

# 基于双向剪切干涉的光谱分辨率增强

丛麟骁<sup>1,2</sup>, 黄旻<sup>1</sup>, 才啟胜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

**摘要** 对于宽谱段、高分辨率的光谱测量场景,在探测面阵像素与像元尺寸受限的情况下,提出了双向剪切干涉的倾斜记录干涉图方式,以进行面阵探测器的多行像素拼接,在提高长波谱段分辨率的同时,避免单位剪切量增加造成的短波信息截止。以 Wollaston 棱镜偏振干涉具验证旋转像面的双向剪切干涉方式,计算剪切量在探测器二维空间上的载频关系,由等相位倾斜条纹衔接多列像素构成完整的干涉图。通过 FRED 软件模拟偏光干涉过程,以方解石晶体、C-RED ONE 型探测器为例,验证等强度的 1064, 1550, 1970 nm 准单色谱线,结果显示:转角斜率为 1/3 时,双向剪切干涉复原谱线的位置误差小于 1 nm,幅度比例达到 0.9958:0.9759:1,1970 nm 光谱分辨率提高至 13 nm,为原值的 2.38 倍;对比复原棕榈蜡的近红外反射率光谱,768 pixel 的扩展光程差反演的光谱显示出更多吸收特征,较 320 pixel 光程差反演的光谱分辨率增强,但因拼接误差在短波方向引入了一定的高频扰动。对影响拼接精度的剪切量进行误差分析,给出成像放大率一定时,转角误差容限与像面转角、观测波长、剪切角与分段光程差间的关系。基于像面旋转的双向剪切干涉光谱仪,解决了单纯提高剪切量带来的分辨率增强与高频截止的矛盾,拓展了系统参数的求解范围以及相关的误差容限,为宽谱段、高分辨率测量提供了选择。

**关键词** 光谱学; 光谱分辨率增强; 二维剪切干涉; Wollaston 棱镜; 干涉图拼接

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.043002

## Spectral Resolution Enhancement Based on Two-Dimensional Shear Interference

Cong Linxiao<sup>1,2</sup>, Huang Min<sup>1</sup>, Cai Qisheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Computation Optical Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

<sup>2</sup>College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** For the case of broad spectrum and high resolution spectral measurement under limited number of pixels and the pixel size of the photodiode array, we propose a recording oblique interferogram scheme based on the two-dimensional (2D) shear interference, which is used to stitch those pixels on different rows of the focal plane array to improve the resolution in the long-wave and avoid the cut-off in the short-wave caused by increase in unit shear. We use the Wollaston prism polarization interferometer to verify the 2D-directional shear interference by rotating the image plane, and calculate the carrier frequency relation of the lateral shear volume in the coordinates of CCD. The complete interferogram is composed of several columns by connecting the margin pixels of equal-phase. Using the FRED software to simulate the polarization interference process, we calculate 1064 nm, 1550 nm, and 1970 nm laser lines from quasi-monochromatic when using calcite crystal and C-RED ONE detector. The results show that when the slope of the rotation angle is 1/3, the position precision of retrieved spectral lines by 2D-shear interference is less than 1 nm, and the amplitude ratio is 0.9958:0.9759:1. The spectral resolution at 1970 nm increases to

收稿日期: 2017-09-01; 收到修改稿日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(61225024)

作者简介: 丛麟骁(1988—),男,博士研究生,主要从事偏振型干涉光谱仪等方面的研究。E-mail: clx@aoe.ac.cn

导师简介: 黄旻(1976—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光谱成像技术方面的研究。

E-mail: huangmin@aoe.ac.cn(通信联系人)

13 nm, which is 2.38 times of the original value. The near-infrared reflectance spectra of the wax are compared with two kinds of recovery. The spectra inversion of the extended optical path difference including 768 pixels shows more absorption characteristics, showing a higher spectral resolvability compared to the inversion by optical path difference of 320 pixels, though some high-frequency disturbance is introduced in the short-wave direction. The relationship between the angle error tolerance and the rotating angle, the observed wavelength, the shear angle and the segmented optical path difference is given when imaging magnification is constant. Based on the 2D shear interference spectrometer by rotating the photodiode array, the contradiction between the high spectral resolution and the high-frequency cut-off caused by simply increasing the amount of shear is avoided, which expands the solution range of system parameters and related error tolerance, providing a choice for wide range and high-spectral measurement.

**Key words** spectroscopy; spectral resolution enhancement; two-dimensional shear interference; Wollaston prism; stitching of interferograms

**OCIS codes** 300.6320; 300.6300; 110.2970

## 1 引言

干涉型光谱仪记录光谱的频域条纹信息,与色散型光谱仪相比,其分辨率不受狭缝的限制,具有多通道、高通量、高精度的优点<sup>[1]</sup>,适宜对微弱信号的目标进行高光谱探测,广泛应用于农业生产、生物制药、环境监测、空间遥感等领域<sup>[2]</sup>。经典干涉仪的结构包括 Michelson 双臂式、Sagnac 型环路反射式以及偏振分光型直路双折射式<sup>[3]</sup>。根据条纹记录方式的不同,又可以分为时间调制、空间调制与时空联合调制等类型。其中,Michelson 双臂式干涉仪多采用时间调制,对动镜轴向扫描的精度要求极高,抗扰性与时效性较差;基于环形或直线共光路结构的时空调制型干涉仪,通过分束器形成横向剪切,能使孪生光源在面阵上形成快速、稳定的干涉。董瑛等<sup>[4]</sup>提出了大孔径静态干涉成像光谱仪(LASIS),该光谱仪将物体不同视角的相位按时空顺序接收,是基于推扫平台下的一种调制思路。

然而,对于空间或时空调制型光谱仪来说,面阵记录条纹的方式难以平衡光谱分辨率与光谱范围。具体来说,瑞利判据给出最小波数间隔,奈奎斯特频率限定带宽,二者受限于像素个数,故在可见-近红外波长区域很难实现高光谱分辨率。Komisarek 等<sup>[5]</sup>提出用不同厚度的 Wollaston 棱镜(WP)阵列代替单个 WP,以增加最大光程差,提高光谱分辨率;魏儒义等<sup>[6]</sup>通过引入反射转镜建立多光程组合分区模型,实现了小位移产生大光程差的干涉;王田<sup>[7]</sup>、步苗苗<sup>[8]</sup>等通过调整 Savart 偏光镜的厚度,得到了最大光程可调的差分偏振成像系统;Cai 等<sup>[9]</sup>在 LASIS 中加入光栅形成外差干涉,实现了窄谱段内的超光谱分辨率探测。本文针对面阵尺寸或像素数受限、短波光谱分辨率低的问题,提出双向剪

切干涉的光谱分辨率增强、倾斜记录条纹的多行像素拼接方法,其在旋转安置的像面探测下能使系统的光谱分辨率提高到同等探测条件的 2.38 倍。

## 2 基本原理

在理想情况下,干涉光谱仪像面的光程差为关于探测器某一维位置( $x$  或  $y$ )的线性分布。当置于焦平面处的 CCD 与干涉条纹方向发生旋转时,光程差分布将扩展到二维平面,等同于增加了有效的采样像素点数。这种安排既可以拓展光谱的测量范围,又可以提高原波段的光谱分辨率,避免了一维探测时采样点数不够而导致的光谱混叠<sup>[10]</sup>。假设二维探测的光源完全相干,不考虑视场畸变、渐晕、色差等因素,以 Wollaston 棱镜偏振干涉具<sup>[11-12]</sup>为例验证旋转像面的双向剪切干涉方式,并对变换处理后的复原结果加以评判。

基于 WP 的直线共光路剪切干涉仪通过双折射实现两束偏振光互成角度的干涉。如图 1 所示,待测光源会聚至前置系统(未画出)的后焦面狭缝,经光束准直后进入透光方向为  $45^\circ$  的平行偏振系统,成像镜将处于 WP 内部的干涉图中,在探测器的  $y$  轴方向上得到条纹。CCD 绕系统光轴( $z$  轴)旋转后,干涉条纹方向  $x$ - $y$  与探测器方向  $u$ - $v$  并不重合,此时转角  $\phi$  将决定原空间频率在  $u$ - $v$  方向的投影比例。如二者之间呈倍数关系,根据面阵倾斜条纹(等相位)连接较小剪切量方向的探测边缘,可在大剪切量方向上按倍频做进制添入多个周期,以构建一个完整的光程差区间,经数据处理、反演后得到更高分辨率的光谱。

根据 Wollaston 棱镜的剪切原理,干涉双光束的剪切角或角剪切量为

$$\alpha \approx 2(n_o - n_e) \tan \theta = 2\Delta n \tan \theta, \quad (1)$$

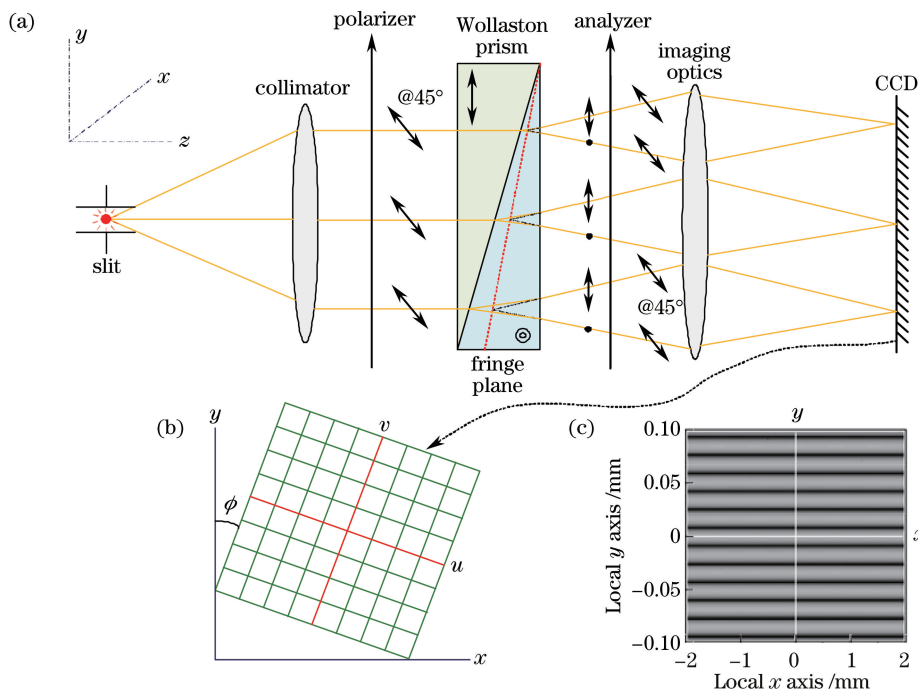


图 1 (a)基于双向剪切干涉的光谱探测装置;(b)旋转的焦平面阵列;(c)传统的焦平面阵列

Fig. 1 (a) Spectrometer based on 2D shear interference; (b) rotational FPA; (c) conventional FPA

式中  $n_e$ 、 $n_o$  为 e 光和 o 光的折射率,  $\theta$  为楔形板的结构角,  $\Delta n$  为折射率差。不考虑成像系统的畸变, 且横向放大率设定为  $\beta$ , 则条纹在剪切方向上的空间周期为

$$\Lambda \approx \frac{\lambda}{\alpha\beta}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为干涉波长。相应地, WP 在固有剪切量下的条纹空间频率为

$$f_0 = \frac{1}{\Lambda} = \frac{\alpha\beta}{\lambda}. \quad (3)$$

假定 CCD 绕  $z$  轴旋转了角度  $\phi$ , 根据投影关系可得条纹的空间频率  $f_0$  在面阵探测器坐标系  $u-v$  下的载频分量为

$$\begin{cases} f_u = f_0 \cos \phi \\ f_v = f_0 \sin \phi \end{cases} \quad (4)$$

对于像面上的某点  $(u, v)$ , 其至 WP 中线位置  $(0, 0)$  的横向距离  $d = \sqrt{u^2 + v^2}$ , 则干涉光强分布为

$$I(u, v) = I_0(u, v) + M_0(u, v) \times \cos[2\pi(f_u u + f_v v)], \quad (5)$$

式中  $I_0(u, v)$ 、 $M_0(u, v)$  分别为干涉图强度的直流偏置背景与交流分量, 它们随画幅或视场位置而缓慢变化。焦平面探测器坐标  $u-v$  上的光程差为

$$\begin{cases} \Delta_u = f_u \cdot u = 2\Delta n \tan \theta \cdot \beta \cos \phi \cdot u \\ \Delta_v = f_v \cdot v = 2\Delta n \tan \theta \cdot \beta \sin \phi \cdot v \end{cases} \quad (6)$$

由于光程差在  $x$ 、 $y$  方向的变化相互独立, 故而代表等相面位置的倾斜条纹上的光程差为常数:

$$\Delta_u + \Delta_v = c, \quad (7)$$

对其两侧微分, 可求得倾斜条纹在探测空间  $u-v$  中的方向为比率

$$r = -\frac{\delta u}{\delta v} = -\tan \phi. \quad (8)$$

如图 2 所示, 以某个像素  $\phi_A$  为采样起点, 沿其行、列所在方向存在  $\phi_B$  和  $\phi_C$  两个位置与  $\phi_A$  具有相等的光程差  $\Delta$ , 距离关系为  $d_{AB} = r \cdot d_{AC}$ 。如果按  $r$  给出的边界位置, 在小剪切量区间  $AB$  充分采样的基础上, 利用  $\Delta_{AB} = \Delta_{AC}$  在面阵探测器上拼接像素  $BC$ , 则可将完整的干涉图“折叠”到面阵上的不同行上收集, 从而可提高最大光程差与光谱分辨率。另外, 对于采样存储数据量庞大的系统来说, 上述思路也提供了一种可调分辨率的方式。

### 3 验证结果

根据目标光谱范围  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  可知无失真的空间采样频率, 由  $\Delta\lambda = \lambda^2 / L_{\max}$  可得分辨波长  $\lambda$  所需的最大光程差  $L_{\max}$ , 以此确立干涉剪切量  $\alpha$ 。为在  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$  谱段实现  $1.6 \mu\text{m}$  处光谱分辨能力  $R = \lambda / \Delta\lambda \geq 50$ , 需要双边干涉图的最大光程差  $\Delta_{\max} = N p \alpha / 2 \geq R \lambda = 80 \mu\text{m}$  (其中  $N$  为像素数目,  $p$  为像素尺

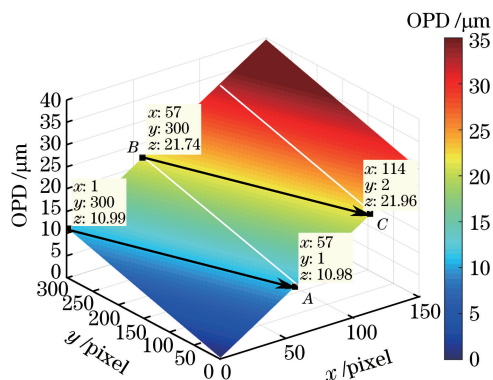


图2 在探测面阵空间中的相对光程差分布

Fig. 2 Relative OPD distribution on the detector

寸)。另外,采样要求单个像素光程差步长  $\Delta_p = p\alpha \leq \lambda_{\min}/2 = 0.5 \mu\text{m}$ , 因此为实现相关要求,需要剪切量符合

$$160/N \leq p\alpha \leq 0.5, \quad (9)$$

只有  $N \geq 320$  时(9)式才有解。这里,使用 First Light 公司的 C-RED ONE 型短波红外相机,基于 e-APD 技术能够实现高灵敏度和高速探测。其像元尺寸  $24 \mu\text{m}$ , 水平与垂直分辨率为  $325 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ , 数据采用 Camera-Link 接口,并在  $0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}$  具有较高的峰值量子效率。显然,水平维度的最高像素数为 320,可同时满足目标光谱区间与分辨率的要求,解得剪切量  $\alpha = 0.0208$ 。

另外,采用旋转像面后的双向剪切干涉方案后,拼接干涉图的像素总数可超过 320。例如垂直方向( $v$ 轴)选择合适的角频率  $f_v = \alpha \sin \phi$  后,该系统的最大光程差将拓展至  $\cot \phi f_v d_v$ ,也能实现反演波段  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$  范围内  $1.6 \mu\text{m}$  处分辨能力  $R \geq 50$  的测量任务。接下来,将用仿真的方法比较上述两种方案的差异,并使用准单色光源与宽谱光源对其结果进行验证。

### 3.1 准单色光源

光学设计仿真软件 FRED 可模拟偏振相干光的传递,以高斯光束分解(GBD)原理实现干涉系统的测量。经计算,WP 采用方解石材质( $\Delta n \approx 0.18$ ),假定成像放大率  $\beta = 1$ ,将光源设置为平行入射的相干光,探测器的行、列尺寸半径分别为  $3.828, 3.06 \text{ mm}$ 。考虑输入等强度的不同单色光谱线的组合:  $1064 \text{ nm}$  (Nd:YAG)、 $1550 \text{ nm}$  (InGaAsP)、 $1970 \text{ nm}$  (Hg),并以  $1064 \text{ nm}$  作为基准位置进行标定,比较 3 种探测方式的位置、强度与分辨率。

首先,在条纹平行于面阵的探测方式中,由  $\alpha = 2\Delta n \tan \theta$  解得 WP 结构角为临界值  $3.31^\circ$ 。如图 3(a)所示,如采用 2048 点快速傅里叶变换(FFT)反

演 320 pixel 的干涉图,还原结果显示 3 处谱线强度之比为  $0.9895:0.999:1$ ,后两处的位置误差同为  $-1 \text{ nm}$ ,  $1970 \text{ nm}$  谱线的峰值半峰全宽(FWHM)约  $31 \text{ nm}$ 。出现旁瓣是因为谱线复原过程并未切趾,同时 FFT 点数超过了实际采得的有效像素数。再次增加结构角至  $5^\circ$ ,反演 320 pixel 的干涉图,如图 3(b)所示,反演结果显示:  $1970 \text{ nm}$  谱线的半峰全宽虽然已降至  $20 \text{ nm}$ ,但  $1064 \text{ nm}$  谱线因采样频率不足已无法还原。

另外,如以  $\cot \phi = 3$  转角做双向剪切干涉,沿垂直方向拼接 3 段干涉图,可得到 768 pixel 完整双边干涉图。由  $160/N \leq p\alpha' \sin \phi \leq 0.5$  (其中  $\alpha'$  为原剪切量)解得 WP 结构角的参考范围为  $[4.43^\circ, 10.37^\circ]$ ,在仿真案例中使用  $10^\circ$  以获得较高的剪切量。仍然采用 2048 点 FFT 反演,图 3(c)显示 3 处谱线的强度之比为  $0.9958:0.9759:1$ ,后两处位置误差分别为  $1 \text{ nm}$  和  $-1 \text{ nm}$ ,而  $1970 \text{ nm}$  谱线的半峰全宽则降至  $13 \text{ nm}$ 。从准单色谱线位置与强度的复原精度上看,双向剪切干涉的复原能力与传统方式相当;从对应  $1970 \text{ nm}$  谱线位置的光谱分辨率来说,其分辨率由  $\Delta\lambda = 31 \text{ nm}$  提高至  $\Delta\lambda = 13 \text{ nm}$ ,前者为后者的 2.38 倍。说明双向剪切干涉的优势在于其很好地平衡了光谱范围与分辨率,使得像素数与干涉剪切量的范围得到扩展,在提高分辨率的同时仍能满足单像素采样的要求。以下对宽谱段吸收光谱的反演进行观测。

### 3.2 宽谱段反演

为进一步验证 WP 双向剪切干涉光谱仪的超分辨性能,以 ENVI 数据库中记录的棕榈蜡(carnauba wax)反射率光谱为例,复原该物质在  $1.06 \sim 1.97 \mu\text{m}$  谱段内的近红外数据。借助高斯光束分解的传播模型,FRED 软件在模拟衍射和干涉效应上具有显著的精确性。仿真中输入的光源采用准直的相干光,同时保证足够的光强与极小的发散角。探测器的像素数、旋转角度与程序放大率与此前设定的一致,暂假定不同波长处的辐射度曲线为 1。分别以单向剪切与双向剪切干涉的探测方式记录面阵上各光程差位置的辐照度,提取得到单行像素数与多列拼接构成的干涉图,如图 4 和图 5 所示。经去除直流偏置、三角形切趾后(如图 6 所示),分别就干涉图做基于 320 pixel 与 768 pixel 的双边傅里叶变换,取得不同采样点数的复原光谱与参考输入光谱,经过幅度归一化后,复原光谱及参考输入光谱如图 7 所示。

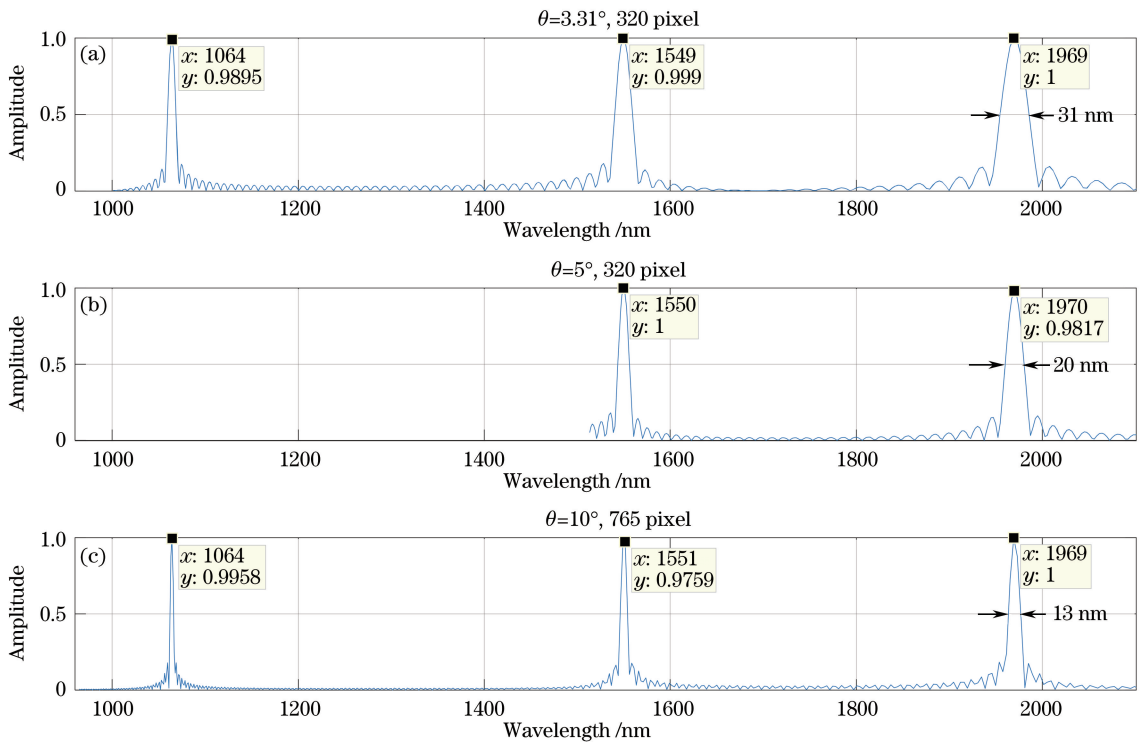


图3 不同剪切干涉方式对等强度准单色谱线的还原。(a)  $\theta=3.31^\circ$ , 320 pixel; (b)  $\theta=5^\circ$ , 320 pixel; (c)  $\theta=10^\circ$ , 765 pixel

Fig. 3 Laser lines recovery using interferograms of different pixels. (a)  $\theta=3.31^\circ$ , 320 pixel; (b)  $\theta=5^\circ$ , 320 pixel; (c)  $\theta=10^\circ$ , 765 pixel

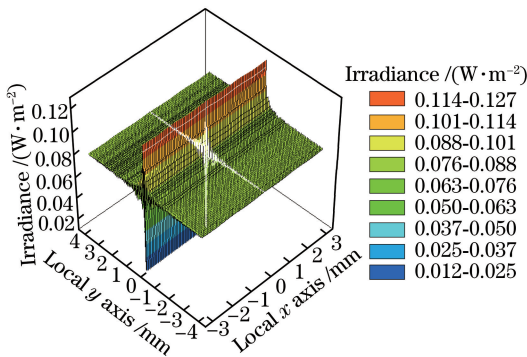


图4 单行采样时的辐照度二维分布

Fig. 4 Irradiance distribution of a single line

由图7可见:参考输入光谱(黑色点划线)在1728,1761 nm 两处存在吸收峰;由双向剪切干涉768 pixel 还原的光谱(红色实线)更能反映真实的轮廓特征,较好地显示了吸收特点;320 pixel 干涉图还原的光谱(蓝色虚线)因分辨率不足而没有刻画出1761 nm 附近的凹陷。768 pixel 复原光谱显示了1400 nm 附近的双峰,但320 pixel 复原光谱仅表现出缓慢的单峰,在较宽光谱波段出现的多处特征都未出现,再次证明了双向剪切的多列拼接干涉图不仅能有效提高光谱的分辨率,还能使短波不因

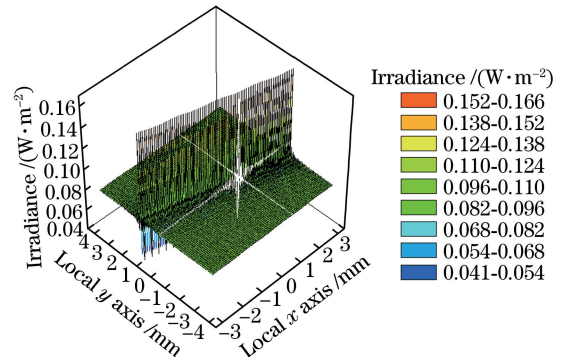


图5 倾斜拼接时辐照度的二维分布

Fig. 5 Irradiance distribution of oblique stitching

采样频率而截止。

然而,光谱复原的比较也显示了双向剪切干涉方案的不足,由于完整干涉图依靠拼接而成,光程差衔接误差造成了在1080~1140 nm 短波区域发生高频抖动。当然,合理设置拼接的倍数、降低单段光程差是可以使毛刺区域继续向短波方向移动的,甚至使其消失,但这样的设置在客观上会降低长波区域的光谱分辨率,因此在应用过程中仍需要结合分辨率指标加以权衡。这一点将在误差分析中结合双向剪切的像面转角容限展开讨论。

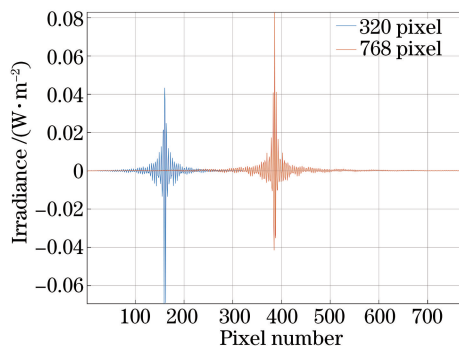


图6 单行 320 pixel 与多列 768 pixel 的切趾干涉图

Fig. 6 Interferogram of 320 pixel and 768 pixel after apodization

### 3.3 实验测试

将窄线宽激光器作为单波长均匀面光源进行实验,像面旋转之后的完整干涉图经光谱复原后可得到目标的光谱信息。以 RGB 公司窄线宽半导体激光器(NovaPro 激光器)作为光源,其输出波长为 785 nm,线宽为 0.1 pm,相干长度为 2 m。虽然 785 nm 并不在系统的设计波段内,但以其为波长基准可测试在更低空间频率的干涉图。因激光器的发散角较小,利用散射片和毛玻璃可得到均匀的面光源,由于输入光的单色性很好,故干涉条纹充满了整个视场。按二维光程比为 3 倍的设计角度,将 CCD 旋转 18.435°,截取双向剪切干涉图(如图 8 所示)。

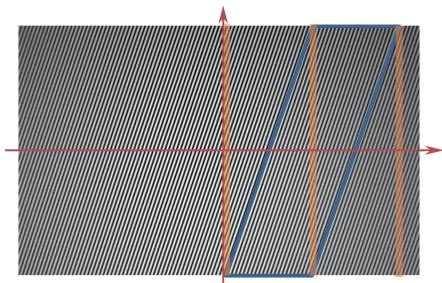


图8 CCD 旋转 18.435° 获取的干涉图

Fig. 8 Interferogram detected by CCD after rotating 18.435°

由图 8 可知,由于视场较大,干涉图出现了四周渐晕的现象。光源照射的不均匀和面阵像元响应的不一致,导致图中自零光程位置开始,顺序连接的 3 段光程(小双边)在拼接后并未达到理想化的统一照度水平,这种低频渐变的扰动将限制光谱的复原精度。为此,在像面按照既定的角度旋转之后,需要对系统进行辐射定标与平场校正,以扣除光束在传播过程中引入的低频渐变背景。由于普通光源的定域深度有限,光程差较大位置处的条纹可见度会进一步降低,因此通过设置合理的测量光程范围、提高光源的相干性、改善成像质量等措施可使光强分布更

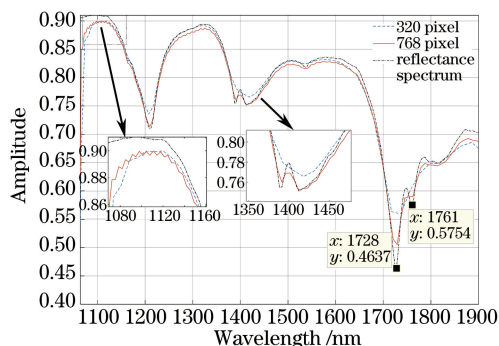


图7 不同采样点复原棕榈蜡的吸收光谱与参考输入光谱

Fig. 7 Absorption spectra of carnauba wax recovered with different sampling points and reference input spectrum

加均匀,这也是保证双向剪切干涉测量光程拼接有效性的前提<sup>[13]</sup>。对于大视场、宽谱段情况下的偏振干涉光谱仪的图谱,并非是完全傅里叶变换关系所能对应的,可以采用双折射干涉变换等方法提高复原精度<sup>[14]</sup>。

## 4 误差分析

基于双向剪切的光程差延拓思路,干涉光谱仪的分辨率主要取决于所拼接的段数,因此在连接相邻两段干涉图的边缘位置,因衔接导致的相位采样误差至关重要<sup>[15]</sup>。例如:结构装调、成像畸变、量化采集等带来的误差,均会涉及光学系统响应的均匀性问题。本研究仅对影响干涉图拼接精度的剪切量与旋转角进行分析,从指标需求出发来控制来控制剪切量与旋转角。对光谱复原的影响。假设像素的纵横尺寸相等,条纹不存在畸变,则可见光的干涉条纹如图 9 所示,其完整的干涉图由沿  $v$  分布、平行  $u$  的 3 段(1,2,3)拓展拼成,且条纹在探测空间  $u-v$  中的方向斜率为  $r$ ,单位距离在  $v$  方向的剪切量较小,在  $u$  方向的剪切量较大。

为了让分段干涉图满足奈奎斯特频率,避免相位采样在  $v$  方向上混叠,需要像素的尺寸为

$$p \leq \frac{1}{2f_v} = \frac{\lambda_{\min}}{4\beta\Delta n \tan \theta} \cdot \frac{1}{\sin \phi}, \quad (10)$$

当  $r > 1$  时,正交方向上会出现相位混叠,相位采样值的不确定性由  $f_u = f_v / r$  决定。由于探测像元是等间隔的离散点,因此在像素纵横尺寸相等的前提下,理论上  $r$  取整数值较易获得最佳的拼接结果。然而,实际中的转角因不确定性为  $\phi \pm \delta\phi$ ,故而导致按  $r' = |\tan(\phi \pm \delta\phi)|$  拼接的位置相位采样会出现偏差。对应距离为  $d_v$ 、转角为  $\phi + \delta\phi$  与  $\phi$  时的等相点差距为

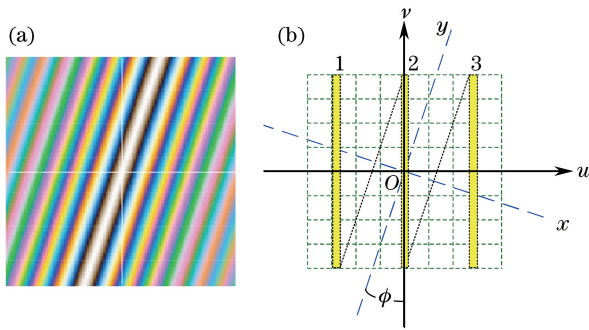


图9 干涉条纹以及与探测方向倾斜的光谱探测。

(a)干涉条纹仿真结果;(b)拼接采样模型

Fig. 9 Interferogram and spectrum detecting inclined to the detecting direction. (a) Simulation result;

(b) stitching sampling model

$$\delta d_u = \frac{d_v \delta \phi}{\cos^2 \phi} \quad (11)$$

如果界定  $u$  方向上的光程差变化  $\delta \Delta_u = f_u \cdot \delta d_u \leq \lambda/4$ , 则得到转角的不确定度为

$$\delta \phi \leq \frac{\lambda \sin 2\phi}{8\beta \alpha d_v} \quad (12)$$

可见,当放大率  $\beta$  一定时,随着转角  $\phi$  与波长  $\lambda$  的增加,剪切角  $\alpha$  与采样距离  $d_v$  减小,转角误差容限  $\delta \phi$  逐渐放宽。同时,根据应用的光谱分辨率要求,完整干涉图的光程差为

$$\Delta_{\max} = \cot \phi \cdot f_v d_v = \cos \phi \cdot \alpha \beta d_v \geq \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \quad (13)$$

上述误差容限分析将在确立光谱范围、分辨率指标与探测器参数后,对确立拼接段数、转角与分段光程差提供有效指导,从而尽量减小短波高频扰动,提高分辨率。

## 5 结 论

利用倾斜干涉条纹在探测面阵上的等相拼接,设计并分析了基于像面旋转的双向剪切 WP 干涉光谱仪,根据光程差的二维分布建立了折叠多列像素的拓展模型。从角度误差分析可知,干涉图的拼接精度与结构剪切量、像面旋转角等有关,需要从指标需求出发,具体控制其对光谱复原的影响。经过 FRED 模拟可知,无论是 Nd:YAG 激光等单色谱线的反演,还是棕榈蜡等连续吸收光谱的复原,双向剪切干涉依靠拓展最大光程差都增强了光谱分辨率。基于 FRED 对单色谱线与连续谱段干涉图谱的仿真分析可知,与相同探测器像素数目的单向剪切光学系统相比,新探测方式的光谱分辨率仿真结

果提高至原来的 2.38 倍,短波近红外光谱复原也显示出更多的吸收信息,但是会不可避免地在高频区域引入噪声。基于双向剪切干涉的光谱仪,在探测器单一维度的像素数与像元尺寸受限的情况下,避免了单纯提高干涉具剪切量带来的分辨率增强与高频截止的矛盾,提高了结构参数的求解范围以及相关的误差容限。值得一提的是,实际光源的处理与干涉定域深度等相关,若要扣除非干涉探测时照度分布的基底背景,则需要考虑像差、畸变等对拼接的影响,这有待后续进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Bell R. Introductory Fourier transform spectroscopy [M]. New York: Academic Press, 1972.
- [2] Hammer P, Peterson D, Smith W. Imaging interferometer for terrestrial remote sensing [C]. SPIE, 1993, 1937: 244-255.
- [3] Harvey A R, Fletcher-Holmes D W. Birefringent Fourier-transform imaging spectrometer [J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5368-5374.
- [4] Dong Y, Xiangli B, Zhao B C. 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.
- [5] Komisarek D, Reichard K, Merdes D, et al. High-performance non-scanning Fourier-transform spectrometer that uses a Wollaston prism array [J]. Applied Optics, 2004, 43(20): 3983-3988.
- [6] Wei R Y, Zhang X M, Zhou J S, et al. Calculations on optical path difference of a high-resolution reflecting scanning Fourier transform spectrometry [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0730001.  
魏儒义, 张学敏, 周锦松, 等. 反射式转镜干涉光谱仪光程差计算 [J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0730001.
- [7] Wang T, Niu M S, Bu M M, et al. Polarization-difference imaging system with adjustable optical path and its characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0711001.  
王田, 牛明生, 步苗苗, 等. 可调光程的差分偏振成像系统及其特性研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0711001.
- [8] Bu M M, Niu M S, Wang T, et al. Dual four-channel simultaneous interference imaging

- spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0811001.
- 步苗苗, 牛明生, 王田, 等. 双路四通道同时干涉成像光谱仪[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0811001.
- [9] Cai Q S, Bin X L, Du S S. Spatial heterodyne spectrometer based on the Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 239-245.
- [10] Takahashi S, Ahn, J S, Asaka S, *et al.* Multichannel Fourier transform spectroscopy using two-dimensional detection of the interferogram and its application to Raman spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 1993, 47(7): 863-868.
- [11] Lin X L, Zhou F, Wang H Y, *et al.* Spatially modulated interference imaging spectrometer based on Wollaston prisms [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1798-1802.
- 林栩凌, 周峰, 王怀义, 等. 采用 Wollaston 棱镜的空间调制干涉成像光谱仪 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1798-1802.
- [12] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C. Calculation of the optical path difference and fringe location in polarization interference imaging spectrometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 3877-3886.
- 穆廷魁, 张淳民, 赵葆常. 偏振干涉成像光谱仪中 Wollaston 棱镜光程差及条纹定位面的精确计算与分析 [J]. *物理学报*, 2009, 58(6): 3877-3886.
- [13] Xu Q, Pan F, Huang L, *et al.* Analysis of vectorial far-field characteristics of Laguerre-Gaussian beams by angular-spectrum method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0805001.
- 徐强, 潘丰, 黄莉, 等. 拉盖尔高斯光束矢量远场特性的角谱法分析 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0805001.
- [14] Zhang C M, Jian X H. Wide-spectrum reconstruction method for a birefringence interference imaging spectrometer [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 366-368.
- [15] Li M, Zhang A, Zhang J B, *et al.* Radial eccentricity error detection of primary mirror of large aperture telescopes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091103.
- 李敏, 张昂, 张俊波, 等. 大口径望远镜主镜径向偏心误差检测技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091103.