

# 静态傅里叶变换光谱仪补偿板的旋转对干涉图谱的调制研究

吕金光 梁静秋\* 梁中翥 秦余欣 田 超

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 在静态傅里叶变换光谱仪中,由于系统装调精度的限制,补偿板相对于分束板会产生一定角度的旋转。补偿板的旋转在横向会导致干涉图像发生错位,在纵向则会导致光程差的改变,致使干涉图像失真。通过对光束在补偿板中传播路径的计算,得到干涉图像的错位量和光程差的变化量与补偿板旋转角之间的函数关系,并根据函数关系计算和分析了补偿板的旋转导致的不同波长干涉图像的混叠和光谱的失真。对于补偿板旋转引入的相位误差,提出离散光谱序列解线性方程组的方法,有效实现了误差光谱的良好校正。

**关键词** 光谱学; 傅里叶变换光谱仪; 调制; 补偿板; 旋转角

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1130001

## Study on Interferogram-Spectrum Modulation by the Rotation of Compensation Plate in Static Fourier Transform Spectrometer

Lü Jinguang Liang Jingqiu Liang Zhongzhu Qin Yuxin Tian Chao

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Due to the restriction of systemical alignment precision in static Fourier transform spectrometer, the compensation plate may produce a definite rotation angle relative to beam splitter. The rotation of the compensation plate makes the interferogram dislocation and the optical path difference change, and then induces the interferogram image distortion. By means of the calculation to the propagation path of beam in compensation plate, the relationship between interferogram dislocation and optical path difference change and rotation angle of compensation plate is gained, and according to which, the aliasing of interferogram images from various wavelengths aliasing and the spectrum distortion are simulated and analyzed. Toward the phase error introduced by rotation of compensation plate, arithmetic of resolving the linear equation by discrete spectrum sequence is brought forward, the result indicates that the error spectrum can be corrected effectively.

**Key words** spectroscopy; Fourier transform spectrometer; modulation; compensation plate; rotation angle

**OCIS codes** 300.6190; 300.6300; 300.6340; 300.6380

## 1 引 言

近年来,随着一些高新科学技术领域的出现和发展,如空间探测、资源勘探、环境监控、气象监测、生命科学等领域的科学研究和工程应用,由于其特殊的应用环境和使用需求,对于微小型化、轻量化、稳定性好、可靠性强、可进行实时探测和非侵入式在线分析的光谱仪器提出了迫切的使用需求<sup>[1]</sup>。由于基于干涉调制原理的傅里叶变换光谱仪与色散光谱仪相比具有多通道、辐射通量大、杂散光低、波数准确、精度高等优点,

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(61376122, 61027010, 60977062)、国家 863 计划(2009AA04Z315)、吉林省科技发展计划(20130206010GX, 201205025, 20150520101JH, 20150204072GX)、长春市科技计划(2011131, 2013261)

作者简介: 吕金光(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事微小光学系统设计与光学信息处理方面的研究。

E-mail: jinguanglv@163.com

\*通信联系人。E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

因此在微小型化的同时能够满足光通量与信噪比的要求,可以以很高的分辨率研究发光很弱的辐射体<sup>[2-3]</sup>。目前广泛应用的傅里叶变换光谱仪器体积、重量过大,运行维护费用昂贵,而且对工作环境要求比较苛刻,因此微小型傅里叶变换红外光谱仪正成为国内外研究的热点。伴随着现代应用光学的进步,尤其是微光机电系统(MOEMS)技术的飞速发展,为傅里叶变换光谱仪朝着微小型化、轻量化的方向发展提供了技术支持。德国微结构技术研究所<sup>[4]</sup>和美国德克萨斯州立大学自动化研究所<sup>[5]</sup>等单位相继开展了电磁驱动和热电驱动的时间调制微小型傅里叶变换光谱仪的研究,瑞士纽沙特尔微技术研究所<sup>[6]</sup>等单位也开展了空间调制微小型傅里叶变换光谱仪的研究。本文的研究基于一种MOEMS多级微反射镜的静态傅里叶变换光谱仪,该光谱仪以MOEMS多级微反射镜对干涉光场进行空间分割并对干涉图像进行离散采样,空间调制结构增加了系统的稳定性和可靠性,降低了系统的体积和重量,可以有效实现光谱仪器的微小型化与轻量化。由于该光谱仪的系统性能对补偿板的旋转比较敏感,因此本文主要对该光谱仪中补偿板旋转导致的干涉光束错位与光程差变化进行分析,并对其引入的相位误差进行光谱校正研究。

## 2 仪器工作原理

微小型静态傅里叶变换光谱仪的工作原理如图1所示,平行光束经过扫描镜进入该光谱仪的干涉系统,干涉系统由分束板、补偿板与两个MOEMS多级微反射镜组成<sup>[7-8]</sup>,两个多级微反射镜正交摆放,从而将入射到干涉系统中的平行光束在横向空间进行光场分割,每一个分割基元对应着两个多级微反射镜特定的行与列。由于由某一多级微反射镜特定的行与另一多级微反射镜特定的列所反射的光束在分束器出射面发生相干时具有特定的光程差,所以每一个分割基元对应着一个特定的采样光程差,经过成像系统后在面阵探测器上对应着一个特定的干涉光强。

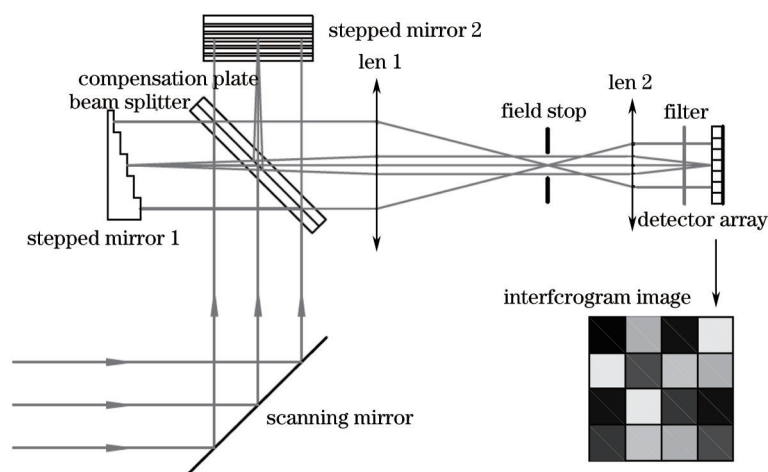


图1 静态傅里叶变换光谱仪工作原理图

Fig.1 Principle diagram of static Fourier transform spectrometer

两个多级微反射镜的阶梯高度遵循奈奎斯特-香农采样定理和光程差互补原则。设多级微反射镜的阶梯高度为 $d$ ,阶梯级数为 $M$ ,则横向光场 $(x,y)$ 所对应的光程差为:

$$\delta(x,y) = 2(My - x)d, \quad (1)$$

因此,横向光场 $(x,y)$ 所对应的干涉图的函数形式为:

$$I(x,y) = \int_0^\infty B(\nu) \exp[j2\pi\nu(My - x)2d] d\nu, \quad (2)$$

式中 $\nu=1/\lambda$ 为光信号的波数, $B(\nu)$ 为光信号的光谱。

对于干涉图采样序列进行离散傅里叶变换运算,就可以解调出入射光信号频域的光谱信息。

## 3 计算分析与光谱校正

分束器采用平行平板结构,由于分束板材料的色散特性,其对不同波长的光表现出不同的折射率数值,

从而导致不同波长的光经过分束板后具有不同的光程长度。为了使被分束板分开的两路所有波长的光经过分束系统后对应相同的光程差,需要在系统中加入与分束板具有相同材料和厚度的补偿板,从而使得各个波长之间的光程差得到补偿<sup>[9-10]</sup>。由于分束板与补偿板装调精度的限制,两者之间不可能完全的平行,补偿板相对于分束板会有一个微小的旋转角,如图2所示。图中虚线为补偿板的理想位置,实线为补偿板的实际位置。

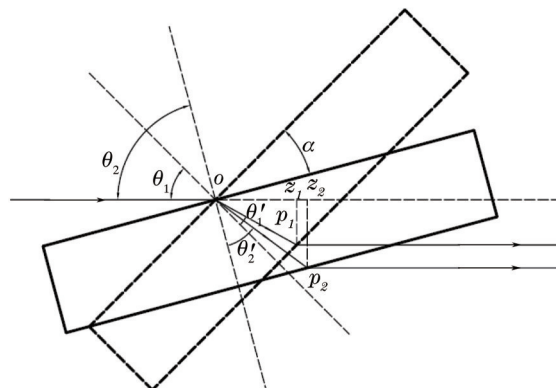


图2 补偿板旋转导致的光束传播路径的改变

Fig.2 Change of optical path induced by rotation of compensation plate

图2显示了补偿板旋转误差导致的光束在补偿板中传播路径的改变。可以看出,补偿板的旋转导致光束向下发生平移,并且在补偿板中传播的光程发生改变。光束的平移会使对应阶梯之间的干涉光束产生错位,光程的改变会使两束相干光的光程差产生一个变化量。

### 3.1 补偿板旋转引起的光束横移

设补偿板材料的折射率为 $n(\lambda)$ ,补偿板的厚度为 $b$ ,理想情况下由分束板出射的平行光束对补偿板的入射角为 $\theta_1$ ,光束在补偿板中的折射角为 $\theta_1'$ ,则由光的折射定律,光束在补偿板中传播的距离为:

$$l_{op_1} = \frac{bn(\lambda)}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2\theta_1}}, \quad (3)$$

通过计算,出射光束相对于入射光束的横向偏移量为

$$l_{p_1z_1} = l_{op_1} \sin(\theta_1 - \theta_1') = b \sin \theta_1 - \frac{b \sin \theta_1 \cos \theta_1}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2\theta_1}}, \quad (4)$$

设实际过程中补偿板相对于其理想位置的旋转角为 $\alpha$ ,则补偿板发生旋转后光束对补偿板的入射角变为

$$\theta_2 = \theta_1 + \alpha, \quad (5)$$

同理可以得到,补偿板旋转 $\alpha$ 角后光束的横向偏移量为:

$$l_{p_2z_2} = b \sin(\theta_1 + \alpha) - \frac{b \sin(\theta_1 + \alpha) \cos(\theta_1 + \alpha)}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2(\theta_1 + \alpha)}}, \quad (6)$$

由于两相干光束的横向偏移会引起干涉图像的错位,因此补偿板旋转 $\alpha$ 角后干涉图像的错位量为 $\Delta_x = l_{p_2z_2} - l_{p_1z_1}$ ,将(4)式和(6)式代入,可得:

$$\Delta_x = b \left[ \sin(\theta_1 + \alpha) - \sin \theta_1 - \frac{\sin(\theta_1 + \alpha) \cos(\theta_1 + \alpha)}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2(\theta_1 + \alpha)}} + \frac{\sin \theta_1 \cos \theta_1}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2\theta_1}} \right], \quad (7)$$

补偿板采用ZnSe材料,取其厚度 $b$ 为10 mm,入射角 $\theta_1$ 为 $45^\circ$ ,则干涉图像错位量随补偿板旋转角 $\alpha$ 的变化关系曲线如图3所示。

由图3可以看出,干涉图像的错位量与补偿板旋转角之间基本成准线性关系,补偿板每旋转0.01 rad,错位量增加约 $70 \mu\text{m}$ 。由于多级微反射镜的阶梯宽度为1 mm,所以补偿板每旋转0.01 rad,相对错位量增加

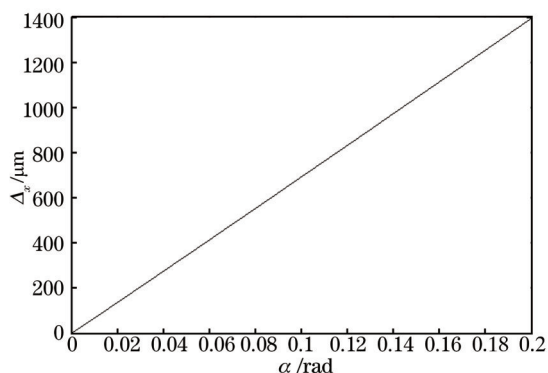


图3 错位量与旋转角之间的关系

Fig.3 Relationship between dislocation quantity and rotation angle

7%。若要求相对错位量小于1%,即错位量小于10 μm,则补偿板的旋转角应小于1.5 mrad。

### 3.2 补偿板旋转引起的程差变化

根据(3)式,理想情况下光束在补偿板中传播的光程为:

$$L_{\overline{OP}_1} = n(\lambda) \cdot l_{OP_1} = \frac{bn^2(\lambda)}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2\theta_1}}, \quad (8)$$

同理可得补偿板旋转α角后光束在补偿板中传播的光程为:

$$L_{\overline{OP}_2} = \frac{bn^2(\lambda)}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2(\theta_1 + \alpha)}}, \quad (9)$$

根据图2, Z<sub>1</sub>与Z<sub>2</sub>之间的距离为:

$$l_{Z_1Z_2} = l_{OZ_2} - l_{OZ_1} = l_{OP_2} \cos(\theta_2 - \theta'_2) - l_{OP_1} \cos(\theta_1 - \theta'_1), \quad (10)$$

通过计算整理,可得:

$$l_{Z_1Z_2} = b \cos(\theta_1 + \alpha) - b \cos \theta_1 + \frac{b \sin^2(\theta_1 + \alpha)}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2(\theta_1 + \alpha)}} - \frac{b \sin^2 \theta_1}{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta_1}}, \quad (11)$$

因此,补偿板旋转α角后,光程差的变化量为 Δ<sub>s</sub> = 2(L<sub>OP<sub>2</sub></sub> - L<sub>OP<sub>1</sub></sub> - l<sub>Z<sub>1</sub>Z<sub>2</sub></sub>),将(8)式、(9)式和(11)式代入,可得:

$$\Delta_s = 2b[\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2(\theta_1 + \alpha)} - \sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta_1} - \cos(\theta_1 + \alpha) + \cos \theta_1], \quad (12)$$

补偿板采用ZnSe材料,厚度b为10 mm,入射角θ<sub>1</sub>为45°,当波长λ=3 μm时,光程差变化量与补偿板旋转角α之间的关系如图4所示。

由图4可以看出,补偿板的旋转导致光程差的改变,光程差变化量与补偿板旋转角之间成准线性关系,补偿板每旋转1 mrad,光程差增加约10 μm。

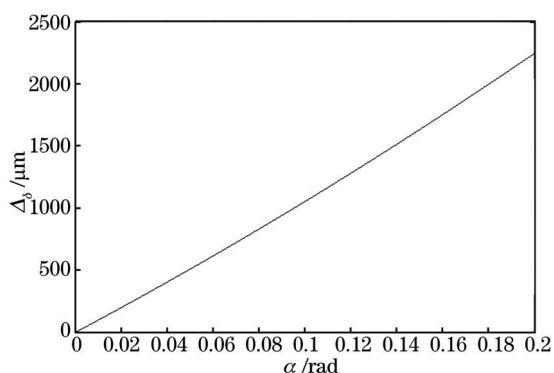


图4 光程差变化量与旋转角之间的关系

Fig.4 Relationship between optical path difference variation and rotation angle

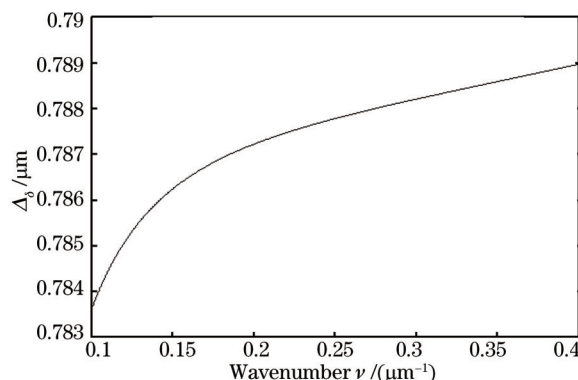


图5 光程差变化量的频率特性曲线

Fig.5 Frequency character curve of optical path difference variation

对于宽带光信号来说,由于补偿板材料的色散特性,不同波长的光对应着不同的折射率值,从而使得补偿板的旋转导致不同波长的光具有不同大小的光程差改变,进而引起不同波长的光所对应的干涉图之间发生混叠。当补偿板的旋转角 $\alpha$ 为0.08 mrad时,光程差变化量的频率特性如图5所示。

由图5可以看出,光程差变化量是随着光信号频率的增加而递增的,所以高频光信号具有较大的光程差变化量。当光波频率 $\nu=0.1 \mu\text{m}^{-1}$ 时, $\Delta_s=0.7836 \mu\text{m}$ ;当 $\nu=0.4 \mu\text{m}^{-1}$ 时, $\Delta_s=0.789 \mu\text{m}$ ;光程差变化量相差5.4 nm。

由以上分析可知,补偿板的旋转导致的实际光程差变为:

$$\delta(x, y, \nu) = \delta(x, y) + \Delta_s(\nu) = 2(My - x)d + \Delta_s(\nu), \quad (13)$$

此时,干涉图像函数可以表示为:

$$I(x, y) = \int_0^\infty B(\nu) \exp\{j2\pi\nu[\delta(x, y) + \Delta_s(\nu)]\} d\nu, \quad (14)$$

当波长范围为2.5~10  $\mu\text{m}$ ,不同的旋转角 $\alpha$ 所对应的干涉图像分布如图6和图7所示。

图6和图7分别为补偿板旋转角 $\alpha=0$  mrad和 $\alpha=0.08$  mrad所对应的干涉图像,从两幅图的对比可以看出,补偿板的旋转导致干涉图像失真,干涉条纹对比度下降,某些光程差位置发生对比反转。



图6  $\alpha=0$  mrad对应的理想干涉图像

Fig.6 Interferogram corresponding to  $\alpha=0$  mrad



图7  $\alpha=0.08$  mrad对应的干涉图像

Fig.7 Interferogram corresponding to  $\alpha=0.08$  mrad

将两幅干涉图像按照光程差的顺序进行数据重排,还原为一维的干涉图序列,然后通过离散傅里叶变换,得到理想光谱与补偿板旋转导致的复原光谱<sup>[11-13]</sup>,如图8和图9所示。

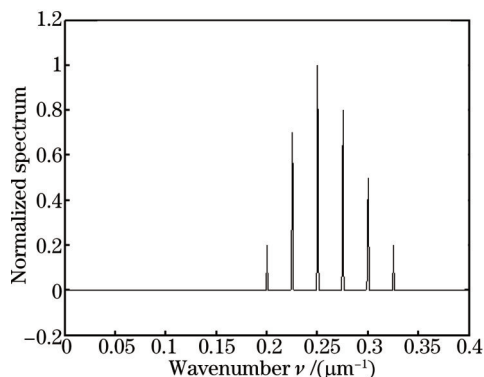


图8  $\alpha=0$  mrad对应的理想光谱

Fig.8 Spectrum corresponding to  $\alpha=0$  mrad

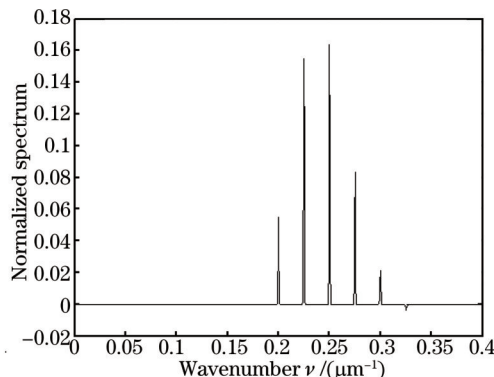


图9  $\alpha=0.08$  mrad对应的复原光谱

Fig.9 Spectrum corresponding to  $\alpha=0.08$  mrad

图8和图9分别是补偿板旋转角 $\alpha=0$  mrad对应的理想光谱和 $\alpha=0.08$  mrad所对应的复原光谱图。从两幅图的对比可以看出,补偿板的旋转导致复原光谱的谱线发生衰减,并且各频率谱线之间的相对强度发生变化,频率越高的光信号,其谱线衰减的越严重,一些强度比较弱的谱线甚至变为负值,如图9中最高频率的那条谱线。

由干涉图(14)式可以看出,补偿板旋转带来的光程差变化量使得复原光谱中产生一个附加相位,即:

$$\varphi(\nu) = 4\pi\nu b[\sqrt{n^2(\nu) - \sin^2(\theta_1 + \alpha)} - \sqrt{n^2(\nu) - \sin^2\theta_1} - \cos(\theta_1 + \alpha) + \cos\theta_1], \quad (15)$$

附件相位的频率特性曲线如图10所示。



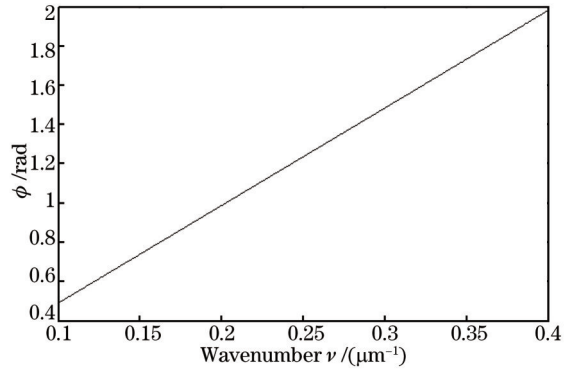


图 10 附加相位的频率特性曲线

Fig.10 Frequency character curve of the additive phase

由附加相位的频率特性可以看出,附加相位是随着光信号频率的增加而单调递增的,频率越高的光信号,附加相位越大。当附加相位增加到 $\pi$ 时,光信号的相位错动半个周期,干涉图像的黑白条纹发生对调,从而发生对比反转<sup>[14]</sup>。

因此,为了避免干涉图像对比反转的发生,同时也为了避免复原光谱变为负值,附加相位应小于 $\pi$ ,即 $\varphi(\nu) \leq \pi$ 。由(15)式,补偿板旋转角应满足关系

$$\alpha \leq \arccos\left(\frac{n^2 - 1 - C^2}{2C}\right) - \theta_1, \quad (16)$$

式中  $C = \frac{1}{4b \cdot B_w} + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1} - \cos \theta_1$  为常数,  $B_w = \nu_{\max} - \nu_{\min}$  为光信号的带宽。带入系统参数,补偿板的旋转角应满足  $\alpha \leq 0.17$  mrad。

根据 3.1 节和 3.2 节的分析和讨论可见,补偿板的旋转精度需要控制在 0.17 mrad 以内。

### 3.3 补偿板旋转角引入相位误差的光谱校正

由于补偿板旋转误差的存在,从而给系统的性能带来一定的影响。为了降低补偿板旋转误差的影响,采用一种离散光谱序列解线性方程组的方法代替傅里叶变换来反演宽带光信号的光谱。

对于理想情况而言,干涉图函数是实值偶函数,则其傅里叶变换也是实值偶函数<sup>[14]</sup>,因此应用离散傅里叶变换可以从干涉图中解调出理想的光谱。但是对于含有相位误差的干涉图函数,干涉图失去了其偶对称性,其傅里叶变换为厄米型函数,除了实部之外,还会产生虚部,而理想光谱的数学模型是实值函数,所以应用傅里叶变换就会产生误差。由于干涉图函数本质上是光谱的余弦变换<sup>[1]</sup>,因此,可以在余弦变换中引入相位误差量,还原干涉图函数的实际形式,从实际的干涉图函数形式出发,去反演出光信号的光谱。

根据数字信号处理理论,对于采样干涉图序列来说,其采样间隔为  $X$ , 采样点数为  $N$ , 则其频域的光谱分辨率为  $\frac{1}{NX}$ 。因此,在频域以光谱分辨率对光信号的频率进行离散,并不会丢失空域干涉图函数的信息。对光信号的频率进行离散,从而可以得到离散的光谱序列。此时,令  $\delta_n = nX$ ,  $I(\delta_n) = I(n)$ ,  $\nu_k = \frac{k}{NX}$ ,  $B(\nu_k) = B(k)$ ,  $\phi(\nu_k) = \phi(k)$ , 只取(14)式的实部,将干涉图函数的傅里叶积分离散为级数求和的形式:

$$I(n) = \sum_{k=0}^{N-1} B(k) \cos\left[2\pi \frac{k}{NX} nX + \phi(k)\right] = \sum_{k=0}^{N-1} B(k) \cos\left[2\pi \frac{kn}{N} + \phi(k)\right], \quad (17)$$

将其写为矩阵形式如下:

$$\mathbf{I} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}, \quad (18)$$

式中  $\mathbf{I} = [I(0), I(1), I(2), \dots, I(N-1)]^T$ ,  $\mathbf{B} = [B(0), B(1), B(2), \dots, B(N-1)]^T$ ,

$$A = \begin{bmatrix} \cos[\phi(0)] & \cos[\phi(1)] & \cos[\phi(2)] & \cdots & \cos[\phi(N-1)] \\ \cos[\phi(0)] & \cos\left[\frac{2\pi}{N} + \phi(1)\right] & \cos\left[\frac{2\pi}{N} \cdot 2 + \phi(2)\right] & \cdots & \cos\left[\frac{2\pi}{N}(N-1) + \phi(N-1)\right] \\ \cos[\phi(0)] & \cos\left[\frac{2\pi}{N} \cdot 2 + \phi(1)\right] & \cos\left[\frac{2\pi}{N} \cdot 2 \times 2 + \phi(2)\right] & \cdots & \cos\left[\frac{2\pi}{N} \cdot 2(N-1) + \phi(N-1)\right] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos[\phi(0)] & \cos\left[\frac{2\pi}{N}(N-1) + \phi(1)\right] & \cos\left[\frac{2\pi}{N} \cdot 2(N-1) + \phi(2)\right] & \cdots & \cos\left[\frac{2\pi}{N}(N-1)(N-1) + \phi(N-1)\right] \end{bmatrix}, \quad (19)$$

解线性方程组(18)式,便可以得到补偿板旋转角 $\alpha$ 为0.08 mrad的相位校正光谱,如图11所示。

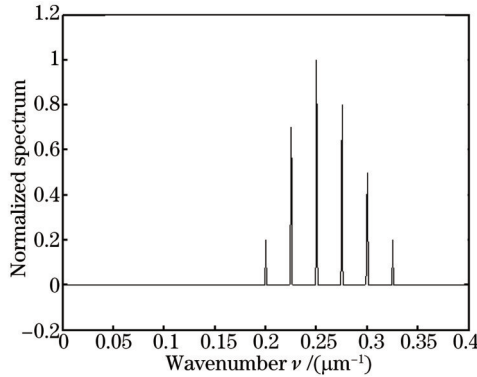


图11 解线性方程组复原的校正光谱

Fig.11 Corrected spectrum recovered by resolving linear equation

通过比较图8和图11可以看出,通过离散光谱序列解线性方程组可以对补偿板旋转引入相位误差的干涉图实现良好的光谱校正。因此,利用该算法,可以降低系统装调过程中补偿板的旋转精度要求。

## 4 结 论

对静态傅里叶变换光谱仪中补偿板的旋转引入的各种误差进行了分析和计算。补偿板的旋转在横向空间导致两相干光束之间发生横移,进而导致干涉图像发生错位。干涉图像错位量与补偿板的旋转角之间成准线性关系,补偿板每旋转1 mrad,错位量增加约7  $\mu\text{m}$ 。补偿板的旋转在纵向空间导致两相干光束之间的光程差发生变化。光程差与补偿板的旋转角之间成准线性关系,补偿板每旋转1 mrad,光程差增加约10  $\mu\text{m}$ 。对于宽带光信号来说,由于补偿板材料的色散特性,不同波长的光信号因补偿板的旋转会产生不同大小的光程差增量,从而导致不同波长光信号的干涉图像之间发生混叠,最终导致复原光谱的失真。补偿板旋转在空间域表现为引入光程差增量,在复原光谱中则表现为引入一个附加相位,该附加相位会导致干涉图像发生对比反转,同时会衰减光信号谱线的强度,并且频率越高的光信号,其谱线强度衰减的越严重。为了降低补偿板的装调精度要求,又不致使光谱失真严重,本论文采用离散光谱序列解线性方程组的方法进行信号光谱的复原,结果显示,该方法可以对补偿板旋转引入相位误差的干涉图像进行有效的光谱反演。

## 参 考 文 献

- 1 Weng Shifu. Fourier Transform Infrared Spectrometer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 73-80.  
翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱仪[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 73-80.
- 2 Tian Erming, Zhang Jilong, Li Xiao, *et al.*. Study on miniature static Fourier transform spectrometer used in laser warning receiver[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 853-857.  
田二明, 张记龙, 李 晓, 等. 激光告警系统中小型静态傅里叶变换光谱仪的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 853-857.
- 3 Lin Dejiao, Hirai Akiko, Matsumoto Hiokazu, *et al.*. Fourier transform spectrometer modulated by rotary grating[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(5): 409-412.  
林德教, 平井亚纪子, 松本弘一, 等. 旋转光栅调制傅里叶变换频谱仪[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 409-412.
- 4 Ulrike Wallrabe, Christian Solf, Jurgen Mohr, *et al.*. Miniaturized Fourier transform spectrometer for the near infrared wavelength regime incorporating an electromagnetic linear actuator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 123-124: 459-467.

- 5 Jeongsik Sin, Woo Ho Lee, Dan Popa, *et al.*. Assembled Fourier transform micro-spectrometer[J]. SPIE, 2006, 6109: 610904.
- 6 Omar Manzardo. Micro-sized Fourier Spectrometers[D]. Neuchatel: University of Neuchatel institute of microtechnique, 2002: 29-54.
- 7 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222006.  
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222006.
- 8 Lv Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Study on wedge error of beam splitter in spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1030001.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 空间调制傅里叶变换红外光谱仪分束器楔形误差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1030001.
- 9 Lv Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Study on chromatic dispersion of beam splitter in spatially modulated Fourier transform spectrometer[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(14): 140702.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥. 空间调制傅里叶变换光谱仪分束器色散特性研究[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 140702.
- 10 Yang Xiaoxu, Zhou Sizhong, Xiangli Bin, *et al.*. Studies on nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1388-1392.  
杨晓许, 周泗忠, 相里斌, 等. 转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非线性的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1388-1392
- 11 Lv Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Study on spectrum inversion of spatially modulated Fourier transform spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1694-1699.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥. 空间采样傅里叶变换光谱仪光谱反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1694-1699.
- 12 Liu Yong, Wu Jiandong, Zhu Ling, *et al.*. Spectral recovery in fiber Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1697-1700.  
刘 勇, 巫建东, 朱 灵, 等. 光纤傅里叶变换光谱仪光谱复原技术研究[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1697-1700.
- 13 Zhang Minjuan, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, *et al.*. Fast spectral rebuildg arithmetic of PEM-FTS nonlinear phase interferogram data[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0515001.  
张敏娟, 王召巴, 王志斌, 等. PEM-FTS非线性干涉信号的快速光谱反演算法[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0515001.
- 14 Lv Naiguang. Fourier Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 303-304.  
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 303-304.

栏目编辑: 刘丰瑞