

多级微反射镜对准误差的分析与抑制

吕金光 梁静秋* 梁中翥 秦余欣

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 由于系统装调与器件定位精度的限制,空间调制傅里叶变换光谱仪中的两个多级微反射镜在对准过程中会产生相对位置的平移和旋转。为了明确对准误差对系统产生的影响,利用线性系统理论与标量衍射理论分别建立了平移误差与旋转误差对应的干涉图像与复原光谱的模型。通过对计算结果的分析,平移误差与旋转误差均会对边缘的干涉图元进行剪裁,从而在复原光谱中引入伴线,带来光谱噪声。根据平移误差与旋转误差对干涉图像的作用特点,提出一种对干涉图像进行区域补偿的方法,通过扩展多级微反射镜的阶梯级数扩大干涉区域,然后利用干涉图像内部有效的干涉图元进行光谱反演;计算表明该方法可以有效抑制对准误差给系统带来的影响,从而降低多级微反射镜的定位精度要求。

关键词 光谱学; 傅里叶变换光谱仪; 对准误差; 区域补偿; 多级微反射镜

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0330003

Analysis and Restraint of Alignment Error by Stepped Micro-mirror

Lü Jinguang Liang Jingqiu Liang Zhongzhu Qin Yuxin

*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 precision restriction of the system assembling and device location, the relative position of the two stepped micro-mirrors in spatial modulation Fourier transform spectrometer can appear the shift and rotation in the alignment process. Using the linear system theory and scalar diffraction theory, the model of the interferogram image and recovered spectrum corresponding to shift error and rotation error are established respectively. By means of the analysis to the calculation result, the marginal interferogram units are clipped by the shift error and rotation error, and the concomitant spectrum lines is appeared in recovered spectrum, bringing the spectrum noise badly. Finally, according to the action characteristics of the shift error and rotation error to interferogram image, a method of regional compensation to interferogram image is put forward, by extending the step number of two stepped micro-mirrors to expand the interference area, then using the internal effective interferogram units to recover the signal spectrum. Calculation shows that this method can restrain the influence of the alignment error effectively, and so as to decrease the location precision of the stepped micro-mirror consumedly.

Key words spectroscopy; Fourier transform spectrometer; alignment error; regional compensation; stepped micro-mirror

OCIS codes 300.6190; 300.6300; 120.5060; 070.2590

1 引言

傅里叶变换光谱仪由于具有多通道、高精度、高分辨和低杂光等优点,在生化分析、科学实验、食品安全、

收稿日期: 2015-09-07; 收到修改稿日期: 2015-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(61376122, 61027010)、国家 863 计划(2009AA04Z315)、吉林省科技发展计划(20130206010GX, 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。

Email: jinguanglv@163.com

*通信联系人。E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

环境监测、生态保护等领域得到越来越广泛的应用^[1-3]。近年来,随着空间探测、资源遥感、军事侦察等高新技术领域的出现和发展,对微小型化、静态化、可进行实时探测的空间调制傅里叶变换光谱仪提出了迫切的使用需求。虽然空间调制傅里叶变换光谱仪在光通量与分辨率方面没有时间调制傅里叶变换光谱仪那么显著的优势,但由于其采用静态结构且具有实时性好的特点,使得其在基于运动平台的光谱探测和对迅变目标的光谱探测领域具有显著的优势。瑞士纽沙特尔微技术研究所^[4]和中国电子测试技术国家重点实验室^[5]将倾斜平面镜与分束器组合在一起实现了干涉图像的空间调制,但系统的光谱分辨率受到了探测器像元尺寸的限制。瑞典中部大学研制了一种基于阶梯形和楔形法布里-珀罗干涉具的多通道光谱仪,实现了光程差的空间采样,但由于系统的波长选择性,只能进行单波长或窄带光谱范围的测量^[6]。针对倾斜反射镜光谱仪光谱分辨率受到探测器像元尺寸的限制问题以及楔形法布里-珀罗干涉具的波长选择限制问题,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,其利用两个正交的多级微反射镜对干涉图进行二维采样,可获得较高的光谱分辨率与较宽的光谱范围,并且有利于实现光谱仪的微小型化^[7-10]。由于系统集成过程中器件定位精度的限制,两个多级微反射镜在对准的过程中会引入微小的相对平移和相对旋转,从而产生对准误差。对准误差不仅会引起空间光场的位置移动,而且还会减小干涉区域的有效面积,进而影响光信号复原光谱的效果。为此,本文将分别对多级微反射镜对准过程中的平移误差与旋转误差进行建模,进而明确对准误差与干涉光场的相互作用,并分析其对干涉图像与复原光谱产生的影响。

2 系统工作原理

所研究的空间调制傅里叶变换光谱仪的基本结构如图1所示,图中1为准直镜,2为分束器,3为纵向多级微反射镜,4为横向多级微反射镜,5为面阵探测器。该系统利用两个正交放置的多级微反射镜取代传统迈克尔孙干涉仪中的平面镜及其驱动系统。多级微反射镜将入射光场分割成许多个单元,并且其阶梯结构对不同单元的光场引入不同的光程增量。为了避免离散采样导致的光谱混叠,阶梯高度遵循 Nyquist-Shannon 采样定理。设两个多级微反射镜的阶梯宽度均为 a ,阶梯级数均为 N ,其中一个多级微反射镜的阶梯高度为 d ,为了实现光程差互补,另一个多级微反射镜的阶梯高度为 $d'=N \times d$ 。由图1可以得到,横向多级微反射镜第 m 个阶梯和纵向多级微反射镜第 n 个阶梯引入的光程增量分别为

$$\begin{cases} \Delta_x(m) = 2md \\ \Delta_y(n) = 2nNd \end{cases} \quad (1)$$

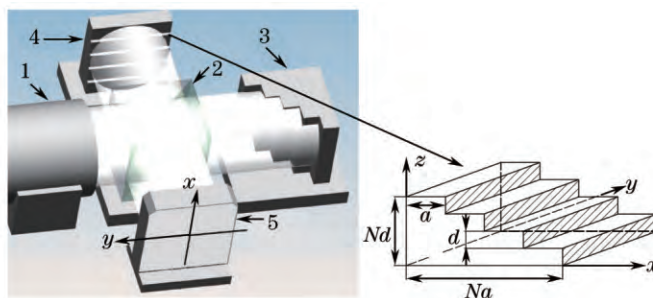


图1 空间调制傅里叶变换光谱仪原理图

Fig.1 Principle diagram of spatial modulation Fourier transform spectrometer

由于两个多级微反射镜正交放置,因此在横向空间便形成了一个离散的光程差阵列,并且第 (m,n) 个光场单元对应的两相干光束的光程差为

$$\Delta(m,n) = \Delta_y(n) - \Delta_x(m) = 2(Nn - m)d \quad (2)$$

令 $s=2d$ 作为光程差采样间隔,图2为 4×4 阶梯模式下光程差阵列与干涉图像分布示意图,可以看出光程差阵列中的光程差按照从右到左、从下到上的顺序逐级递增。被两个多级微反射镜反射的光在接收平面上发生干涉形成干涉图像,并且每一个光程差对应一个干涉图元 $I[m(x,y),n(x,y)]$ 。对每一个干涉图元进行积分,便可以获得离散的干涉图采样阵列,即

$$I(m,n) = \iint_{a \times a} I[m(x,y),n(x,y)] dx dy, \quad (3)$$

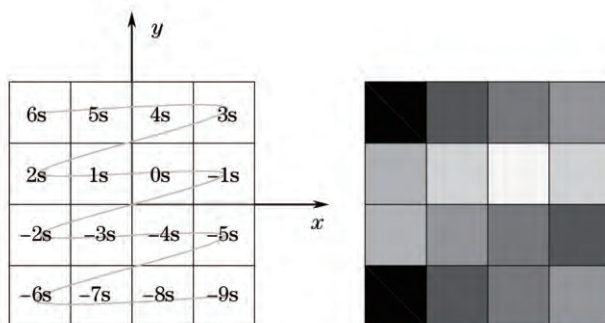


图2 4×4阶梯模式光程差阵列及干涉图像分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of optical path difference and interferogram image in 4×4 step mode

由傅里叶变换光谱学原理,通过对干涉图阵列进行离散傅里叶变换运算,便可以反演出入射光信号频域的光谱^[1],即

$$B(\nu) = 2d \sum_m \sum_n I(m, n) \exp[-j4\pi\nu(Nn - m)d], \quad (4)$$

式中 $\nu=1/\lambda$ 为光波的波数, λ 为光波的波长。

3 对准误差的建模与分析

为了获得干涉图像,纵向多级微反射镜与横向多级微反射镜需要正交对准。但是由于系统装调与定位精度的限制,两个多级微反射镜对准时会产生对准误差,对准误差主要分为平移误差和旋转误差,他们会导致干涉图元与信号复原光谱产生失真。

3.1 平移误差的建模与分析

平移误差是两个多级微反射镜在对准过程中,其中一个多级微反射镜的几何位置相对于其理想位置发生平移造成的,如图3所示。图3示意的是纵向多级微反射镜相对于其理想位置沿 x 轴方向平移 ε_x ,沿 y 轴方向平移 ε_y 后的对准情况。可以看出,部分边缘干涉图元的有效面积明显减小。

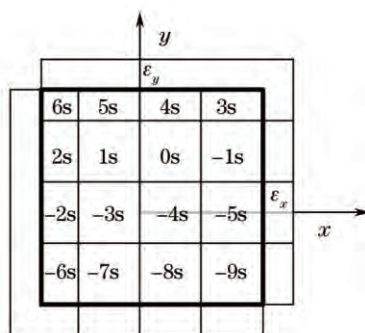


图3 多级微反射镜的平移误差示意图

Fig.3 Schematic diagram of shift error of stepped micro-mirror

多级微反射镜利用其阶梯结构对入射光束的光程进行调制,进而调制整个入射光场的相位,因此,多级微反射镜是一个相位调制屏。由(1)式,横向多级微反射镜第 m 个阶梯引入的相位调制量为 $\phi_x(m) = 2\pi\nu\Delta_x(m) = 4\pi\nu md$,纵向多级微反射镜第 n 个阶梯引入的相位调制量为 $\phi_y(n) = 2\pi\nu\Delta_y(n) = 4\pi\nu nNd$ 。因此,横向多级微反射镜的屏函数为

$$s_1(x, y) = \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu md) \text{rect}\left(\frac{x - a/2 - ma}{a}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{Na}\right), \quad (5)$$

式中 rect 为矩形函数, $\text{rect}\left(\frac{x - a/2 - ma}{a}\right)$ 描述的是横向多级微反射镜第 m 个阶梯面的孔径, $\text{rect}\left(\frac{x}{Na}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{Na}\right)$ 描述的是横向多级微反射镜的整体孔径, $4\pi\nu md$ 描述的是横向多级微反射镜第 m 个阶梯

引入的相位调制量。

利用卷积定理,可以将横向多级微反射镜的屏函数简化为

$$s_1(x,y) = \left[\text{rect}\left(\frac{x-a/2}{a}\right) * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu md) \delta(x-ma) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{Na}\right), \quad (6)$$

式中“*”表示卷积运算, δ 为单位脉冲函数。

同理,对于纵向多级微反射镜,理想对准情况下其屏函数为

$$s_2(x,y) = \left[\text{rect}\left(\frac{y-a/2}{a}\right) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu nNd) \delta(y-na) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{Na}\right). \quad (7)$$

但是由于平移误差的影响,纵向多级微反射镜的位置坐标发生平移^[14],即

$$\begin{cases} x' = x + \varepsilon_x \\ y' = y + \varepsilon_y \end{cases}. \quad (8)$$

则平移误差导致的纵向多级微反射镜的屏函数为

$$s'_2(x,y) = \left[\text{rect}\left(\frac{y-\varepsilon_y-a/2}{a}\right) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi\nu nNd) \delta(y-\varepsilon_y-na) \right] \text{rect}\left(\frac{x-\varepsilon_x}{Na}\right) \text{rect}\left(\frac{y-\varepsilon_y}{Na}\right). \quad (9)$$

根据线性系统理论与标量衍射理论,假设入射到干涉系统中的光束是单位振幅波数为 ν_0 的理想单色谱线的平面波,平面波的光谱为 $B_0(\nu)=\delta(\nu-\nu_0)$,光束由多级微反射镜到接收平面的传播距离为 z ,则经横向多级微反射镜反射的光束在接收平面上形成的光场分布为

$$u_1(x,y) = FT^{-1}\{FT[s_1(x,y)]H(f_x,f_y)\}, \quad (10)$$

式中 FT 表示傅里叶变换, FT^{-1} 表示傅里叶逆变换, f_x 和 f_y 表示空间频率坐标, $H(f_x,f_y) = \exp(j2\pi\nu z)\exp[-j\pi\lambda z(f_x^2+f_y^2)]$ 为菲涅耳传递函数^[15]。

同理,经纵向多级微反射镜反射的光束在接收平面上形成的光场分布为

$$u'_2(x,y) = FT^{-1}\{FT[s'_2(x,y)]H(f_x,f_y)\}, \quad (11)$$

根据干涉理论,接收平面上干涉图像的强度分布为

$$I(x,y) = |u_1(x,y) + u'_2(x,y)|^2 = \left| FT^{-1}\{FT[s_1(x,y) + s'_2(x,y)]H(f_x,f_y)\} \right|^2 \quad (12)$$

取阶梯宽度为1 mm,阶梯高度为0.625 μm ,阶梯级数为32,光信号的波数为0.3 μm^{-1} ,传播距离为60 mm,每个干涉图元采用5×5个像元接收,令纵向多级微反射镜沿 x 轴方向和沿 y 轴方向分别平移0.2 mm,即 $\varepsilon_x=\varepsilon_y=0.2$ mm,由(12)式和(4)式,其所对应的干涉图像的强度分布与复原光谱图^[11-13]如图4和图5所示。

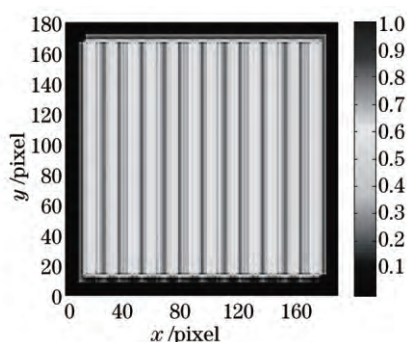


图4 平移误差对应的干涉图像

Fig.4 Interferogram image corresponding to shift error

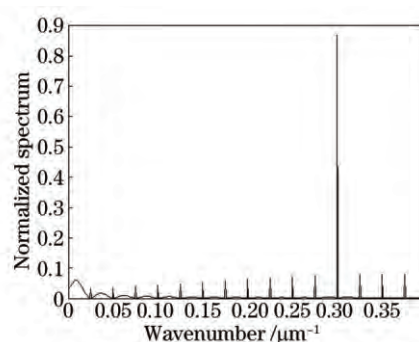


图5 平移误差对应的复原光谱图

Fig.5 Recovered spectrum corresponding to shift error

由图4可以看出,多级微反射镜的平移误差使得光场也发生平移,从而导致两个多级微反射镜交叠的干涉区域的有效面积减小。当多级微反射镜发生平移时,干涉条纹也沿相同方向发生移动,但移出干涉区域的干涉条纹就会被另一个多级微反射镜的边沿剪裁掉。由图5可以看出,平移误差使得光波的复原光谱与理想单色谱线相比,其主频谱线的峰值下降,并且主频两侧出现了很多伴随谱线,从而带来系统光谱噪声。

采用归一化光谱误差来描述平移误差对复原光谱的影响^[8],即 $E = \frac{\int_0^\infty |B(\nu) - B_0(\nu)| d\nu}{\int_0^\infty B_0(\nu) d\nu}$,其中 B_0 为入射光波的光

谱, B 为实际得到的复原光谱。通过计算, 当纵向多级微反射镜沿 x 轴方向和沿 y 轴方向分别平移 0.2 mm 时, 其复原光谱的归一化光谱误差为 $E=3.28$, 可见噪声的功率已经明显超过了信号的功率。

3.2 旋转误差的建模与分析

旋转误差是两个多级微反射镜在对准的过程中, 其中一个多级微反射镜的几何位置相对于其理想位置发生旋转造成的。当纵向多级微反射镜相对于其理想位置旋转 θ 角度后, 便产生如图 6 所示的对准情况。由图 6 可以看出, 周围边角位置干涉图元的有效面积明显减小。

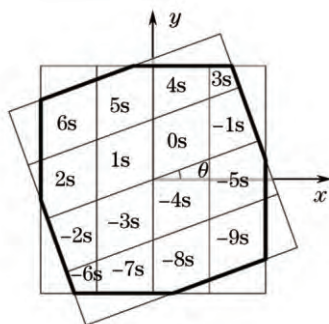


图 6 多级微反射镜旋转误差示意图

Fig.6 Schematic diagram of rotation error of stepped micro-mirror

纵向多级微反射镜发生旋转, 其位置坐标会发生旋转变换^[14], 即

$$\begin{cases} x'' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y'' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (13)$$

由此, 旋转误差导致纵向多级微反射镜的屏函数变为

$$s_2''(x, y) = \left[\text{rect} \left(\frac{y \cos \theta - x \sin \theta - a/2}{a} \right) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(j4\pi v n N d) \delta(y \cos \theta - x \sin \theta - na) \right] \cdot \text{rect} \left(\frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{Na} \right) \text{rect} \left(\frac{y \cos \theta - x \sin \theta}{Na} \right) \quad (14)$$

根据线性系统理论与标量衍射理论, 光束经该多级微反射镜反射后在接收平面上形成的光场分布为

$$u_2''(x, y) = FT^{-1} \left\{ FT[s_2''(x, y)] H(f_x, f_y) \right\} \quad (15)$$

从而接收平面上干涉图像的强度分布为

$$I''(x, y) = |u_1(x, y) + u_2''(x, y)|^2 = \left| FT^{-1} \left\{ FT[s_1(x, y) + s_2''(x, y)] H(f_x, f_y) \right\} \right|^2 \quad (16)$$

同样取 $a=1 \text{ mm}$, $d=0.625 \text{ } \mu\text{m}$, $N=32$, $v=0.3 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$, $z=60 \text{ mm}$, 每个干涉图元采用 5×5 个像元接收, 当纵向多级微反射镜的旋转误差 $\theta=0.05 \text{ rad}$ 时, 由(12)式和(4)式可知, 其所对应的干涉图像的强度分布和复原光谱图^[11-13]如图 7 和图 8 所示。

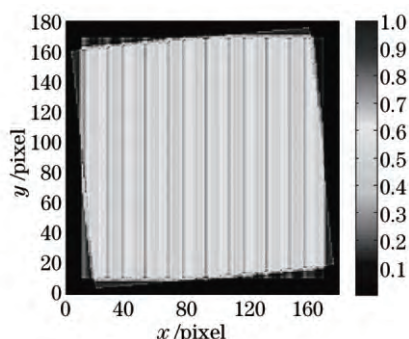


图 7 旋转误差对应的干涉图像

Fig.7 Interferogram image corresponding to rotation error

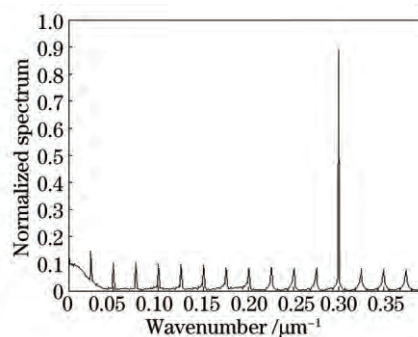


图 8 旋转误差对应的复原光谱

Fig.8 Recovered spectrum corresponding to rotation error

由图 7 可以看出, 多级微反射镜的旋转误差使得光场发生倾斜, 从而导致周围边角位置的干涉条纹被多

级微反射镜所剪裁,进而致使两个多级微反射镜交叠的干涉区域的有效面积减小。由图8可以看出,与平移误差类似,旋转误差导致复原光谱相对于理想单色光谱其主频谱线峰值下降,同时主频谱线的两侧出现多条伴随谱线,给系统带来光谱噪声。同样采用归一化光谱误差来评价旋转误差对复原光谱的影响,计算表明,当纵向多级微反射镜的旋转误差 $\theta=0.05$ rad时,复原光谱的归一化光谱误差为 $E=9.26$,可见噪声的功率已经远远超过了信号的功率。

4 干涉图像的区域补偿与对准误差的抑制

由对多级微反射镜在对准过程中产生的平移和旋转两种误差的分析可以看出,对准误差导致干涉图像中边缘的干涉图元被多级微反射镜的边沿所剪裁,而内部的干涉图元受对准误差的影响较小。因此,如果边缘干涉图元的面积得到了有效的补偿,那么对准误差对系统的影响便可以得到有效地抑制。

为此,提出一种采用扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿的方法,在不改变多级微反射镜阶梯高度与阶梯宽度的情况下,在每个多级微反射镜的两侧各增加一个阶梯,并同时延长每一个阶梯的长度以覆盖阶梯级数的扩展。这样,在干涉图像的周围便增加了一圈附加的干涉图元,附加的干涉图元将原始的干涉图元包围在干涉图像内部,这样当多级微反射镜发生相对平移或旋转时,被多级微反射镜边沿剪裁的将是边缘附加的干涉图元,而内部原始的干涉图元将不受多级微反射镜平移或旋转的影响。图9以 4×4 阶梯为例示意了通过扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿的原理图。

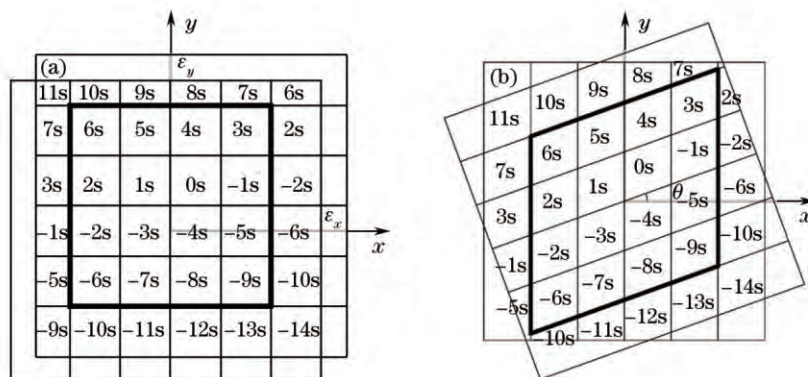


图9 扩展阶梯级数对干涉图像的区域补偿。(a) 平移误差对应的区域补偿;(b) 旋转误差对应的区域补偿

Fig.9 Regional compensation of interferogram image by extending the step number. (a) Regional compensation corresponding to shift error; (b) regional compensation corresponding to rotation error

由图9可以看出,干涉图像周围附加的干涉图元中许多都与内部的干涉图元具有相同的光程差,因此这些附加的干涉图元是无效的。同时,附加的干涉图元不会影响内部干涉图元光程差的排布,也就是说,内部的干涉图元对应的仍然是单调递增的光程差序列,如图9框中的部分。由图9(a)框中的部分可以看出,对于多级微反射镜发生平移的情况,只要平移误差在一个阶梯宽度之内,即

$$\begin{cases} |\varepsilon_x| \leq a \\ |\varepsilon_y| \leq a \end{cases} \quad (17)$$

则内部的各个干涉图元将完全不受平移误差的影响,因而可以获得理想的干涉图序列。由图9(b)框中的部分可以看出,对于多级微反射镜发生旋转的情况,虽然干涉图元的几何形状发生了畸变,但只要原始的干涉图元一直被附加的干涉图元包围在内部,即旋转误差满足关系

$$|\theta| \leq \frac{\pi}{2} - 2 \arctan\left(\frac{N}{N+2}\right). \quad (18)$$

则内部各个干涉图元之间的相对面积就不会发生变化,而几何形状的改变并不影响干涉图序列的采样,因而也可以获得比较理想的干涉图序列。因此,通过扩展阶梯级数的方法,可以对干涉图像进行有效的区域补偿。

将每个多级微反射镜的阶梯级数由 N 级扩展为 $(N+2)$ 级, 同时将每一个阶梯的长度由 Na 延长为 $(N+2)a$, 从而获得 $(N+2) \times (N+2)$ 个干涉图元。在进行干涉图元提取时忽略周围一圈无效的干涉图元, 而只提取内部 $N \times N$ 个有效的干涉图元形成干涉图采样序列。在利用探测器对干涉图像进行探测时, 对干涉图像的每一个干涉图元分配 $p \times p$ 个像元去接收, 由于多级微反射镜的平移或旋转会导致探测器某些像元不能正好位于平移或旋转之后的干涉图元内, 由此就会使得某些像元出现亚像元成像的情况。对于区域补偿之后的干涉图像, 虽然会出现亚像元成像的情况, 但由于各个干涉图元中均只有 p 个像元处于亚像元成像的区域, 而其余的 $p \times (p-1)$ 个像元仍位于相应干涉图元的内部, 因此在对每个干涉图元进行采集时, 可以忽略其中位于亚像元成像区域的 p 个像元, 而只采集位于干涉图元内部有效区域的 $p \times (p-1)$ 个像元。由于各个干涉图元内均具有相同数目的 $p \times (p-1)$ 个有效像元, 因此忽略亚像元成像区域的像元后干涉图序列不会受到影响, 从而有效地抑制了亚像元成像的影响。当 $N=32, p=5$ 时, 由利用有效像元采集的干涉图元形成的干涉图序列, 根据(4)式, 便得到多级微反射镜发生平移或旋转情况下通过扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿后的复原光谱^[11-13], 如图 10 所示。

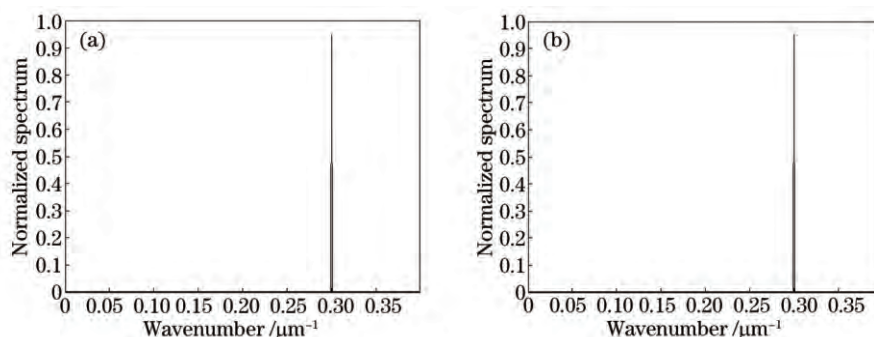


图 10 对干涉图像进行区域补偿后的复原光谱。(a) 平移误差对应的区域补偿后的复原光谱;
(b) 旋转误差对应的区域补偿后的复原光谱

Fig.10 Recovered spectrum after the regional compensation to interferogram image. (a) Recovered spectrum after regional compensation corresponding to shift error; (b) recovered spectrum after regional compensation corresponding to rotation error

图 10(a) 为当多级微反射镜的平移误差为 0.2 mm 的情况下通过扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿后的复原光谱, 图 10(b) 为当多级微反射镜的旋转误差为 0.05 rad 的情况下通过扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿后的复原光谱。采用归一化光谱误差来评价复原光谱的质量, 通过计算, 利用扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿后, 图 10(a) 所对应的复原光谱的归一化光谱误差为 $E=0.0903$, 图 10(b) 所对应的复原光谱的归一化光谱误差为 $E=0.0904$, 并且由图(10)可以看出, 光谱误差主要来源于谱线峰值的衰减, 并未引入伴线噪声。因此, 无论是平移误差还是旋转误差, 通过扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿后都可以获得比较理想的光谱图。因此, 采用扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿的方法可以有效地抑制多级微反射镜的对准误差对系统光谱的影响。根据(17)式和(18)式, 采用扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿的方法可以将多级微反射镜对准过程中平移误差与旋转误差的精度要求降低到 $|\varepsilon_x| \leq 1 \text{ mm}$, $|\varepsilon_y| \leq 1 \text{ mm}$, $|\theta| \leq 0.06 \text{ rad}$ 。

5 结 论

空间调制傅里叶变换光谱仪在系统集成过程中, 由于系统装调精度与器件定位精度的限制, 两个多级微反射镜在对准的过程中会产生位置的相对平移和相对旋转。由对干涉图像的分析表明, 无论是平移误差还是旋转误差, 其均会对干涉图像进行剪裁, 进而减少干涉区域的有效面积。平移误差是沿着坐标轴的方向对干涉条纹进行剪裁, 而旋转误差是沿着转轴方向对干涉条纹进行剪裁。由对复原光谱的分析表明, 平移误差和旋转误差不仅会降低复原光谱中主频谱线的峰值, 还会在主频谱线两侧引入伴随谱线, 带来光谱噪声。为了抑制对准误差对干涉图像与复原光谱的影响, 提出一种采用扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿的方法, 通过在多级微反射镜的两侧增加附加的边缘阶梯产生附加干涉图元, 从而将原始的干涉图元包围在附加干涉图元的内部, 进而实现边缘干涉图元的补偿。计算表明, 采用扩展阶梯级数对干涉图像进行区域补偿的方法可以对对准误差给系统带来的影响进行有效地抑制, 进而大大降低系统装调与定位过程

中对于多级微反射镜平移与旋转的精度要求。

参 考 文 献

- 1 Peter R Griffiths, James A de Haseth. Fourier Transform Infrared Spectrometry[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007: 19-41.
- 2 Vidi Saptari. Fourier-Transform Spectroscopy Instrumentation Engineering[M]. Washington: SPIE Press, 2004: 17-26.
- 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 Omar Manzardo. Micro-Sized Fourier Spectrometers[D]. Neuchatel: University of Neuchatel institute of microtechnique, 2002, 29-54.
- 5 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.
- 6 Anatoliy Manuilskiy, Henrik Andersson, Goran Tungstrom, *et al.*. Compact multi channel optical Fourier spectrometer[C]. SPIE, 2006, 6395: 639504.
- 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 Cong Feng, Jinqiu Liang, Zhongzhu Liang. Spectrum constructing with nonuniform sample using least-squares approximation by cosine polynomials[J]. Appl Opt, 2011, 50(34): 6377-6383.
- 9 Lv Jinguang, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Error synthesis and statistical analysis on stepped mirror array by Monte Carlo method[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(22): 220701.
吕金光, 梁静秋, 梁中翥. 多级反射镜阵列 Monte Carlo 法误差合成与统计分析[J]. 物理学报, 2012, 61(22): 220701.
- 10 Cong Feng, Bo Wang, Zhongzhu Liang, *et al.*. Miniaturization of step mirrors in a static Fourier transform spectrometer: theory and simulation[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(1): 128-133.
- 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 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.
- 13 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.
- 14 Chen Tianhua. Digital Image Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 82-92.
陈天华. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 82-92.
- 15 Lv Naiguang. Fourier Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 89-90.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 89-90.

栏目编辑: 韩 峰