

# 空间调制傅里叶变换红外光谱仪分束器楔形误差分析

吕金光<sup>1</sup> 梁静秋<sup>1\*</sup> 梁中翥<sup>1</sup> 秦余欣<sup>1</sup> 田超<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 由于空间调制傅里叶变换红外光谱仪中分束器加工精度的限制,分束器基片会存在一定的楔形误差。通过对光束在分束器中传播特性的分析,计算得到楔形误差的楔角引入的光程差改变,进而获得干涉光强和复原光谱与楔角之间的函数关系;通过数值仿真发现,楔形误差会导致复原光谱中谱线向低频方向发生频移,并且会降低光谱的分辨率。通过理论分析,得到波数精度与光谱分辨率所对应的楔角误差容限。针对于楔形误差导致的干涉图像光强分布变化,提出了利用离散光谱序列解线性方程组的光谱校正方法,取得了满意的光谱校正效果。

**关键词** 光谱学;分束器;楔形误差;误差分析

中图分类号 O433.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1030001

## Analysis of Wedge Error of Beam Splitter in Spatial Modulation Fourier Transform Infrared Spectrometer

Lü Jinguang<sup>1</sup> Liang Jingqiu<sup>1</sup> Liang Zhongzhu<sup>1</sup> Qin Yuxin<sup>1</sup> Tian Chao<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Due to the restriction of manufacture precision to beam splitter in spatial modulated Fourier transform infrared spectrometer, the wedge error will be existed on the substrate of beam splitter. Through the analysis of the propagation characteristics of the beam in beam splitter, the deviation of optical path difference caused by the wedge angle is gained, and then the functional relations between interference irradiance and wedge angle error, recovered spectrum and wedge angle error are obtained. The result shows that the wedge error can induce the spectral line shift to lower frequency and reduce the spectral resolution by means of simulation. After the theoretical analysis, the error tolerance of wedge angle under the wavenumber precision and spectral resolution is gained. Aiming at the interferogram intensity distribution influenced by wedge angle, a method of spectrum correction resolving the linear equation by discrete spectrum sequence is put forward, and the correction effect is proved well.

**Key words** spectroscopy; beam splitter; wedge error; error analysis

**OCIS codes** 300.6190; 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,由于其特殊的应用环境和使用需求,微小型化、轻量化、可靠性好、可进行实时探测和非侵入式在线分析的光谱仪器受到越来越多的关

收稿日期: 2014-06-04; 收到修改稿日期: 2014-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(61027010,60977062,61376122)、国家高技术研究发展计划(2009AA04Z315)、吉林省科技发展计划(201205025,20130206010GX)、长春市科技计划(2011131,2013261)、应用光学国家重点实验室自主基金

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

注<sup>[1-2]</sup>。傅里叶变换光谱仪具有多通道、高通量、高精度、低杂光、宽光谱和高分辨等优点,使得其在微小型化的同时能够满足光通量与信噪比的要求,成为国内外研究的热点。为了实现傅里叶变换光谱仪的微小型化,德国微结构技术研究所和美国德克萨斯州立大学自动化研究所相继开展了时间调制微小型傅里叶变换光谱仪的研究,利用电磁驱动或热电驱动进行程差扫描,在时间维度上获得干涉图序列,但高精度动镜驱动系统的制造与精确控制成为技术困难<sup>[3-4]</sup>。同时,瑞士纽沙特尔微技术研究所和中国电子测试技术国家重点实验室开展了空间调制微小型傅里叶变换光谱仪的研究,但其存在的问题是探测器像元分辨率限制了光谱分辨率的极限<sup>[5-6]</sup>。针对时间调制微小型傅里叶变换光谱仪高精度动镜驱动系统的制造与精确控制困难和空间调制微小型傅里叶变换光谱仪光谱分辨率受到探测器像元尺寸的限制问题,本课题组提出了一种基于多级微反射镜的空间调制傅里叶变换光谱仪结构,其干涉系统由分束器与两块多级微反射镜所构成,该干涉系统基于时间相干的基本光学原理,利用多级微反射镜空间光程差调制技术,多级微反射镜采用微光机电

系统工艺制作<sup>[7-9]</sup>。无动镜驱动系统与参考光源实现了系统的微小型化,而二维空间采样模式实现了系统的静态化。因此,该干涉系统降低了系统的体积与重量,提高了系统的采样精度,增加了系统的稳定性与可靠性。本文主要针对干涉系统中分束器的加工精度导致的楔形误差进行分析与计算,获得了系统器件的加工误差容忍。

## 2 仪器原理

基于多级微反射镜的空间调制傅里叶变换光谱仪工作原理如图 1 所示,来自地物目标的平行光束通过扫描镜进入空间调制的干涉采样系统,干涉系统由分束器与两块多级微反射镜组成,两块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。由于每一个光场分割基元对应着两块多级微反射镜特定的行与列,而由某一级微反射镜特定的行与另一级微反射镜特定的列所反射的光束在分束器出射面上发生相干时具有特定的光程差,所以每一个光场分割基元对应着一个特定的光程差,经过成像系统后在面阵探测器上对应着一个特定的干涉图元。

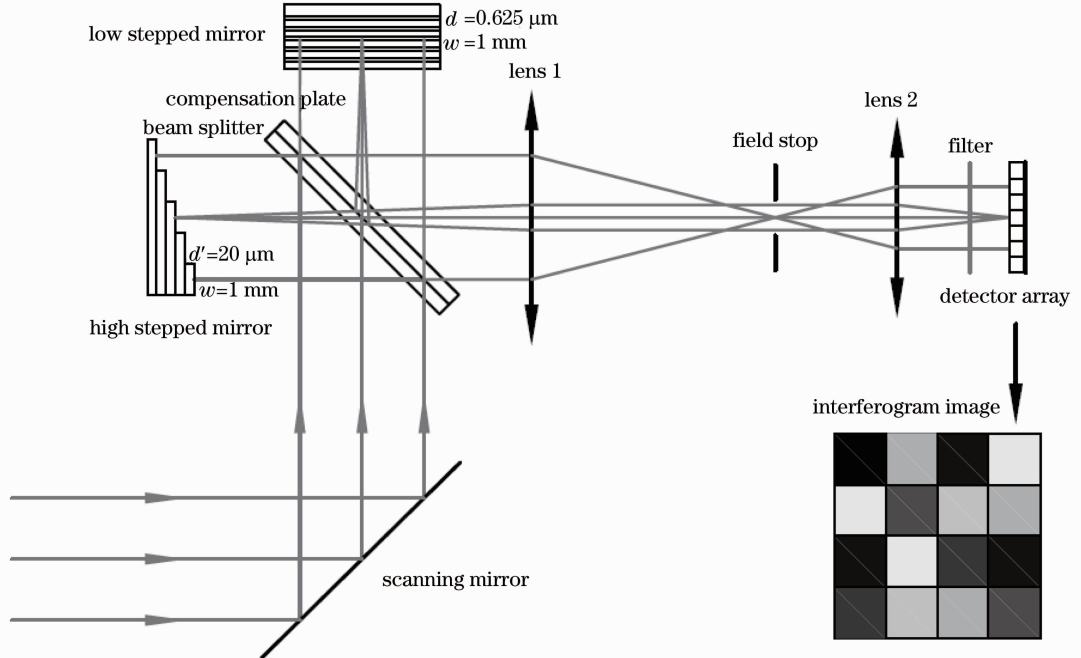


图 1 空间调制傅里叶变换光谱仪工作原理

Fig. 1 Principle diagram of spatial modulated Fourier transform spectrometer

设两块多级微反射镜具有相同的阶梯宽度  $w$ , 且第一块多级微反射镜的阶梯步长为  $d$ , 阶数为  $M$ ; 另一块多级微反射镜的阶梯步长为  $d'$ , 阶数也为  $M$ ; 为了避免离散采样导致的光谱混叠, 阶梯步长  $d$

应遵循奈奎斯特-香农采样定理; 为了满足光程差互补原则, 阶梯步长  $d'$  应满足阶梯方程  $d' = M \times d$ 。

设第一块多级微反射镜的阶梯序数为  $x$ , 另一块多级微反射镜的阶梯序数为  $y$ , 则光场基元  $(x, y)$  所

对应的光程差为

$$\delta(x, y) = 2(yd' - xd) = 2(M_y - x)d. \quad (1)$$

因此，在干涉光场的横向空间就构成了一个  $M \times M$  的光程差采样阵列，采样间隔  $\Delta = 2d$ ，并且第  $m$  个光程差的采样序数  $m = M_y - x$ 。由傅里叶变换光谱学原理可知，干涉图像的函数形式为

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

式中  $\nu = 1/\lambda$  为入射光信号的空间频率， $B(\nu)$  为入射光信号的光谱密度。

对干涉图像采样序列  $I(m)$  进行离散傅里叶变换运算，就可以反演出入射光信号频域的光谱信息，即

$$B(\nu) = 2d \sum_n I(m) \exp(-j2\pi\nu m 2d). \quad (3)$$

### 3 理论计算及数值仿真

分束器采用平行平板结构，在平行平板基底的一个表面蒸镀一层分束膜，同时还需要一块补偿板来补偿材料的色散。理想情况下，平行光束经过分束器平板后不发生光线偏折，继续沿原方向向前传播。但是，由于分束器加工精度的限制，其平行平板基底会产生一定的楔形误差，使得其出射光束的方向与入射方向相比，具有一定的偏向角<sup>[10-11]</sup>，如图 2 所示。

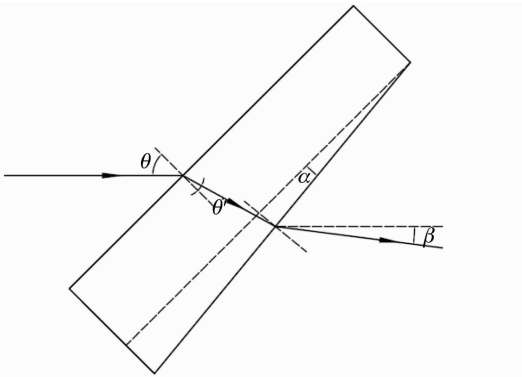


图 2 分束器楔形误差导致的光束偏向角  
Fig. 2 Deflection angle of beam induced by wedge error of beam splitter

设分束器楔形误差的楔角为  $\alpha$ ，光束对分束器的入射角为  $\theta$ ，分束器基板材料的折射率为  $n(\lambda)$ ，光线在分束器内的折射角为  $\theta'$ ，入射光束通过分束器后的光束偏向角为  $\beta$ 。由于楔角  $\alpha$  很小，通过计算，光束偏向角  $\beta$  可以近似为

$$\beta = \left[ n(\lambda) \frac{\cos \theta'}{\cos \theta} - 1 \right] \alpha. \quad (4)$$

由折射定律，光线在分束器内的折射角  $\theta'$  的余弦值可以表示为

$$\cos \theta' = \frac{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta}}{n(\lambda)}. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式，则光束偏向角可化为

$$\beta = \left[ \frac{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta}}{\cos \theta} - 1 \right] \alpha. \quad (6)$$

设补偿板与分束板具有相同的楔角  $\alpha$ ，则入射光束经过分束板和补偿板后总的光束偏向角为

$$2\beta = 2 \left[ \frac{\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta}}{\cos \theta} - 1 \right] \alpha. \quad (7)$$

考虑分束器材料折射率的色散特性，因此不同波长的光线通过分束器和补偿板后具有不同的光束偏向角，从而具有不同的传播方向。分束器与补偿板均采用 ZnSe 材料，光束对分束器的入射角  $\theta = 45^\circ$ ，当分束器与补偿板的楔角  $\alpha = 0.6^\circ$  时，光束偏向角的色散特性曲线如图 3 所示。

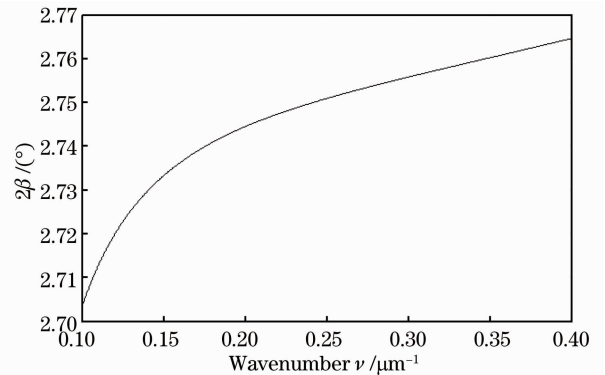


图 3 光束偏向角的色散曲线

Fig. 3 Chromatic disperse curve of light beam deflection angle

由图 3 可以看出，入射光束经过分束器与补偿板后的光束偏向角随着光波频率的增加而变大，所以高频的光信号具有较大的光束偏向角。当  $\nu = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$  时， $2\beta = 2.704^\circ$ ； $\nu = 0.4 \mu\text{m}^{-1}$  时， $2\beta = 2.765^\circ$ 。由于在  $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}^{-1}$  的光谱范围内，光束偏向角的最大偏差为  $0.061^\circ$ ，仅为光束偏向角的 2.2%，因此分束器材料的色散对于系统的影响可以忽略。

由于光束偏向角的存在，光经过反射镜反射再次相遇时的光程差变为

$$\delta'(x, y) = \delta(x, y) \cos(2\beta) = \delta(x, y) \cos \left[ 2 \left( \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta} - 1 \right) \alpha \right]. \quad (8)$$

因此,探测器上实际接收到的干涉图像信号为

$$I(x, y) = \int_0^{\infty} B(\nu) \exp[j2\pi\nu\delta(x, y) \cos(2\beta)] d\nu = \int_0^{\infty} B(\nu) \exp\left\{j2\pi\nu\delta(x, y) \cos\left[2\left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta} - 1\right)\alpha\right]\right\} d\nu. \quad (9)$$

由此,取 ZnSe 折射率  $n=2.43$ ,对于不同的楔角  $\alpha$  (以  $\alpha=0^\circ$ 和  $\alpha=0.6^\circ$ 为例),探测器平面上的干涉图像如图 4 和图 5 所示。

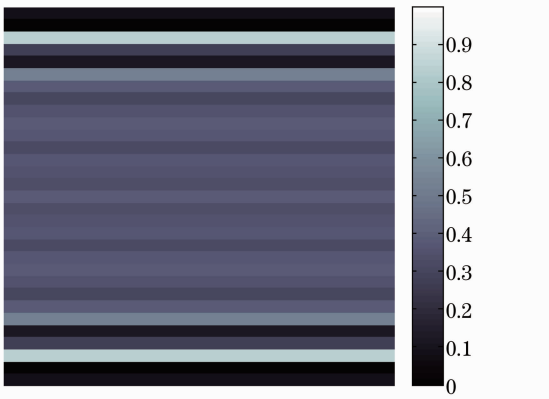


图 4  $\alpha=0^\circ$ 对应的干涉图像

Fig. 4 Interferogram corresponding to  $\alpha=0^\circ$

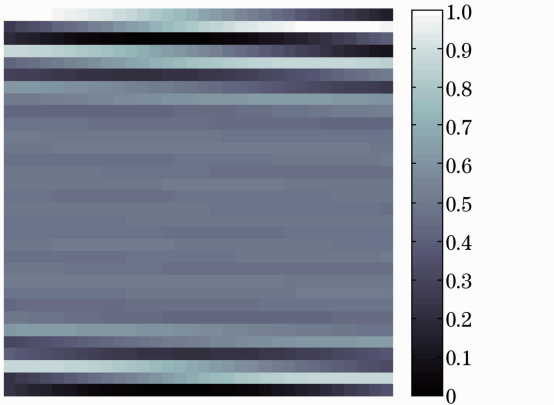


图 5  $\alpha=0.6^\circ$ 对应的干涉图像

Fig. 5 Interferogram corresponding to  $\alpha=0.6^\circ$

图 4 是楔角  $\alpha=0^\circ$ 对应的干涉图像,图 5 是楔角  $\alpha=0.6^\circ$ 对应的干涉图像。从两幅图像的对比可以看出,楔形误差的存在使得干涉条纹发生弯曲,并且干涉图像的对比度降低。

以灰度相似性作为分解原则,采用区域分离的分解方法,将以上两幅干涉图像分解为对应各个光程差的灰度级次,通过极值光强寻址进行零光程差点的定位,通过光程差级次匹配获得干涉图的灰度排布序列,通过离散傅里叶变换,还原入射光信号的光谱信息<sup>[12-15]</sup>,图 4 和图 5 对应的复原光谱信息分

别如图 6 和图 7 所示。

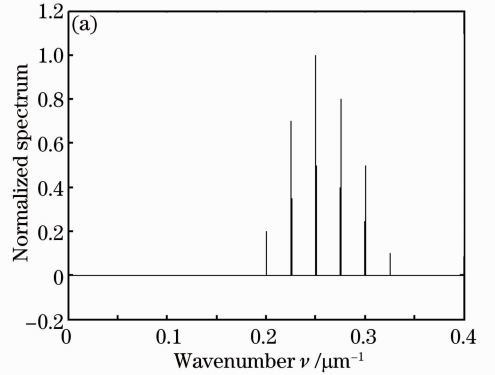


图 6  $\alpha=0^\circ$ 对应的复原光谱

Fig. 6 Recovered spectrum corresponding to  $\alpha=0^\circ$

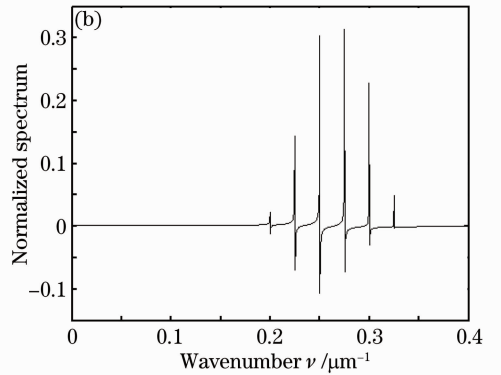


图 7  $\alpha=0.6^\circ$ 对应的复原光谱

Fig. 7 Recovered spectrum corresponding to  $\alpha=0.6^\circ$

图 6 是由  $\alpha=0^\circ$ 产生的干涉图像复原的信号光谱,图 7 是由  $\alpha=0.6^\circ$ 产生的干涉图像复原的信号光谱。通过对比图 6 和图 7 可以看出,分束器与补偿板的楔形误差引起复原光谱中谱线发生畸变,谱线峰值下降,各条谱线之间的相对强度发生改变,光谱分辨率降低,并且各条谱线向低频方向发生频移。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 谱线频移分析

由(9)式可知,干涉图像函数可以表示为

$$I(x, y) = \int_0^{\infty} B(\nu) \exp[j2\pi\nu\delta(x, y) \cos(2\beta)] d\nu = \mathcal{F}^{-1}\{B[\nu \cos(2\beta)]\}. \quad (10)$$

对于干涉图像函数作傅里叶变换,可得复原光谱函数为

$$B'(\nu) = \mathcal{F}\{I(x, y)\} = B[\nu \cos(2\beta)]. \quad (11)$$

由(11)式可知,分束器与补偿板楔形误差的存在,导致复原光谱对原始光谱的频率进行了压缩,即频率由 $\nu$ 被压缩为 $\nu \cos(2\beta)$ 。由于 $\cos(2\beta) < 1$ ,所以在频率被压缩的同时,导致谱线向低频方向频移。

分束器与补偿板楔形误差的存在,导致复原光谱的光谱精度降低,其波数精度为

$$P = |\nu \cos(2\beta) - \nu| \approx 2\nu\beta^2. \quad (12)$$

将(6)式代入(12)式,可得波数精度与分束器楔角之间的关系为

$$P = 2\nu\beta^2 = 2\nu \left( \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta} - 1 \right)^2 \alpha^2. \quad (13)$$

因此,对于系统波数精度要求下的分束器楔角应满足如下关系:

$$\alpha \leq \frac{\cos\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} - \cos\theta} \sqrt{\frac{P}{2\nu_{\max}}}, \quad (14)$$

式中 $\nu_{\max}$ 为复原光谱最大频率。

#### 4.2 光谱分辨率分析

由于谱线向低频方向发生频移,因此复原光谱中会出现相位误差。由(8)式,经计算可以得到分束器楔形误差引入的相位误差为

$$\varphi = 2\pi\nu[\delta - \delta\cos(2\beta)] \approx 4\pi\nu\delta\beta^2. \quad (15)$$

将(6)式代入(15)式可得相位误差与分束器楔角之间的关系为

$$\varphi = 4\pi\nu\delta\beta^2 = 4\pi\nu\delta \left( \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta} - 1 \right)^2 \alpha^2. \quad (16)$$

相位误差随光程差变化的关系曲线如图8所示。

当相位误差 $\varphi = \pi$ 时,干涉条纹极大值与极小值发生明暗对调,明条纹变为暗条纹,暗条纹变为明条纹,从而引起干涉图像对比度的反转。发生对比度反转之后的干涉光强对复原光谱不再有贡献,这样就会导致最大光程差的减小,从而带来光谱分辨

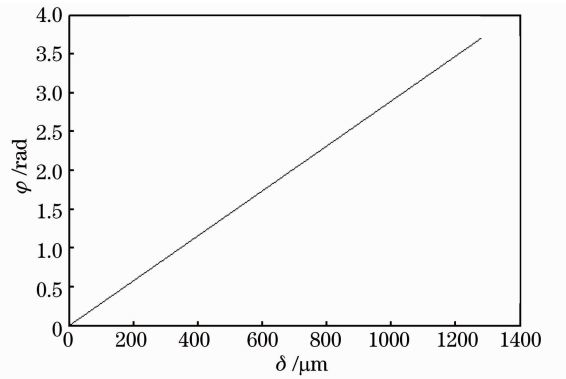


图8 相位误差与光程差之间的关系

Fig. 8 Relationship between phase error and optical path difference

率的降低。由图8可以得到相位误差 $\varphi = \pi$ 所对应的最大光程差,从而可以得到最大光程差所对应的光谱分辨率为

$$R = \frac{1}{\delta_{\max}} = 4\nu \left( \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta} - 1 \right)^2 \alpha^2, \quad (17)$$

式中 $\delta_{\max}$ 为最大光程差。

因此,由系统的光谱分辨率指标可知,分束器的楔角应满足

$$\alpha \leq \frac{\cos\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} - \cos\theta} \sqrt{\frac{R}{4\nu_{\max}}}. \quad (18)$$

#### 5 光谱校正

对于由分束器楔形误差引入的光谱畸变,可以利用适当的数据处理方法对于畸变光谱进行光谱校正<sup>[9]</sup>。

设干涉图函数的采样间隔为 $\Delta$ ,采样点数为 $N$ ,由离散傅里叶变换理论可以得到其频域的光谱分辨率为 $\frac{1}{N\Delta}$ ,所以在频域以光谱分辨率对光谱进行离散,并不会丢失空域的干涉图信息。令 $\delta_m = m\Delta$ , $I(\delta_m) = I(m)$ , $\nu_k = \frac{k}{N\Delta}$ , $B(\nu_k) = B(k)$ ,只取(9)式的实部,可以将其离散为如下形式:

$$I(m) = \sum_{k=0}^{N-1} B(k) \cos \left[ 2\pi \frac{k}{N\Delta} m\Delta \cos(2\beta) \right] = \sum_{k=0}^{N-1} B(k) \cos \left[ 2\pi \frac{km}{N} \cos(2\beta) \right], \quad (19)$$

其矩阵形式为

$$\mathbf{I} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}, \quad (20)$$

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

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & & & 1 \\ 1 & \cos\left[\frac{2\pi}{N} \times \cos(2\beta)\right] & & \cos\left[\frac{2\pi}{N} 2 \times \cos(2\beta)\right] & & \cdots & & \cos\left[\frac{2\pi}{N} (N-1) \times \cos(2\beta)\right] & & & \\ 1 & \cos\left[\frac{2\pi}{N} 2 \times \cos(2\beta)\right] & & \cos\left[\frac{2\pi}{N} 2 \times 2 \times \cos(2\beta)\right] & & \cdots & & \cos\left[\frac{2\pi}{N} 2(N-1) \times \cos(2\beta)\right] & & & \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & & & \vdots & & \\ 1 & \cos\left[\frac{2\pi}{N} (N-1) \times \cos(2\beta)\right] & & \cos\left[\frac{2\pi}{N} 2(N-1) \times \cos(2\beta)\right] & & \cdots & & \cos\left[\frac{2\pi}{N} (N-1)(N-1) \times \cos(2\beta)\right] & & & \end{bmatrix}.$$

通过解(20)式,得到通过光谱校正后的复原光谱曲线如图9所示。

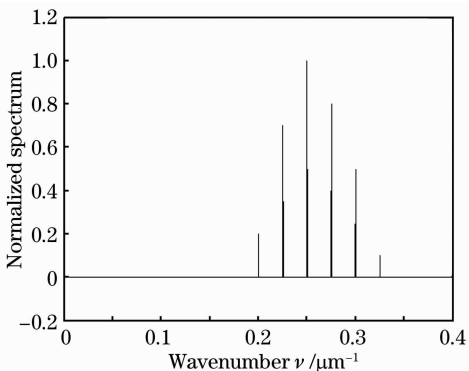


图9 数据处理后的校正光谱

Fig. 9 Corrected spectrum after data processing

将图9与图6和图7进行对比,校正前复原光谱与理想光谱的均方根误差  $\sigma_1 = 0.056$ ,校正后的复原光谱与理想光谱的均方根误差  $\sigma_2 = 1.08 \times 10^{-14}$ 。因此,利用离散光谱序列解线性方程组的方法可以对分束器楔形误差引入的畸变光谱实现良好的光谱校正效果。

## 6 结 论

空间调制傅里叶变换光谱仪的干涉系统由分束器与两块多级微反射镜组成,由于分束器基片加工精度的限制,会存在一定的楔形误差。来自地物目标的平行光经过楔形分束器后会偏离原来的传播方向,当被楔形分束器分开的两束光再次相遇发生干涉时,其光程差会受到光束偏向角的调制。通过数值仿真发现,楔形误差对应的复原光谱的谱线会向低频方向发生频移,并且谱线的光谱分辨率会下降。通过计算,得到波数精度和光谱分辨率与楔角之间的函数关系。对于楔形误差导致的畸变光谱,利用离散光谱序列并解线性方程组的方法进行光谱校正,获得了良好的校正效果。

## 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 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.
- 3 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.
- 4 Jeongsik Sin, Woo Ho Lee, Dan Popa, *et al.*. Assembled Fourier transform micro-spectrometer [C]. SPIE, 2006, 6109: 610904.
- 5 Omar Manzardo. Micro-Sized Fourier Spectrometers [D]. Neuchatel: University of Neuchatel Institute of Microtechnique, 2002. 29-54.
- 6 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.
- 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 Lü Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Study on transmission efficiency of interference system in spatially modulated Fourier transform spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 850-854.  
吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 等. 空间调制傅里叶变换红外光谱仪干涉系统透射效率研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 850-854.
- 9 Lü 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 Pei Linlin, Huang Min, Lü Qunbo, *et al.*. Effect of error of the double amici prism of dispersion [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122003.  
裴琳琳, 黄 旻, 吕群波, 等. 分析双 Amici 棱镜角度误差对色散的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122003.
- 11 Yu Daoyin, Tan Hengying. Applied Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 50-52.  
郁道银, 谈恒英. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

50—52.

- 12 Lü 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.

- 13 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.

- 14 Wang Mingyan, Wang Zhibin, Zhang Jilong, *et al.*. Research for

fast spectrum recovery algorithm of PEM nonequiphase phase interference signal [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0507001.

王明艳, 王志斌, 张记龙, 等. 弹光调制非等相位干涉信号的快速光谱反演算法[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0507001.

- 15 Zhang Minjuan, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, *et al.*. Fast spectral rebuild 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.

栏目编辑：史敏