nm 及 750 nm 处满足奈奎斯特条件时, 其最大非线性残差分别为 45 nm 及 75 nm; 正离焦侧与此相对应的最大非线性残差为 64 nm 及 250 nm。由此可见, 负离焦侧的最大非线性残差随 θ 增大的速度较慢。由以上可知, 像平面式干涉结构在波长较短波段应用时 (如紫外), 其单侧离焦模式下负离焦部分可认为光程差线性分布。

4.2 单侧离焦与双侧离焦光程差线性度的比较

由上节可知, 负离焦侧非线性残差较小, 因此讨论单侧离焦工作模式时采用负离焦 (即 $x>0$) 部分, 其在波长 $\lambda=250$ 、 500 及 750 nm 满足奈奎斯特条件时的像面夹角 θ 已在上节中计算。由(10)式可知, 双侧离焦时系统的光程差相对于零级点对称, 因此也选取 $x>0$ 的部分进行讨论, 其像面夹角计算过程与单侧离焦相同。单侧负离焦及双侧离焦在不同波长处满足奈奎斯特条件时的光程差非线性残差如图 5 所示。

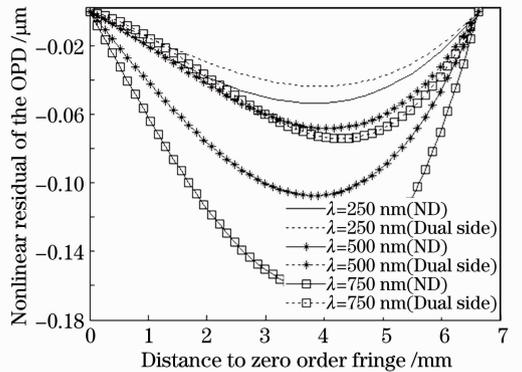


图 5 单侧离焦及双侧离焦光程差非线性残差

Fig. 5 Nonlinear residual of OPD in single-side defocus and dual-side defocus

由图 5 可知, 两种工作模式下的光程差非线性残差均随波长增加而增大, 双侧离焦的残差增长较

快,且始终大于单侧离焦模式,单侧及双侧离焦模式在 750 nm 处的最大非线性残差分别为 74 nm 及 161 nm。

4.3 实验结果

使用 3.1 节中所述基于静态迈克尔逊干涉仪的大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪进行实验,其装调过程如下:在自准直仪监控下,调整干涉仪中反射臂的反射镜,使其与分光立方体相对应表面平行,从而使该部分的像面与 CCD 表面重合;在 CCD 相机的监视下,通过调整另一臂的反射镜的位置及角度以调节干涉条纹的方向、零级点位置及干涉条纹疏密,并通过单色光干涉条纹的间隔周期确定两像面的夹角。

为验证像平面干涉仪在波长较短波段(如紫外)及采用单侧离焦模式时负离焦侧光程差近似线性分布的结论,采用单色光干涉图的方式进行了验证,即当该部分光程差线性分布时,CCD 采集的单

色均匀目标干涉条纹为等间隔排布。系统的光学系统参数已在 3.1 节中介绍,其在 250 nm 处满足奈奎斯特条件时的干涉条纹过密,不利于干涉条纹位置的提取及间隔的误差分析,因此本实验采用了 750 nm 单色均匀目标以增大干涉条纹间隔,以便于处理。图 6(a)为采用单侧离焦模式时在负离焦侧采集的干涉图像,分辨率为 512 pixel \times 512 pixel。由图 6(a)可知,像平面式干涉成像光谱仪采集的原始干涉图为受干涉条纹调制的均匀目标图像。图像中部第 256 行处干涉条纹的间距如图 6(b)所示。由图 6(b)可知,干涉图第 256 行处干涉条纹的间距基本相同,均为 6 pixel,为 250 nm 干涉条纹间距的 3 倍,图中共包含 85 个周期。其左侧、中部及右侧间隔误差点由定位干涉条纹间隔时的正负 1 截断误差导致。上述结果表明本文提出的结论是正确的,可以利用相关结论进行像平面式干涉成像光谱仪设计。

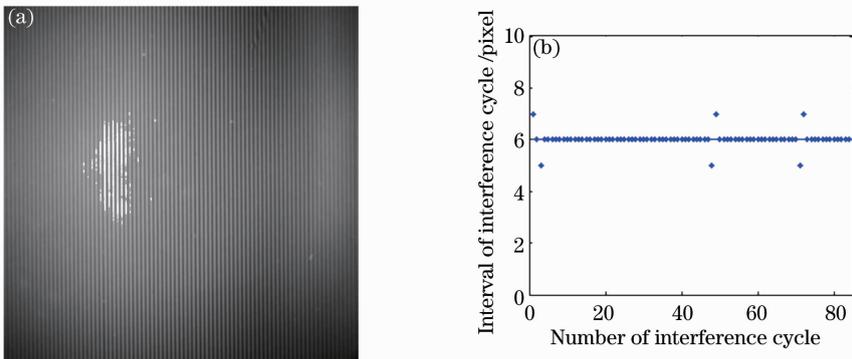


图 6 750 nm 均匀目标干涉图及处理结果。(a) 单色原始干涉图; (b) 干涉条纹间隔

Fig. 6 750 nm homogeneous scene interference pattern and process result. (a) Raw image from CCD; (b) interval of interference cycle

5 结 论

对像平面式干涉结构的原理进行了分析,给出了像平面型干涉仪光程差的非简化表达形式,模拟及分析了像平面式干涉结构在不同条件下的光程差及其非线性残差,并提出了一种新型单侧离焦工作模式。相关模拟结果表明:像平面式干涉结构光程差在 CCD 干涉维方向上呈近似线性分布,当处于单侧离焦工作模式时,其零级两侧的光程差不对称,且负离焦一侧非线性残差较小;当在某波长满足奈奎斯特条件时,单侧离焦模式的非线性残差小于双侧离焦模式;单侧离焦模式及双侧离焦模式的非线性残差均随像面夹角增大而增大。实际应用中,在波长较短波段应用时(如紫外),其单侧负离焦部分可

认为光程差满足线性分布。

由以上可知,像平面式干涉结构在波长较短的波段应用时具有较小的光程差非线性残差。采用过单边采集方式,使用具有较好线性度的负离焦一侧干涉条纹,以及采用单侧离焦工作方式均可以提高光程差的线性度,减小光谱重构时的误差。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Dong Ying, Xiang Libin, 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.

- 3 Zhang Chunmin, Xiang Libin, Yang Jianfeng, *et al.*. Principle and modulation depth analysis of static larger field of view polarized interference imaging spectrometer [J]. J Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(6): 93-97.
张淳民, 相里斌, 杨建峰, 等. 稳态大视场偏振干涉成像光谱仪原理及调制度分析[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(6): 93-97.
- 4 R F Horton, C A Conger, L S Pellegrino. High étendue imaging Fourier transform spectrometer-initial results [C]. SPIE, 1996, 3118: 380-390.
- 5 R F Horton, B Tony, C Chris, *et al.*. Hefts phase II-laboratory and advanced simulation results [C]. SPIE, 2000, 4132: 195-205.
- 6 Tao Ran, Xiang Libin, Du Shusong, *et al.*. The analysis of the high étendue imaging Fourier transform spectrometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 675-679.
陶 然, 相里斌, 杜述松, 等. 高通量傅里叶变换成像光谱仪调制度分析[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 675-679.
- 7 Liu Yang, Liao Ningfang, Bai Tingzhu, *et al.*. Study on the structure of large aperture ultraviolet Fourier transform imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0330001.
刘 洋, 廖宁放, 白廷柱, 等. 一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪结构研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0330001.
- 8 Li Jianxin, Meng Xin, Zhou Wei, *et al.*. Image plane interferometric hyperspectral imaging based on Re-imaging [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.
- 9 Xiang Libin, Lü Qunbo, Hiamg Min, *et al.*. Comparison of two types of Fourier transform imaging spectrometry [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(5): 1422-1426.
相里斌, 吕群波, 黄 旻, 等. 两种干涉成像光谱技术方案的比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(5): 1422-1426.
- 10 Zhou Jinsong, Xiang Libin, Wei Ruyi, *et al.*. General expression of optic path difference of reflectiong rotating Fourier transform spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(1): 263-266.
周锦松, 相里斌, 魏儒义, 等. 反射转镜式干涉光谱仪光程差的一般表达式[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(1): 263-266.
- 11 Meng Xin, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.*. Near-field mechanism research on hyperspectral image plane interferometric imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0230001.
孟 鑫, 李建欣, 朱日宏, 等. 高光谱像面干涉的近场成像机理研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0230001.

栏目编辑: 张浩佳