

空间调制傅里叶变换红外光谱仪多级微反射镜倾斜误差分析

郑莹^{1,2}, 梁静秋^{1*}, 梁中翥¹

1. 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
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 空间调制傅里叶变换红外光谱仪无可动部件, 系统稳定而紧凑, 而且程差可控, 可实现在线监测和实时检测。多级微反射镜是光谱仪干涉系统的关键器件, 其在系统中的位置精度对光谱仪性能影响很大。本文对多级微反射镜的倾斜误差引起的光程差变化进行了理论计算, 并利用光学软件进行了模拟仿真。分析结果表明, 随着多级微反射镜倾斜角度的增大, 干涉图对比度下降, 对应的光谱图脉冲谱线展宽, 信噪比下降, 严重时会出现波数偏离。以上分析方法对后期系统公差分配及装调有着重要的指导意义。

关键词 傅里叶变换; 空间调制; 红外光谱仪; 多级微反射镜; 误差分析

中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)07-1999-04

引言

在传统的时间调制傅里叶变换红外光谱仪中, 动镜的移动情况直接影响着光谱仪的性能。为了控制调制误差和位相误差, 要求动镜保持高精度匀速直线运动, 并与定镜保持严格垂直。目前, 人们在动镜倾斜误差容限分析方面已进行了较多的研究^[1-6], 而对空间调制傅里叶变换红外光谱仪中代替动镜的关键器件倾斜误差的分析则鲜有报道。本文基于空间调制傅里叶变换红外光谱仪结构模型^[7], 对干涉系统的核心器件——多级微反射镜的倾斜误差进行了理论计算, 并利用光学软件对其引起的干涉图和光谱图变化进行了模拟分析, 为后期多级微反射镜的工艺制作以及整个干涉系统的公差分析和装调提供了理论依据。

1 光谱仪工作原理

图1是基于多级微反射镜的空间调制傅里叶变换红外光谱仪原理图。图1(a)是该光谱仪的干涉系统结构模型, 光源发出的光经过准直透镜后变为平行光束, 由分束器分为强度相等的两束光, 分别投射到两个多级微反射镜的每个子反射面上。反射后的两束光再次经过分束器, 由多级微反射镜的结构决定光程差的空间分布, 在探测器阵列上形成干涉图的空间采样。图1(b)为两个多级微反射镜级次 m 均为 4 时的

光程差分布示意图。图1(c)为面阵探测器接收的两束光干涉得到的干涉图。最后, 经放大器、A/D转换器等, 由计算机处理得到相应的归一化光谱图, 如图1(d)所示。

2 多级微反射镜倾斜误差分析

2.1 多级微反射镜倾斜误差理论计算

图2是干涉系统坐标示意图, 以分束器中心 O 为原点, 建立 XYZ 右手直角坐标系。在装调过程中, 两个多级微反射镜不可避免地会绕平行于 X , Y 和 Z 三条坐标轴的轴线有一轻微的转动量。绕垂直于多级微反射镜子反射面的轴线方向的轻微转动(即 $M1$ 相对于 Z 轴, $M2$ 相对于 X 轴)对系统性能参数的影响可以忽略, 而绕另外两个方向的轴线转动(即 $M1$ 相对于 X 轴和 Y 轴, $M2$ 相对于 Y 轴和 Z 轴)而引起的误差会对系统采样带来较大的影响。由于 $M1$ 和 $M2$ 的倾斜是相对的, 故只分析其中之一即可, 下面以第一多级微反射镜 $M1$ 为例着重对后者进行分析。

由于光程差的空间分布 $\delta(x, y)$ 是由多级微反射镜的特定结构产生的, 在理想情况下, 探测器上的干涉光强信息可以表示为

$$I(x, y) = \int_0^{\infty} B(\nu) e^{i2\pi\delta(x, y)\nu} d\nu \quad (1)$$

其中, $\nu = \frac{1}{\lambda}$ 是光源的空间频率, $B(\nu)$ 为光源的功率谱密度。

收稿日期: 2011-11-13, 修订日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61027010, 60977062)和国家(863计划)(2009AA04Z315)资助

作者简介: 郑莹, 女, 1986年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: opticszhy@163.com

* 通讯联系人 e-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

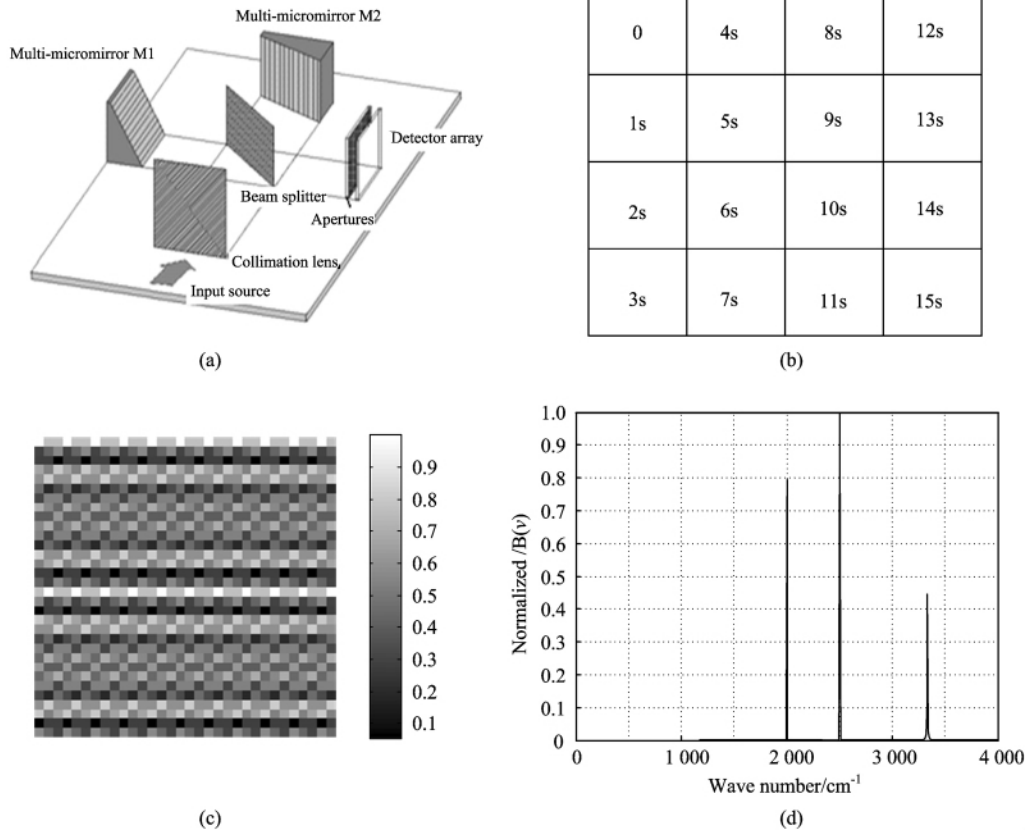


Fig 1 Schematic diagram of spaced-modulated Fourier transform infrared spectrometer

(a): Interferometric system; (b) OPDs array in 4 multiply 4 mode; (c) The interferogram; (d) The spectrogram

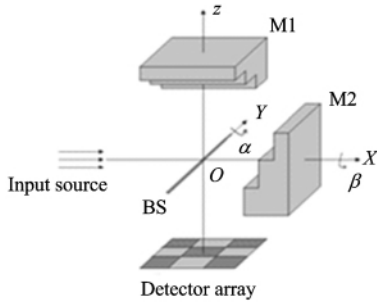


Fig 2 Sketch map of interferometric system coordinate

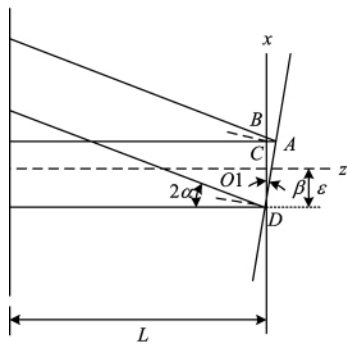


Fig 3 Sketch map of subreflecting surface in M1

当多级微反射镜 M1 绕 X 轴和 Y 轴方向产生倾斜时, 即当倾斜角 α 和 β 不同时为零时, 平行于 Z 轴的光入射到多级微反射镜反射面并被反射后偏离 Z 轴方向, 从而使得干涉图上每一个图元对应的光程差的空间分布发生变化, 由 $\delta(x, y)$ 变为 $\delta(x, y) + \Delta\delta(\alpha, \beta)$, 从而调制了干涉图上的光强信息。以 M1 绕 Y 轴旋转为例, 图 3 是 M1 的一个子反射面的倾斜示意图, D 是倾斜中心, α 是倾斜角, ϵ 是倾斜中心与入射光束中心 O_1 的距离, 设子反射面到探测器接收面的距离为 L , 此时, 倾斜引起的光程差变化值可以表示为

$$\Delta\delta = \frac{2L\sin^2\alpha}{\cos 2\alpha} + (x - \epsilon)\tan 2\alpha \quad (2)$$

L 是光程差 $\delta(x, y)$ 的函数, 因此可以看作是 x 和 y 的函数, 即 $\Delta\delta$ 是关于 x 和 y 与 α 的函数。同理, M1 绕 X 轴旋转造成倾斜产生的 $\Delta\delta$ 是 x 和 y 与 β 的函数。当同时存在绕 X 轴和 Y 轴方向旋转时, 实际光程差表示为 $\delta(x, y) + \Delta\delta(x, y, \alpha, \beta)$ 。对应的实际干涉光强信息可以表示为

$$I(x, y) = \int_0^\infty B(v)e^{i2\pi(\delta(x, y) + \delta(x, y, \alpha, \beta))} dv \quad (3)$$

2.2 多级微反射镜倾斜模拟仿真及结果分析

现设定入射波长 λ 为 3, 4 和 5 μm , 对应的波数分别为 3 333, 2 500 和 2 000 cm^{-1} 。以多级微反射镜 M1 绕过中心点的 Y 轴旋转为例模拟分析倾斜对复原光谱的影响。图 1(c) 和(d) 是倾斜角度 α 为 0 时的理想干涉图和光谱图; 图 4 和图 5 分别是倾斜角度 α 为 0.003° 与 0.01° 时的干涉图。与理

想干涉图比较, 倾斜角度的增大使得干涉图的调制度下降, 干涉图退化, 甚至干涉条纹局部位置发生对比度反转。

将以上二维干涉图信息进行数据预处理, 然后对干涉图上空间分布的灰度信息做FFT运算, 即可得到对应的光谱

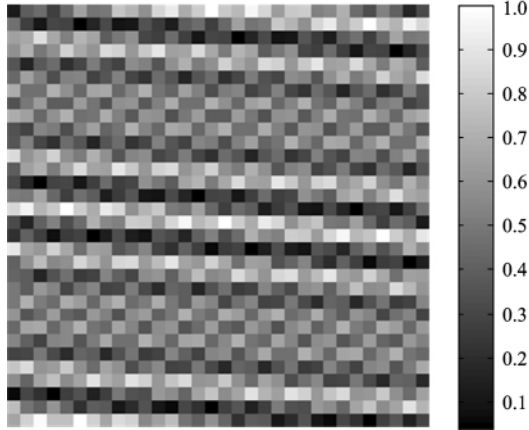


Fig 4 Interferogram($\alpha=0.003^\circ$)

复原图。图 6 和图 7 分别是 α 取 0.003° 和 0.01° 时的干涉图解调后得到的光谱信息图。图 8 是 α 取 0.01° 时局部光谱信息经放大后与 α 为 0 时的理想光谱信息对比图。可以看出, 光源真实的脉冲谱线展宽, 波数出现偏离, 且大波数谱线偏离较大, 并伴有噪声, 从而导致信噪比下降。

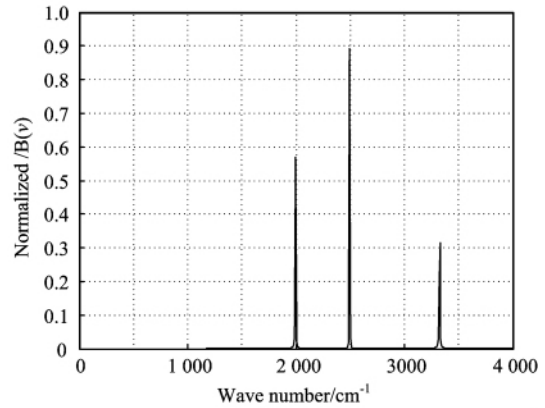


Fig 6 Spectrogram($\alpha=0.003^\circ$)

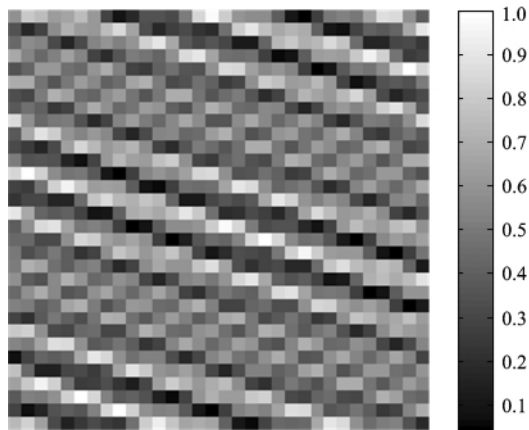


Fig 5 Interferogram($\alpha=0.01^\circ$)

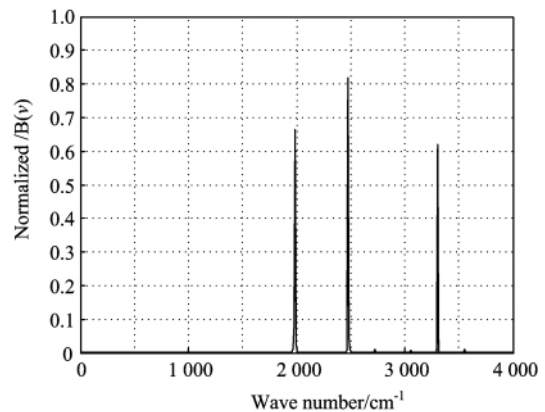


Fig 7 Spectrogram($\alpha=0.01^\circ$)

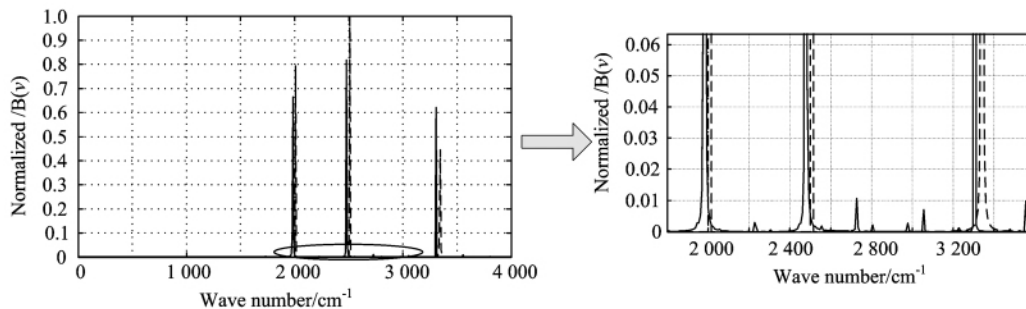


Fig 8 Sspectrogram $\alpha=0$ (dashed line) vs. $\alpha=0.003^\circ$ (real line)

对于不同的倾斜角度, 计算光谱仪信噪比, 将其与倾斜角度的关系绘成曲线, 如图 9 所示。

由图可以看出, 随着多级微反射镜倾斜角度 α 的增大, 光谱仪信噪比下降。故根据不同傅里叶变换光谱仪系统的信噪比等性能的要求, 应尽量减小多级微反射镜倾斜带来的相位误差。

3 结 论

在多级微反射镜的实际制作及装调中, 多级微反射镜的基底加工误差和工艺误差乃至装调位置误差, 都直接影响空间调制傅里叶变换红外光谱仪的性能。本文从理论上计算了

多级微反射镜倾斜引起的光程差的变化,并以第一多级微反射镜 M1 绕过中心点的 Y 轴旋转为例,模拟分析了多级微反射镜的倾斜对干涉图及复原光谱图的影响。结果表明,随着多级微反射镜倾斜角的增大,干涉图逐渐退化,对应的光谱图脉冲谱线展宽,波数出现偏离,信噪比下降。对于实际系统中多级微反射镜存在的多个方向的倾斜,也都可以采用这种思路进行分析。

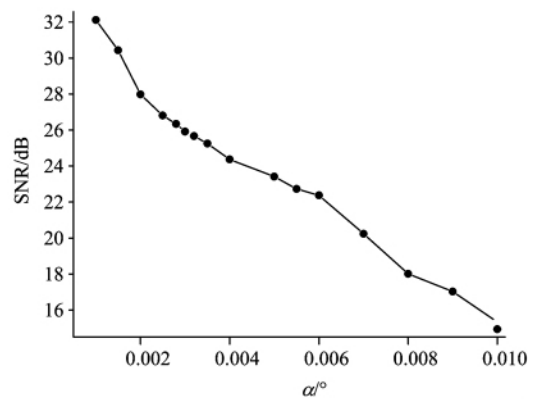


Fig 9 Curve of SNR vs. α

References

- [1] YIN Bang-sheng, ZENG Li-bo, LEI Jun-feng, et al(尹邦胜, 曾立波, 雷俊锋, 等). Optical Instruments(光学仪器), 2006, 28(1): 74.
- [2] ZENG Li-bo, YIN Bang-sheng, HE Bing, et al(曾立波, 尹邦胜, 何冰, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2006, 14(2): 191.
- [3] YANG Kun, ZENG Li-bo, LEI Jun-feng, et al(杨琨, 曾立波, 雷俊锋, 等). J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)(华中科技大学学报·自然科学版), 2009, 37(3): 5.
- [4] XIANGLI Bin, YANG Jian-feng, GAO Zhan, et al(相里斌, 杨建峰, 高瞻, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 1997, 26(2): 132.
- [5] YANG Qing-hua, ZHOU Ren-kui, ZHAO Bao-chang(杨庆华, 周仁魁, 赵葆常). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2009, 38(3): 678.
- [6] XIANGLI Bin, ZHAO Bao-chang, XUE Ming-qiu, et al(相里斌, 赵葆常, 薛鸣球, 等). Optoelectronics · Laser(光电子·激光), 1997, 8(3): 156.
- [7] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qiu, LIANG Zhong-zhu, et al(孔延梅, 梁静秋, 梁中翥, 等). Semiconductor Optoelectronics(半导体光电), 2008, 29(1): 1.

Analysis of Multi-Micromirrors Tilt Error in Space-Modulated Fourier Transform Infrared Spectrometry

ZHENG Ying^{1,2}, LIANG Jing-qiu^{1*}, LIANG Zhong-zhu¹

1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The system of space-modulated Fourier transform infrared spectrometer without moving parts is stable and compact, moreover, it can realize the on-line monitoring and real-time detection. The position accuracy of multi-micromirrors as the key components has a great influence on spectrometric performance. In the present paper, the multi-micromirrors tilt error caused by optical path difference changes was calculated and simulated. The analysis shows that, as the multi-micromirrors tilt angle increased, the interference pattern contrast decreased and the signal to noise ratio reduced. The results could be used in the tolerance distribution and the systemic alignment in the next step.

Keywords Fourier transform; Space-modulated; IR spectrometer; Multi-micromirror; Error analysis

(Received Nov. 13, 2011; accepted Feb. 20, 2012)

* Corresponding author