

文章编号 1004-924X(2006)02-0191-06

傅里叶变换红外光谱仪动镜倾斜误差分析

曾立波,尹邦胜,何冰,龚丹

(武汉大学光谱与成像仪器工程中心,湖北武汉430072)

摘要:通过建立傅里叶变换光谱仪中动镜、定镜和干涉面的坐标对应关系,对动镜存在多个方向倾斜时的干涉光路进行了详细的分析。建立了非准直状态下干涉面光强分布的二维数学模型,确立了干涉图函数的数学表达式,从调制度、相位误差和频率噪声的角度,对动镜倾斜造成的影响进行了系统分析。在动镜的运动中,左右方向的倾斜和俯仰方向的倾斜对系统的影响彼此具有独立性,又具有叠加性;干涉图中初相位因子随光程差改变缓慢变化或快速变化,对相位误差的影响也不全相同。在倾斜误差分析的基础上,对动镜的最大倾斜角度和减少误差的方法进行讨论,并提出了两种动态准直校正的思路。

关键词:傅里叶变换光谱仪;动镜倾斜;调制度;动态准直;误差分析

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A

Error analysis of moving mirror in Fourier transform interferometer

ZENG Li-bo, YIN Bang-sheng, HE Bing, GONG Dan

(Research Center of Spectrum & Imaging Instruments Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the coordinate correspondence of the moving mirror, fixed mirror and interference surface in Fourier transform interferometer, the interference mode was analyzed under moving mirror tilted in several directions. In tilting status, a two dimension mathematical model of the interference plane was brought out, and the function of the interferogram was established. By analyzing the modulation depth, phase error and frequency noise, the error of the moving mirror were studied theoretically. It is found out that the different titling directions of moving mirror affect the system error independently, at the same time they can be added. The original phase of the interferogram is changed slowly or rapidly with the optical path difference changed, and the phase error is different too. Based on the error analysis, the max titling angle can be computed, two methods to keep adaptive alignment are also discussed.

Key words: Fourier transform spectrometer; tilting of the moving mirror; modulation depth; adaptive alignment; error analysis

收稿日期:2005-05-14;修订日期:2006-01-12.

基金项目:“十五”国家科技攻关计划项目:红外和激光拉曼光谱分析仪器的研制与开发(No. 2004BA210A02)。

1 引言

在傅里叶变换红外光谱仪中,迈克尔逊干涉仪是其光学系统的核心部分。光谱仪性能好坏,很大程度上取决于干涉系统中动镜的移动精度。

光谱仪要求作扫描运动的动镜必须作高精度的匀速直线运动,同时与定镜有严格的准直关系。前者为了保证对信号光束干涉图的均匀采样,后者为了减小倾斜带来的调制误差和相位误差^[1,3,5]。

在傅里叶变换红外光谱仪的研制中发现,由于各种因素,动镜会同时存在多个方向上的倾斜。为了保证系统性能要求,在提高动镜运动精度的同时,通常都采用参考激光光束建立自适应调节系统。通过对参考激光光束干涉面上光强分布不均匀度的测量,获取动镜倾斜角度,反馈调节定镜姿态,保证干涉仪的准直性^[3]。

本文以同时存在两个方向倾斜为前提,详细分析动镜倾斜给矩形信号光束和参考激光光束带来的误差,并对其校正方法展开讨论。

2 动镜倾斜时干涉系统模型分析

如图 1 和图 2 所示,动镜位于 xOy 平面上, z 为动镜中心轴线, y 轴与定镜平面垂直。理想情况下,动镜随驱动系统只在 z 轴上作扫描运动。由于外部环境的震动,温度变化导致材料冷热收缩,导轨的平整程度,还有驱动系统等原因,它可能具有其他运动方式:在 x 和 y 方向的平移,绕 x 轴、 y 轴和 z 轴三条轴线的轻微转动。这几种运动形式中,轻微平移对系统影响可忽略,绕 z 轴方向的轻微转动的影响也可忽略,但是绕 x 轴的转动将带来俯仰方向的倾斜,绕 y 轴的转动将带来左右方向的倾斜,它们对干涉系统性能会带来大的影响。(取各坐标轴方向的右手螺旋方向为正方向)

动镜发生倾斜时,动镜和定镜对分束器的镜像不再保持平行。图 1 为动镜绕 x 轴平行轴转动 θ 角,即俯仰方向发生倾斜时的侧面视图。

信号光束孔径为矩形,尺寸大小为 $D_1 \times D_2$,矩形的两边分别平行于 x 和 y 轴,中心光线与 z 轴共线。入射光束通过分束器后分为两部分:光

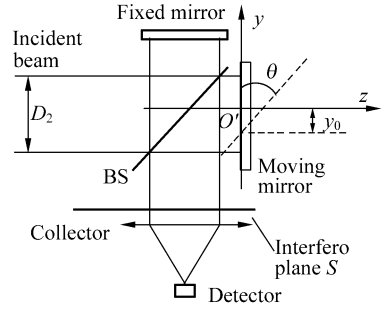


图 1 动镜俯仰方向倾斜光路图
Fig. 1 Fourier transform spectrometer with a titled moving mirror

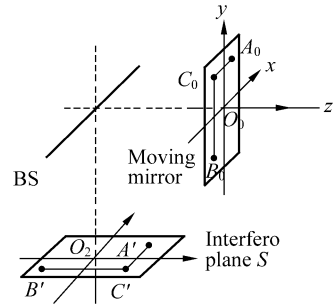


图 2 动镜平面与干涉面 S 坐标对应图
Fig. 2 Moving mirror plane and interfero plane S

束 I 和光束 II,它们分别到达定镜和动镜,被反射后,在 S 面上形成干涉平面。设动镜以 $o'(x_0, y_0, 0)$ 为倾斜中心,在俯仰方向倾斜 θ 角,在左右方向上倾斜 β 角。

θ 和 β 都为 0 时,动镜处于理想状态下,动镜平面方程为 $z=0$,镜面法线矢量为 $i(0, 0, -1)$,平面上任意点的坐标可用 $N(x, y, 0)$ 来表示,其中光束尺寸内 x, y 的范围分别为 $[-D_1/2, D_1/2], [-D_2/2, D_2/2]$ 。在 S 平面处光束 I 和光束 II 干涉形成亮度均匀的干涉平面, S 面随着动镜移动产生明暗变换。对波长为 λ 的单色光来说,探测器上收到的干涉图为

$$I(l) = B(\nu)[1 + \cos(2\pi\nu l)] \quad (1)$$

其中, ν 为波数,即 $1/\lambda$, l 为光束 I 和光束 II 之间的光程差^[2]。

θ 和 β 不同时为 0 时,动镜发生倾斜,光束 II 中,各条光线之间的光程都发生变换。此时动镜平面的法线矢量为 $i = (-\cos\theta\sin\beta, \sin\theta, -\cos\theta\cos\beta)$,同时,动镜平面过倾斜中心点 $o'(x_0, y_0, 0)$,可得动镜平面方程为

$$-(x-x_0)\cos\theta\sin\beta + (y-y_0)\sin\theta - z\cos\theta\cos\beta = 0, \quad (2)$$

考虑到 θ, β 角度值非常小, 动镜平面方程可简化为

$$-(x-x_0)\beta + (y-y_0)\theta - z = 0, \quad (3)$$

光束 II 的光线通过动镜反射后, 与理想状态相比, 产生附加光程差 $\Delta l = 2z$, 即

$$\Delta l = -2(x-x_0)\beta + 2(y-y_0)\theta, \quad (4)$$

此时, 在 S 处的干涉面上有光强不均匀的干涉图, 设通过倾斜中心点 $o'(x_0, y_0, 0)$ 的光线在此干涉图上的对应点为原点 O_2 , 建立与理想动镜平面相对应的干涉平面坐标系 $\xi O_2 \eta$, 此时原点 O_2 处的光程差为 l , 任意点 $N(\xi, \eta)$ 处对应的光程差为

$$l(\xi, \eta) = l - 2\beta\xi + 2\theta\eta, \quad (5)$$

其中 $\xi \in [-D_1/2 - x_0, D_1/2 - x_0]$, $\eta \in [-D_2/2 - y_0, D_2/2 - y_0]$ 。采用同样的单色光源, 以倾斜中心处光程差 l 为变量, 那么探测器上获取的干涉图为

$$I(l) = \frac{1}{D_1 D_2} \int_{-D_2/2 - y_0}^{D_2/2 - y_0} \int_{-D_1/2 - x_0}^{D_1/2 - x_0} B(\nu) \{1 + \cos[2\pi\nu(l - 2\beta\xi + 2\theta\eta)]\} d\xi d\eta, \quad (6)$$

积分可得

$$I(l) = B(\nu) \{1 + \sin c(2\pi\nu D_1 \beta) \sin c(2\pi\nu D_2 \theta) \cos[2\pi\nu(l - 2\beta x_0 + 2\theta y_0)]\}, \quad (7)$$

由上式可知, 动镜发生倾斜时, 干涉图中的余弦分量受到了两个 $\sin c$ 函数的幅度调制, 调制度为

$$M(D_1, D_2, \theta, \beta, \nu) = \sin c(2\pi\nu D_1 \beta) \sin c(2\pi\nu D_2 \theta), \quad (8)$$

同时, 余弦分量中还出现了随 $(x_0, y_0), \theta$ 和 β 变化而不断变化的初始相位

$$\varphi(x_0, y_0; \theta, \beta, \nu) = 4\pi\nu(-\beta x_0 + \theta y_0), \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可知, θ 和 β 对调制度和初相位的影响彼此不相干扰, 同时对调制度具有累乘的叠加效果, 对初相位具有累加的叠加效果。

3 倾斜误差分析与讨论

3.1 调制度分析

已知调制度函数为 $M(D_1, D_2, \theta, \beta, \nu) = \sin c(2\pi\nu D_1 \beta) \sin c(2\pi\nu D_2 \theta)$, 取定 D_1, D_2 时, 调制度函数的变量为 θ, β 和 ν 。为了使重建光谱不因为调制度的影响而发生畸变, 要保证调制度不小于

90%^[1]。由调制度函数可知, 波数 ν 越大, 调制度越小。当调制度值在最大波数 ν_{\max} 处能达到性能要求时, 就能满足于整个工作波段

$$M(D_1, D_2, \theta, \beta, \nu_{\max}) = \text{sinc}(2\pi\nu_{\max} D_1 \beta) \text{sinc}(2\pi\nu_{\max} D_2 \theta) \geq 0.9, \quad (10)$$

可设 $M_1(D_1, \beta, \nu_{\max}) = \text{sinc}(2\pi\nu_{\max} D_1 \beta)$, $M_2(D_2, \theta, \nu_{\max}) = \text{sinc}(2\pi\nu_{\max} D_2 \theta)$, 它们分别对应最大波数时, 两个倾斜方向的调制度函数, 取它们相等时, 可得调制度判据:

$$\sin c(2\pi\nu_{\max} D_1 \beta) \geq 0.95, \quad (11)$$

$$\sin c(2\pi\nu_{\max} D_2 \theta) \geq 0.95. \quad (12)$$

由上面的分析可得动镜倾斜角度的最大限定值 θ_{\max} 和 β_{\max} 为:

$$\theta_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{11.4 D_2}, \beta_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{11.4 D_1}, \quad (13)$$

在傅里叶变换红外光谱仪中, 中红外波段常用的波数范围为 $4\ 000 \sim 400\ \text{cm}^{-1}$, 近红外波段常用的波数范围为 $12\ 000 \sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 。在仪器设计时, 当取定 D_1 和 D_2 时, 便可根据工作波段的选择, 确定 θ_{\max} 和 β_{\max} 的值。例如, 当 $D_1 = D_2 = 30\ \text{mm}$, 且工作于中红外波段, 最大波数为 $4\ 000\ \text{cm}^{-1}$, 此时 θ_{\max} 和 β_{\max} 约为 $1.5''$ 。

3.2 相位误差分析

在干涉图函数表达式中, 余弦因子为 $\cos[2\pi\nu(l - 2\beta x_0 + 2\theta y_0)] = \cos[2\pi\nu(l + \Delta l)]$,

$$(14)$$

其中 $\Delta l = 2(-\beta x_0 + \theta y_0)$ 是一个随 $(x_0, y_0), \theta$ 和 β 变化而不断变化的初相位。忽略其他因素的影响, 可得单色谱线 ν_0 的干涉图

$$I_D(l + \Delta l) = B_0(\nu_0) \cos 2\pi\nu_0(l + \Delta l), \quad (15)$$

经傅里叶变换后, 其复原谱, 即仪器谱函数 (ILS 函数) 为

$$\begin{aligned} \text{ILS}(\nu_0) &= 2 \int_0^\infty B_0(\nu_0) A(l) \cos 2\pi\nu_0(l + \Delta l) \cos 2\pi\nu l dl \\ &= f(\nu) \cos 2\pi\nu_0 \Delta l + h(\nu) \sin 2\pi\nu_0 \Delta l, \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $A(l)$ 为仪器函数,

$$\begin{aligned} f(\nu) &= 2 \int_0^\infty B_0(\nu_0) A(l) \cos 2\pi\nu_0 l \cos 2\pi\nu l dl \\ h(\nu) &= 2 \int_0^\infty B_0(\nu_0) A(l) \sin 2\pi\nu_0 l \cos 2\pi\nu l dl, \end{aligned} \quad (17)$$

式(16)表明, 初相位的存在使得 ILS 函数变成两项之和, 第一项中的 $f(\nu)$ 即为普通的 ILS 函数, 第二项中的 $h(\nu)$ 如上式所述。每一项的权重

系数决定 Δl 于与被研究波长 λ_0 之比 $\Delta l/\lambda_0$ 。当 $\Delta l/\lambda_0$ 从 -1 变化到 $+1$ 范围内, ILS 函数外形随相移的变化十分敏感, 甚至可以取负值。在扩展谱情况下, 相位误差引起的畸变更为显著, 尤其是引起扩展谱的光学误差^[6]。

由于 Δl 本身并非一个常量, 它随 $(x_0, y_0), \theta$ 和 β 变化而不断变化, 为便于分析, 把它归纳为一个只随光程差 l 变化的量。下面根据 Δl 的变化快慢, 也就是根据其本身的频率特性来做更进一步的误差分析。

3.2.1 Δl 随着光程差 l 的改变而缓慢变化

图 3 为此状态下单色谱线干涉图的 MATLAB 数据模拟图, 点线为理想状态下得到的干涉图, 实线为有变化初相位的干涉图; 下图为有变化初相位的干涉图的频谱图。由图可得, 与理想的干涉图相比, 存在初相位的干涉图干涉强度最小点位置随着初相位值的变化, 时而超前, 时而滞后, 超前与滞后值的大小由 $\Delta l/\lambda_0$ 确定, 它将直接影响重建频谱的信噪比。在频谱上, 有变化初相位干涉图的重建光谱有谱线展宽, 两侧甚至出现侧峰。为了保证重建光谱的信噪比, 必须得限定 Δl 的范围。

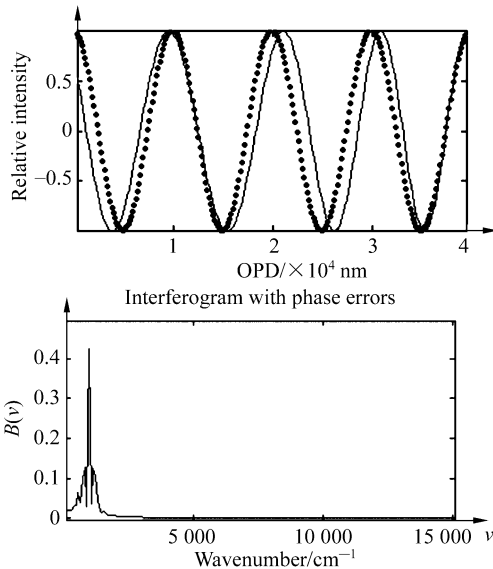


图 3 单色光源干涉图及其频谱图(1)

Fig. 3 Interferogram and spectra of the single lamp-house(1)

由相位误差引起重建频谱畸变的原理可得相位误差判据^[2]:

$$\Delta l/\lambda_0 < 1/\text{SNR}, \quad (18)$$

即

$$\Delta l_{\max} = \lambda_0/\text{SNR}, \quad (19)$$

3.2.2 Δl 随着光程差 l 的改变而快速变化

图 4 为此状态下单色谱线干涉图的 MATLAB 数据模拟图, 点线为理想状态下得到的干涉图, 实线为有变化初相位的干涉图; 下图为有变化初相位的干涉图的频谱图。由图可得, 与理想的干涉图相比, 存在初相位的干涉图上有毛刺现象。频谱分析中, 由于 Δl 随着光程差 l 的改变而快速变化, 而且具有随机性, 所以初相位函数频谱较宽, 有高频分量; 在重建光谱中可看到分布到整个频率域的噪声频率。

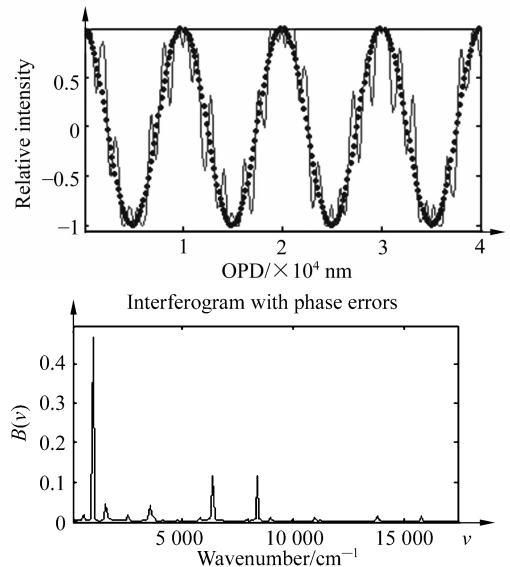


图 4 单色光源干涉图及其频谱图(2)

Fig. 4 Interferogram and spectra of the single lamp-house(2)

若依旧将图(3)情况下得到的判据作为此时的相位误差判据, 设 SNR 为 100 dB, 那么有 $2\pi\nu\Delta l \leq 2\pi/\text{SNR} = 0.02\pi$, 进行三角函数运算时, 它可看作微小量, 此时余弦因子可展开为

$$\cos[2\pi\nu(l + \Delta l)] \approx \cos(2\pi\nu l) - \sin(2\pi\nu l) \times (2\pi\nu \Delta l), \quad (20)$$

相当于余弦因子引入了加性随机噪声 $N(l) = -\sin(2\pi\nu l) \cdot (2\pi\nu \Delta l)$ 。若把初相位看作为等概率分布在 $(-0.02\pi, 0.02\pi)$ 的随机变量, 通过计算功率谱可得到此时的信噪比为 60 dB 左右, 与 100 dB 相比, 信噪比降低。由式(20)可得: (1) 初相位函数的频谱与噪声的频谱直接相关联, 当它的频谱很宽时, 噪声的频谱也相应变宽; 初相位函

数越接近含高频的随机噪声,信噪比越低。(2)通过功率谱来计算信噪比比较复杂,但是初相位函数的最大值直接限定了噪声功率的幅度。因此,不论初相位函数频谱如何,只要对它幅度的最大值时的 ΔI_{\max} 作了限定,就可实现对重建光谱的信噪比的控制。

在实际的干涉仪系统中,初相位函数的频率 f 由动镜抖动的的时间频率 f_i 与动镜运动速度 V 决定,若 f_i 为10 Hz, V 为5 mm/s,那么相对于光源的波数来说 f 的频率为 f_i/V ,即为 20 cm^{-1} 。影响 f 的因素中,环境因素和轨道不平整度带来的抖动频率较低,起决定作用的是动镜驱动系统。在动镜匀速运动过程中,初相位函数的频率相对较小,通常用第一种情况下的相位误差判据即可。在动镜的加速和减速阶段,当动镜速度较小时,初相位函数的频率相对较大,更接近第二种情况,此时不适合采集信号光束干涉图数据。

在相位误差控制中,对于信号光束,光束中心和倾斜中心点尽可能重合,通过减小 x_0, y_0 来降低对 θ_{\max} 和 β_{\max} 的要求。对参考激光光束来说,光束中心离倾斜中心点相距较远,初相位引入的周期抖动和频率噪声更大,但是参考光束频率单一,通过滤波处理能恢复出信噪比较高的干涉图,提供给干涉系统的准直校正系统输入端。

以上都是以单一频谱光源为例来分析的,实际的信号光源有一定的频率范围,为了保证系统的性能指标,误差分析时,须用最大频率 ν_{\max} 来讨论。

4 校准方法讨论

基于平面反射镜的干涉仪设计中,由于机械加工精度有限,再加上环境因素的影响,动镜的倾斜角度难以保证在误差允许范围内。为保证干涉仪的准直精度,建立反馈系统进行动态准直校正

十分必要。一般可通过以下两条途径来实现干涉系统的动态准直校正。

(1)使用传感器对动镜的姿态进行实时检测,通过反馈控制系统对动镜进行实时状态控制,把两个倾斜角度 θ_{\max} 和 β_{\max} 的值限制在性能要求的范围内,光束中心与 xoy 倾斜中心尽可能的重合。磁悬浮式动镜系统可以采用此方案。

(2)在参考光束的 S 面上安置探测器阵列,通过检测不同探测单元输出的干涉图之间的相位差,确定动镜的倾斜角度和倾斜方向,再反馈控制定镜姿态,使其与动镜的镜像尽量保持平行,减小动镜和定镜之间的相对倾斜角度^[3]。

5 结论

本文建立的干涉系统模型基于最基本的平面反射镜迈克尔逊干涉系统,其入射光束以矩形光束为例,在实际的干涉仪研制中,动镜可能采用抗倾斜能力更强的角反射体,入射光束可能为圆形光束,但是可通过同样的思路来进行倾斜误差分析,只是在光路计算有所不同。总而言之,动镜在运动过程中产生倾斜对光谱仪的性能影响很大,当入射光束尺寸已经确定时,动镜相对定镜的最大倾斜角度必须得控制在一定的范围内,否则就会产生大的调制角度误差。同时尽量使光束的中心与动镜倾斜中心重合,以减少动镜倾斜时带来的相位误差。

在我们设计的傅里叶红外光谱仪中,动镜采用石墨套筒和直线电机驱动,大大减小了动镜自身的抖动;同时建立参考激光干涉光路,采用定镜自适应动态准直技术。试验证明,采用定镜自适应动态准直后,干涉仪的准直性能大大提高,同时对动镜的驱动系统设计和机械加工精度要求大大降低。

参考文献:

- [1] 相里斌,杨建峰.干涉光谱仪动镜倾斜误差容限分析[J].光子学报,1997,26(2):132-135.
XIANG L B, YANG J F. The tolerance of the mirror tilting in Fourier transform spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(2): 132-135. (in Chinese)
- [2] 相里斌.傅里叶变换光谱仪中的主要技术环节[J].光子学报,1997,26(6):550-553.
XIANG L B. The key design issues in Fourier transform spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(6):

550-553. (in Chinese)

- [3] 于立民, 代作晓. 相位检测法定镜自适应校正技术[J]. 光学 精密工程, 2003, 10 11(5): 448-452.
YU L M, DAI X Z. Adaptive alignment of fixed mirror by phase detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(5): 448-452. (in Chinese)
- [4] BELL R J. *Introductory Fourier transform spectroscopy*[M]. New York :Academic Press, 1972.
- [5] 于立民. 傅里叶变换光谱仪自适应校正系统的研究[J]. 红外, 2001, 12:1-11.
YU L M. Adaptive alignment system on Fourier transform spectroscopy [J]. *Infrared*, 2001, 12:1-11. (in Chinese)
- [6] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术与应用[J]. 科学文献出版社, 1994, 12:24-25.
WU J G. The technology and application of Fourier transform spectroscopy[J]. *Scientific and Technical Documents Publishing House*, 1994, 12:24-25. (in Chinese)

作者简介:尹邦胜(1980—),男,湖南邵阳人,武汉大学电信学院测试计量技术与仪器 2003 级硕士研究生,主要研究方向为傅里叶红外光谱仪, DSP。电子邮箱: wisdomyin@eyou.com
曾立波(1963—),男,湖南邵阳人,教授,武汉大学“光谱与成像仪器工程中心”主任,研究方向为光谱与成像仪器,图像处理等等。