

文章编号: 0258-7025(2010)03-0652-06

Sagnac 棱镜对旋对光谱仪光谱分辨率影响的校正方法

李苏宁 朱日宏 沈 华

(南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

摘要 Sagnac 型静态干涉成像光谱仪中, Sagnac 棱镜的加工对旋误差对仪器的光谱分辨率会造成一定影响, 甚至会引入虚假谱信息。为了进一步提高光谱仪的光谱分辨率以及校正虚假谱, 重点推导了 Sagnac 棱镜在加工过程中由不对称半五角棱镜在胶合过程中产生的对旋误差与由该误差而引起的棱镜剪切量变化之间的关系, 分析了其对旋误差对光谱仪重构光谱的影响, 提出了采用 Forman 卷积法对该影响进行校正的方法。采用氢灯进行实验, 结果表明, 该校正方法对虚假谱的抑制作用明显, 且可显著提升光谱分辨率。

关键词 光学器件; 成像光谱技术; 校正; 对旋; 棱镜

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0652

Correction Effect to Spectral Resolution of Spectrometer Caused by Counter Rotating of Sagnac Prism

Li Suning Zhu Rihong Shen Hua

(Department of Optics Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract In the Sagnac static imaging spectroscopy, there would be impact on the spectral resolution of the spectrometer caused by counter rotating of the Sagnac prism, and even the fake spectrum would be brought in. In order to improve the spectral resolution of the spectrometer and remove the fake spectrum, the relationship between the counter rotating angle brought in when balsaming of the two semi-pentagonal prisms and the shearing displacement caused by which is deduced, the effect on spectral resolution caused by counter rotating error is analyzed, the correction method to the error using Forman convolution is discussed. The experiment was carried out using hydrogen lamp, the result shows that, the spectral resolution of the spectrum reconstructed after correction can be improved and the fake spectrum can be restrained dramatically, the correction result is good.

Key words optical devices; imaging spectroscopy; correction; counter rotating; prism

1 引 言

干涉成像光谱技术是当今可见光和红外遥感器探测技术的前沿科学, 是成像技术与光谱技术的有机结合, 具有多通道、高通量、高信噪比、测量快速、方便的优点^[1], 目前它已成为人们研究和获取目标三维信息(二维空间信息和一维光谱信息)的重要手段和前沿学科。其中基于 Sagnac 棱镜的三角共路

型静态干涉成像光谱技术由于其稳定的结构特性^[2]、优异的抗干扰性能、极高的光谱分辨率和很宽的光谱响应范围, 已经成为静态成像光谱技术中的典型代表^[3]。Sagnac 棱镜作为该类干涉成像光谱仪的核心部件, 其各项结构参数如折射率均匀性、加工面型误差、装配误差等都会对仪器的光谱分辨率造成影响, 因此如何校正由其装配误差而引起的光

收稿日期: 2009-04-15; 收到修改稿日期: 2009-07-02

作者简介: 李苏宁(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事精密光学仪器理论与技术等方面的研究。

E-mail: lsnlm@hotmail.com

导师简介: 朱日宏(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事精密光学仪器理论与技术等方面的研究。

E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

谱测量误差,就显得尤为重要。在 Sagnac 棱镜的制造和装配过程中,由其双棱镜的结构特点决定^[4],最容易引起的误差即为两半五角棱镜的对旋误差,因此将对此作重点讨论。

2 Sagnac 棱镜的工作原理

图 1 所示为 Sagnac 型干涉成像光谱仪的原理图,其系统结构由前置光学系统,狭缝, Sagnac 棱镜,傅里叶变换透镜,柱面镜和 CCD 接收靶面组成。其中狭缝处于前置光学系统的后焦面上,同时位于傅里叶透镜的前焦面上,而傅里叶透镜的出瞳面、柱面镜的焦面和 CCD 靶面三者位置重合。在工作状态时,从被测物体发出的光线经前置光学系统后在狭缝上聚焦形成一次像面,该一次像发出的光线进入 Sagnac 棱镜后被分成两束相同的光线,经傅里叶透镜准直后成为平行光,再经柱面镜聚焦后即可在 CCD 靶面上形成干涉条纹,通过对干涉条纹进行一系列的处理就可以得到被测物体的光谱。

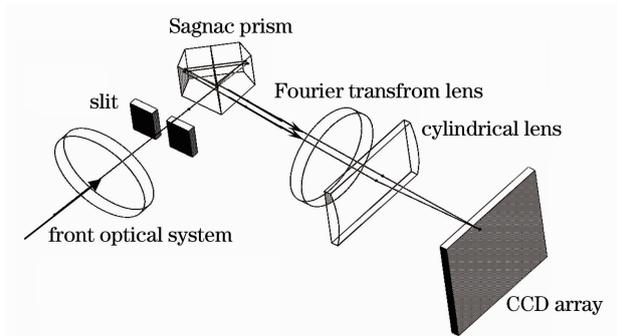


图 1 Sagnac 干涉成像光谱仪原理图

Fig.1 Schematic of Sagnac interference imaging spectrometer

图 2 即为 Sagnac 棱镜的原理示意图,该棱镜由两块半五角棱镜胶合而成,在胶合面 BG 上镀有半透半反膜,为分束面。由图可以很容易看出,若上半五角棱镜和下半五角棱镜尺寸完全相同,则在分束面反射的光线 2 经过 CD 面的反射后和透射的光线 6 将在 J 点相交,这样棱镜将只起到光路折转的作用。为了让棱镜同时实现分束的作用,将下半五角棱镜的反射面增加偏移量 L ,破坏棱镜关于分束面的对称结构,这样,在分束面反射的光线和透射光线经棱镜反射面反射后将分别交于下半五角棱镜反射面的 F 点和 E 点,即可实现对光线的分束,出射的两束光线 5 和 8 具有完全相同的性质。若将狭缝看成光源,则该光源发出的光线经 Sagnac 棱镜后,被剪切成两个完全一样的虚光源,这两个虚光源之间的距离 d 称为 Sagnac 棱

镜的剪切量,如图 3 所示,而下半五角棱镜的结构偏移 L 成为 Sagnac 棱镜的偏移量。

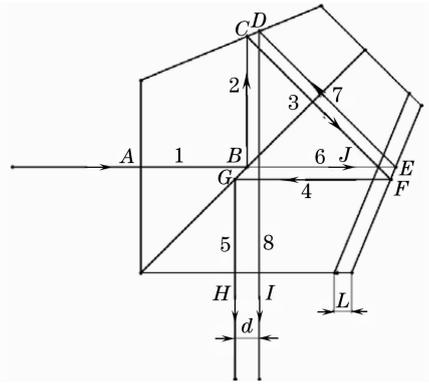


图 2 Sagnac 棱镜原理图

Fig.2 Structure and the optical path of Sagnac interferometer

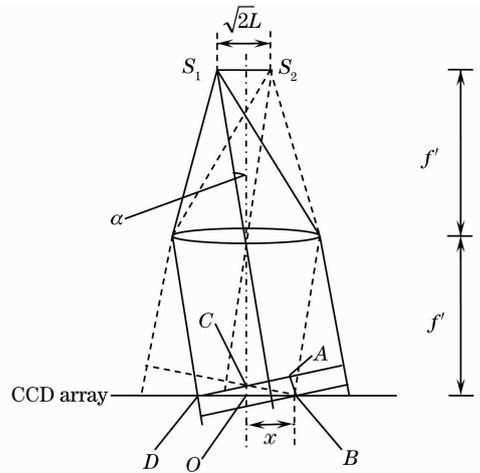


图 3 虚光源干涉示意图

Fig.3 Schematic of interference by virtual light sources

容易计算,

$$d = \sqrt{2}L, \tag{1}$$

在理想状态下,CCD 靶面上得到的干涉图曲线可表示为^[5]

$$I(\Delta) = 2RTB_0(\sigma)[1 + \cos(2\pi\sigma\Delta)], \tag{2}$$

$$\Delta = \frac{\sqrt{2}xL}{f'}, \tag{3}$$

式中 R 为目标物体的反射率, T 为目标物体的透射率, σ 为波数, $B_0(\sigma)$ 为对应像元的相对光谱强度, Δ 为 Sagnac 棱镜的两束出射光的光程差, f' 为傅里叶透镜的焦距。

由(2),(3)式可以看出,在理想情况下,干涉图曲线的相位差和 Sagnac 棱镜的偏移量 L 的关系为

$$\varphi = 2\pi\sigma\left(\frac{\sqrt{2}xL}{f'}\right), \tag{4}$$

进一步对干涉图进行傅里叶变换等相关处理即可得

到被测场景对应狭缝中的像元的光谱图^[6]。

3 Sagnac 棱镜对旋对复原光谱的影响

Sagnac 棱镜由两块半五角棱镜胶合而成,在实际制造和装配过程中,为了使得胶合面无气泡、胶层的厚度保持均匀,需要将两块半五角棱镜沿胶合面搓动,确定偏移量后再进行光照固化^[7]。而在这个过程中,就目前国内的工艺水平,偏移量的大小和精度是比较容易得到满足的,但由于两块棱镜的胶合面在胶合过程中的偏转和平移,两棱镜对的对旋难以完全消除,而对旋会造成 Sagnac 棱镜反射面的角度偏差,如图 4 所示,从而使两条出射光线的方向产生偏转^[8],最终影响 Sagnac 棱镜的剪切量,依照(4)式,可见对旋会直接对干涉图的相位差产生影响,从而降低仪器的光谱分辨率。

如图 5 所示,设空间标定坐标系为右手坐标系

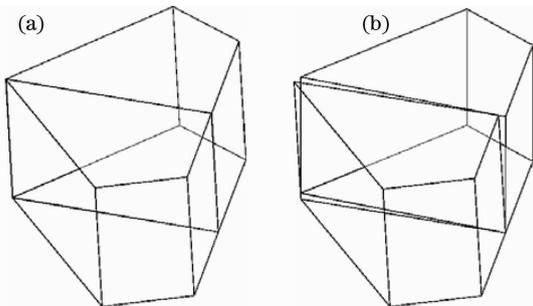


图 4 棱镜对旋示意图。无(a);有(b)对旋的棱镜结构
Fig. 4 Schematic diagram of counter rotating of Sagnac prism. sagnac prism without (a), with (b) counter rotating

XYZ,其中 Z 轴垂直纸面向外,入射坐标系同标定坐标系,为讨论棱镜的对旋特性,假设两块半五角棱镜均为理想棱镜,即在制造中不产生第一和第二平行差。在计算过程中,引入一旋转坐标系 $x'y'z'$,如图 5 所示,假设下半五角棱镜为定棱镜,上半五角棱镜绕旋转坐标系的 x 轴旋转一微量角度 $\beta, \beta \ll 1^\circ$, $x''y''z''$ 为出射坐标系。

设两块半五角棱镜的作用矩阵均为 \mathbf{R} ,则棱镜的物像关系式为^[9]

$$\mathbf{A}' = \mathbf{R}\mathbf{A}, \quad (5)$$

棱镜的转动公式为

$$\mathbf{A}' = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{A}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{A}' 为像向量, \mathbf{A} 为物向量, \mathbf{S} 为坐标转换矩阵, \mathbf{S}^{-1} 为该转换矩阵的逆矩阵。

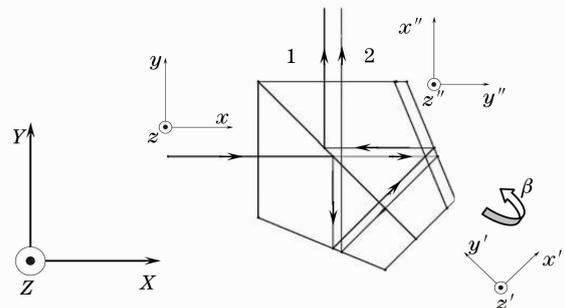


图 5 棱镜光线计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of calculation on Sagnac prism

入射光线进入棱镜后在分束面被分成两束,设在分束面反射的光线为光线 1,在分束面透射的光线为光线 2。则根据(5),(6)式可以分别计算出针对光线 1 和光线 2 的综合作用矩阵。对于光线 1,其综合作用矩阵为

$$\mathbf{R}_R = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}\beta^2 & \left(\frac{3}{4} - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)\beta^2 - \frac{1}{8}\beta^4 - 1 & -\frac{1}{8}(\sqrt{2} + 4\sin^2 22.5^\circ)[4 - 2\sqrt{2} - (1 - \sqrt{2})\beta^2]\beta^2 \\ 1 - \frac{1}{4}\beta^2 & \frac{1}{8}\beta^2(4\sqrt{2} - 2 + \beta^2) & \frac{1}{8}(\sqrt{2} + 4\sin^2 22.5^\circ)[-2\sqrt{2} - (1 - \sqrt{2})\beta^2]\beta^2 \\ \frac{\sqrt{2}}{2}\beta & \frac{(\sqrt{2} - 2)(2 - \beta^2)\beta}{2\sqrt{2} + 8\sin^2 22.5^\circ} & 1 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2} - 1\right)\beta^2 + \frac{1}{4}\beta^4 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

对于光线 2,其综合作用矩阵为

$$\mathbf{R}_T = \begin{pmatrix} \frac{(4\sqrt{2} - 2)\beta^2 + \beta^4 + \sqrt{2}\beta^6}{2\beta^4 + 8} & \frac{(6 - 4\sqrt{2})\beta^2 - \beta^4 - \sqrt{2}\beta^6 - 8}{2\beta^4 + 8} & \frac{(-2 + \beta^2)(\sqrt{2} - 2 - \frac{1}{2}\beta^4)\beta}{\beta^4 + 4} \\ 1 - \frac{1}{4}\beta^2 & \frac{1}{4}\beta^2 & -\frac{\sqrt{2}}{2}\beta \\ \frac{1}{2}\beta & \left(-\frac{1}{4} + \frac{\sqrt{2}}{4}\right)(\beta^2 + 2\sqrt{2})\beta & \frac{\sqrt{2}}{2}\beta^2 + \left(1 - \frac{1}{2}\beta^2\right)^2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

在入射坐标系中 YOZ 平面为像平面, X 轴为光束传播方向, 因此入射坐标系中的 y 轴和 z 轴的方向只对像面倾斜产生影响, 而 x 轴方向对出射光波阵面的方向产生影响, 在此只讨论后者。

假设入射光为一向量 \mathbf{A} , 其在标定坐标系的三个方向投影分别为 A_x, A_y, A_z , 由于只关注入射坐标系的 x 轴方向, 所以可以令

$$\begin{cases} A_x = 1 \\ A_y = 0, \\ A_z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

写成矩阵形式即为

$$\mathbf{A} = [1 \ 0 \ 0]^T, \quad (10)$$

在实际情况下, 对旋角 β 一般可以控制在 $5''$ 之内, 因此可以进行小量近似, 即

$$\sin \beta \approx \beta, \quad (11)$$

$$\cos \beta \approx 1 - \frac{\beta^2}{2}, \quad (12)$$

将(11), (12)式代入计算, 由(5), (6)式即可得到光线 1 和光线 2 相对于标定坐标系 XYZ 的出射坐标矩阵, 对于光线 1, 其出射坐标矩阵为

$$\mathbf{A}_1(\beta) = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}\beta^2 \\ 1 - \frac{1}{4}\beta^2 \\ \frac{\sqrt{2}}{2}\beta \end{pmatrix}, \quad (13)$$

对于光线 2, 其出射坐标矩阵为

$$\mathbf{A}_2(\beta) = \begin{pmatrix} \frac{(4\sqrt{2}-2)\beta^2 + \beta^4 + \sqrt{2}\beta^6}{2\beta^4 + 8} \\ 1 - \frac{1}{4}\beta^2 \\ \frac{1}{2}\beta \end{pmatrix}. \quad (14)$$

由(11), (12)式可以看出, 若在理想状况下, 应有 $\beta=0$, 此时

$$\mathbf{A}_1(0) = \mathbf{A}_2(0) = [0 \ 1 \ 0]^T, \quad (15)$$

即两条出射光线的方向都为标定坐标系的 Y 轴方向, 两者之间夹角为 0。

由此可见, 在实际情况下, 由于对旋角的存在, 使得 Sagnac 棱镜的两束出射光线不平行, 且两束出射光线偏离理想出射方向的角度均为对旋角 β 的函数, 即

$$\begin{cases} \alpha_1(\beta) = [\mathbf{A}_1(\beta)^T, \mathbf{A}_0] \\ \alpha_2(\beta) = [\mathbf{A}_2(\beta)^T, \mathbf{A}_0] \end{cases}, \quad (16)$$

这就使得后续光路中两虚光源的相对位置产生偏差, 即

$$d'(\beta) = \sqrt{2}L + L_\epsilon(\beta), \quad (17)$$

式中 $d'(\beta)$ 为两虚光源的实际相对距离, $L_\epsilon(\beta)$ 为由对旋引起的两虚光源的相对距离改变量, 两者均为对旋角 β 的函数。令 $\mathbf{A}_0 = [0 \ 1 \ 0]^T$ 为理想情况下的出射方向,

则

$$L_\epsilon(\beta) = f'[\tan \alpha_1(\beta) + \tan \alpha_2(\beta)]. \quad (18)$$

则由(4)式可得

$$\begin{aligned} \Delta'(\beta) &= \frac{d'x}{f'} = \frac{[\sqrt{2}L + L_\epsilon(\beta)]x}{f'} = \\ &= \frac{\sqrt{2}Lx}{f'} + \frac{\sqrt{2}L_\epsilon(\beta)x}{f'} = \Delta + \Delta_\epsilon(\beta), \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $\Delta_\epsilon(\beta)$ 为由对旋引起的光程差变化, 若将 β 控制在 2° 以内, 则如图 6 所示为 $L_\epsilon(\beta)$ 的曲线图, 也即 β 对光程差 Δ 的斜率造成的影响, 可见, 在 $\beta \leq 1^\circ$ 的情况下该影响可近似为线性, 但随着对旋角的增大, 该影响会迅速增大, 且明显为非线性, 这将会导致重构光谱的光谱分辨率降低甚至重构光谱的错误, 因此必须予以校正。

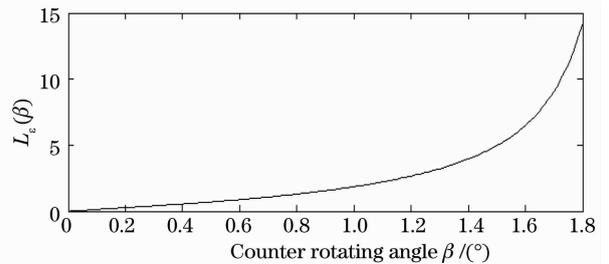


图 6 对旋角和棱镜剪切量关系曲线图

Fig. 6 Relationship between the counter rotating angle and the shearing displacement of the Sagnac prism

4 校正方法

在理想的干涉成像光谱仪中, 重构光谱 $B(\sigma)$ 的表达式为

$$B(\sigma) = 2 \int_0^\infty I(x) \cos(2\pi\sigma x) dx, \quad (20)$$

式中 $I(x)$ 为光谱仪所采集到的理想情况下的干涉图。

由 3 节可知, 在 Sagnac 棱镜存在对旋的情况下, 对旋的角度使得干涉图的光程差引入了误差 $\Delta_\epsilon(\beta)$, 即对于干涉图引入了相位误差 $\sigma_\epsilon(\beta)$, 所以(20)式应改写成

$$\begin{aligned} B'(\sigma) &= 2 \int_0^\infty I(x) \cos 2\pi[\sigma + \sigma_\epsilon(\beta)]x dx = \\ &= 2 \int_0^\infty I(x) \cos[\varphi + \varphi_\epsilon(\sigma, \beta)]x dx, \end{aligned} \quad (21)$$

结合(20)式, 将(21)式改写成复数形式, 即

$$B'(\sigma, \beta) = B(\sigma) \exp[i\varphi_\epsilon(\sigma, \beta)] = m_r(\sigma, \beta) + im_i(\sigma, \beta), \quad (22)$$

式中 $\exp[i\varphi_\epsilon(\sigma, \beta)]$ 为由对旋引入的相位误差因子。

通过(22)式可以看出,由棱镜对旋所引入的相位误差为

$$\varphi_\epsilon(\sigma, \beta) = \arctan[m_i(\sigma, \beta)/m_r(\sigma, \beta)]. \quad (23)$$

由于求解相位误差时不需要很高的光谱分辨率,因此在求解 $\varphi_\epsilon(\sigma, \beta)$ 的过程中,不需要对整幅双边干涉图进行计算,而只需要取零级干涉条纹附近的小双边对称干涉图进行傅里叶变换后,依照(23)式将虚部和实部相比后求反正弦,即可求出由对旋角误差 β 所引入的相位误差 $\varphi_\epsilon(\sigma, \beta)$ 。

在求出了相位误差之后,需将其去除,目前主要使用频域的 Mertz 乘法^[10]和时域的 Forman 卷积法^[11]以及其各种改进式^[6]去除相位误差,其中 Forman 卷积法去除非线性相位误差时有其优势^[12],由此,观察(21),(22)式,容易看出,此时的复

原光谱 $B'(\sigma)$ 和干涉图已经不成傅里叶变换对关系,而是与干涉图和相位误差因子的乘积成傅里叶变换对关系,由(22)式可知

$$B'(\sigma, \beta) \exp[-i\varphi_\epsilon(\sigma, \beta)] = B(\sigma). \quad (24)$$

在实际情况下,一旦棱镜胶合完成, β 即为定值,对后续计算可当作常数来计算。对(24)式做傅里叶逆变换,即可得

$$I'(x) * F(x) = I(x), \quad (25)$$

式中 $I'(x)$ 是采集得到的带有误差的干涉图, $I(x)$ 为校正后的干涉图,而 $F(x)$ 为相位误差因子倒数的傅里叶变换,因此,即可将由对旋产生的干涉图相位误差因子通过卷积的方法直接在时域即干涉图中去除。

5 实验结果

采用氢灯作实验光源进行试验,对所采集到的干涉图进行校正,结果如图 7,8 所示。

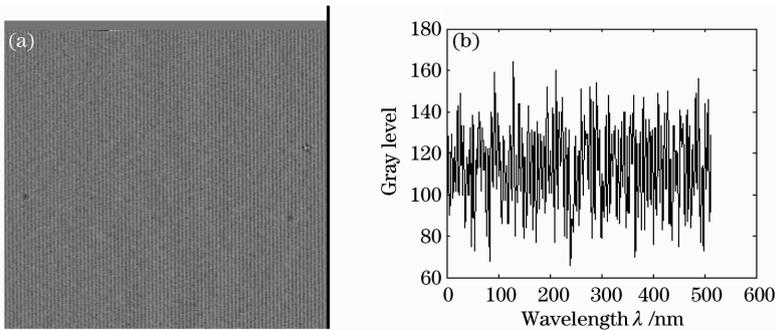


图 7 (a)采集到的干涉图;(b)干涉图曲线

Fig. 7 (a) Interferogram captured; (b) interferogram curve

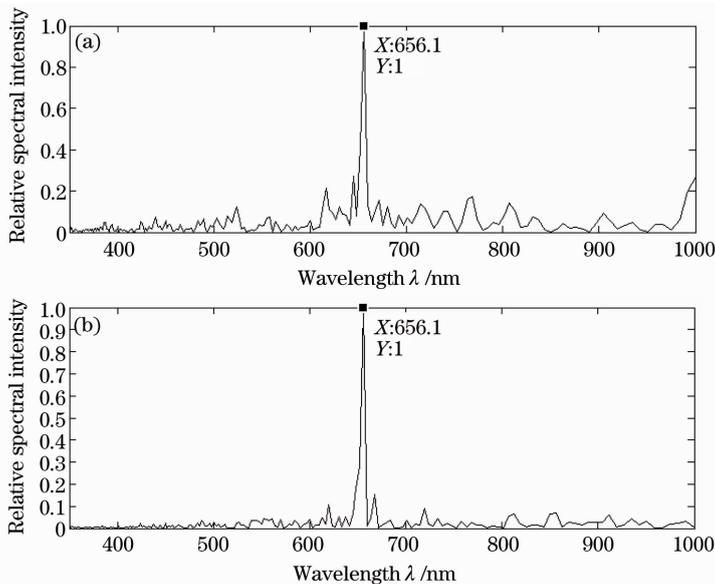


图 8 重构光谱。未经校正(a);经过校正(b)的重构光谱

Fig. 8 Spectrum reconstructed, spectrum reconstructed without (a); with (b) correction

图 7 所示为采集到的氢灯干涉图和干涉图曲线,图 8 即为重构光谱,其中图 8(a)为没有经过对旋校正的重构光谱,图 8(b)为采用 Forman 卷积法校正过的重构光谱。在图 8(a)中可以看到在谱段的高频和低频部分均有具有一定强度的峰值存在,但所使用的氢灯在这些谱段上并没有较强的峰值,因此这些峰值为虚假谱信息,同时由于光谱分辨率直接与谱线特征峰值的半峰全宽相联系,因此以特征谱线半峰全宽作为光谱分辨率的评价标准,在没有进行校正的情况下,该氢灯在 656.1 nm 处的特征谱线半宽为 5.5 nm,校正过后的谱线半峰全宽为 4.6 nm,较未校正的情况下提高了 16%,且由图 8(b)可以看出,校正过后的虚假谱被明显抑制,具有较好的校正效果。

6 结 论

在简要叙述 Sagnac 棱镜在三角共路干涉成像光谱仪中的作用和工作原理的基础上,对 Sagnac 棱镜装配过程中引入的对旋误差对光谱仪重构光谱的影响作了分析研究,采用 Forman 卷积法在时域中对干涉图进行处理,对由对旋误差引起的重构光谱误差进行了校正。由实验结果可见,通过该方法进行校正,不但可以提高光谱分辨率,还很好地抑制了由棱镜装配误差所引入的虚假谱信息。采用该方法,可以放宽棱镜的加工公差要求,减小加工难度,降低加工成本,同时还可以提高光谱仪的测量精度。

参 考 文 献

1 Lin Hai, Wang Xiaogang, Yang Shengfu *et al.*. Study of an intracavity laser absorption spectrometry incorporated with the Fourier transform spectrometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(11): 1008~1012
林海,王效刚,杨生福等. 用傅里叶变换光谱法记录激光腔内吸收光谱的研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(11): 1008~1012
2 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin. A new pipeline leakage detection

system based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its location technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 820~824
杭利军,何存富,吴斌. 一种新的直线型 Sagnac 光纤干涉仪管道泄漏检测系统及其定位技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 820~824
3 Xiangli Bin, Yuan Yan. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1869~1874
相里斌,袁艳. 单边干涉图的数据处理方法研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1869~1874
4 Zheng Defeng, Wang Xiangzhao, Li Zhongliang *et al.*. Dynamic measurement of small angle with two prisms[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1255~1259
郑德锋,王向朝,李中梁等. 一种使用双棱镜的动态小角度测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1255~1259
5 Li Zhigang, Wang Shurong, Li Futian. Data processing for interferogram of ultraviolet Fourier transform spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, **20**(2): 203~205
李志刚,王淑蓉,李福田. 紫外傅里叶变换光谱仪干涉图数据处理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2000, **20**(2): 203~205
6 Xing Ting, Wang Mochang, Gong Huixing. A method to improve the computing efficiency of Mertz method in Fourier transform spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(3): 355~359
邢廷,王模昌,龚惠兴. Mertz 法傅里叶光谱计算过程的改进[J]. *光学学报*, 1999, **19**(3): 355~359
7 Chen Liwu, Zhao Baochang, Yang Jianfeng *et al.*. The analysis of the relationship between angle tolerance of Sagnac prism and the spectrum differentiation of the interferometer spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1022~1027
陈立武,赵葆常,杨建峰等. Sagnac 棱镜角公差与干涉光谱仪光谱分辨率的关系分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1022~1027
8 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22
相里斌,赵葆常,薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光学学报*, 1998, **18**(1): 18~22
9 Tang Ziyi, Xu Yaohui, Wang Zhijian. Reflecting Prism[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981. 1~79
汤自义,须耀辉,王志坚. 反射棱镜[M]. 北京:国防工业出版社, 1981. 1~79
10 L. Mertz. Auxiliary computation for Fourier spectrometry [J]. *Infrared Phys.*, 1967, **7**(1): 17~23
11 M. L. Froman, W. H. Steel, G. A. Vanasse. Correction of asymmetric interferograms obtained in Fourier spectroscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(1): 59~61
12 J. H. Park. Analysis method for Fourier transform spectroscopy[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(6): 835~848