

文章编号: 1672-8785(2018)04-0039-04

## 转镜透射式傅里叶光谱仪光程差的非线性分析

胡德信<sup>1,2</sup> 韩顺利<sup>2</sup> 张志辉<sup>2</sup>

(1. 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555;

2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

**摘 要:** 转镜透射式傅里叶光谱仪具有可靠性高、光谱分辨率高、测试速度快等优点, 但在正常匀速转动扫描光程差的情况下, 存在光程差的非线性问题。针对转镜透射式傅里叶光谱仪的光程差的扫描非线性问题进行了分析, 提出了一种光程差非线性数学计算模型, 建立了转镜光程差方程, 并进行了 MATLAB 仿真分析。通过速度反馈电机控制转镜匀速旋转时, 根据本文的非线性光程差方程可获得等光程差对应的时间非均匀关系, 从而可实现时间的非均匀采样, 并反演出准确光谱, 而不必采用稳频氦氖激光器触发采样, 可以节省成本和减小仪器的体积与重量。

**关键词:** 转镜傅里叶光谱仪; 光程差; 非线性

**中图分类号:** TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.04.008

## Nonlinear Analysis of Optical Path Difference of Rotary Fourier Transform Spectrometer

HU De-xin<sup>1,2</sup>, HAN Shun-li<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-hui<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China;

2. The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Rotary Fourier transform spectrometers have many advantages such as high reliability, high spectral resolution and fast test speed etc. But when it scans optical path difference by uniform rotation, there is a nonlinear problem for the optical path. The nonlinear optical path difference scanning of a transmission Fourier spectrometer is analyzed. A mathematical model of nonlinear optical path difference is proposed. The optical path difference equation is established and the MATLAB simulation is carried out. When a rotating mirror is controlled to rotate at a constant speed by a speed feedback motor, the inhomogeneity of time can be obtained according to the established nonlinear equation. So the non-uniform sampling of time can be realized and accurate spectra can be obtained. Instead of using a stabilized He-Ne laser to trigger sampling, it can save cost and reduce the volume and weight of the spectrometer.

**Key words:** rotary Fourier Transform spectrometer; optical path difference; nonlinear

收稿日期: 2018-01-31

作者简介: 胡德信(1985-), 男, 山东青岛人, 硕士, 工程师, 主要从事光电子测试技术研究。

E-mail: 1041260259@qq.com

## 0 引言

傅里叶光谱仪与色散型光谱仪相比, 具有许多优势<sup>[1-2]</sup>, 如光谱分辨率高、辐射通量大、测试速度快、工作波段宽等。正是由于有以上的诸多优点, 傅里叶光谱仪近年来得到了快速发展, 而且性能也在不断提高, 特别是在红外波段的光谱测试与分析方面, 其应用非常广泛, 非常适于物质的定性鉴别与定量分析<sup>[3]</sup>。它的测量原理是基于傅里叶光谱学原理, 利用干涉图和目标辐射光谱之间的内在联系, 通过获得被测目标的干涉图并对其进行快速傅里叶变换, 最终得到光谱图<sup>[4]</sup>。

傅里叶变换光谱仪的核心是迈克尔逊干涉仪, 通过反演迈克尔逊干涉仪的干涉谱获得入射光的光谱构成。由于迈克尔逊干涉仪为精密光机单元, 且有动镜光程差扫描机构, 采用传统迈克尔逊干涉仪结构无法满足光谱仪的环境适应性要求。因此, 各种改进型的迈克尔逊干涉仪被研发出来, 如透射转镜型、角镜摆动型、三角共路型<sup>[5]</sup>、双面动镜型等, 且这些干涉仪已具有良好的应用。

透射转镜式结构由于具有分辨率高、稳定性好、测试速度快等优点, 已取得良好的测试效果。但传统的触发采样均采用稳频氦氛激光器, 其体积大, 价格昂贵, 并配有驱动电源, 增加了光谱仪的成本、体积与重量。因此, 人们考虑采用其它方法来实现等光程差采样。由于转镜在旋转扫描过程中存在非线性, 会对反演结果造成影响, 因此, 对转镜非线性的研究有非常重要的意义。

## 1 转镜透射式傅里叶光谱仪

经典的迈克尔逊干涉仪主要由分束器、定镜、动镜和探测器组成, 它是通过动镜的平移实现光程差的改变的。由于动镜采用的是平面反射镜, 平移扫描过程中的振动与倾斜对测试结果影响较大, 甚至会导致两路光无法发生干涉的情况。

基于转镜的迈克尔逊干涉仪如图 1 所示。

通过固定两臂的平面反射镜实现测试稳定性, 光程差的扫描通过转动中间的转镜来实现。由于是透射式, 转镜在转动过程中的振动倾斜对测试结果的影响很小, 从而大大提高了干涉仪测试的稳定性。

转镜透射式迈克尔逊干涉仪主要由一个分束器、四个反射镜和一个转镜组成, 如图 1 所示。其中, 分束器由分束镜和补偿镜构成, 两者的材料和厚度均相同。四个反射镜可通过镀金来提高宽波段红外光的反射率, 转镜可通过镀增透膜来提高宽波段红外光的透过率。目标入射光在分束器被分为两路, 其中透射光部分被 R1 反射, 透过转镜后被 R3 反射, 再次透过转镜后经 R1 反射回分束器, 并被分束器反射至红外探测器, 形成第一路输出光; 而反射光部分被 R2 反射, 透过转镜后被 R4 反射, 再次透过转镜后被 R2 反射回分束器, 继续透过分束器至红外探测器, 形成另一路输出光; 这两路输出光最终在探测器上形成干涉信号并被探测。随着透射式转镜的旋转, 两路光通过转镜的光程发生变化, 从而实现了光程差的扫描。

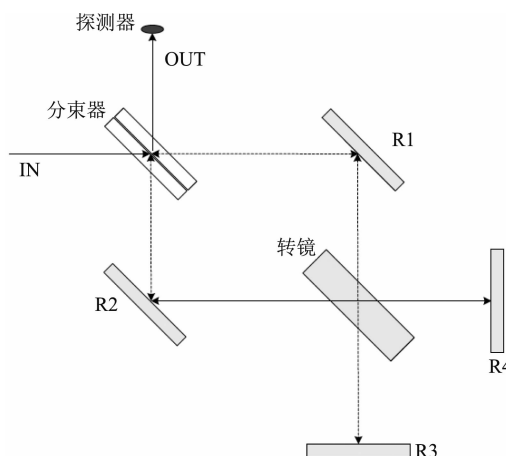


图 1 基于转镜的迈克尔逊干涉仪

## 2 转镜扫描光程差及其非线性计算

调整好干涉仪光路, 固定四个反射镜。在尚未加入转镜时, 从分束器入射、然后沿原路返回分束器的透射光部分与反射光部分经过的光程分别为  $2L_1$  和  $2L_2$ , 也就是单程光程分别为  $L_1$  和  $L_2$ 。加入转镜后, 若两路入射光与转

镜形成的入射角分别为  $\alpha$  与  $\beta$ , 那么根据简单的三角关系可知,  $\alpha + \beta = 90^\circ$ 。由于转镜的折射率大于 1, 加入转镜后, 光程增加, 设透射光部分与反射光部分的光程增加量分别为  $2\Delta L_1$  和  $2\Delta L_2$ 。

因此, 光程差由两部分组成: (a) 未加入转镜时的光程差  $2(L_1 - L_2)$ ; (b) 加入转镜后, 两路光程增加量的差值  $2(\Delta L_1 - \Delta L_2)$ 。即:

$$\Delta = 2(L_1 + \Delta L_1 - L_2 - \Delta L_2) \quad (1)$$

如图 2 所示, 经过转镜后光路发生变化, 虚线为未加入转镜的光路, 实线为加入转镜后的光路。对于透射光, 加入转镜后, 光程的单程增加量可表示为

$$\Delta L_1 = n \times f_2 - f_1 \quad (2)$$

根据三角函数关系, 可得方程组:

$$f_2 = \frac{d}{\cos\theta} \quad (3)$$

$$f_1 = f_2 \times \cos(\alpha - \theta) = d \times \frac{\cos(\alpha - \theta)}{\cos\theta} \quad (4)$$

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\theta} \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为入射角,  $\theta$  为折射角,  $d$  为转镜厚度,  $n$  为转镜折射率。

因此, 在入射角  $\alpha$  已知的情况下, 该透射光部分的单程光程增加量为

$$\Delta L_1 = \frac{d}{\cos\theta} [n - \cos(\alpha - \theta)] \quad (6)$$

式中,

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right) \quad (7)$$

同理, 也可获得反射光的单程光程增加量:

$$\Delta L_2 = \frac{d}{\cos\theta'} [n - \cos(\beta - \theta')] \quad (8)$$

式中,

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{\sin\beta}{n}\right) \quad (9)$$

再根据式(1), 可最终获得该条件下两路光的光程差。一般情况下, 我们将初始未加入转镜的两路光程调至相等, 即:  $L_1 = L_2$ 。那么, 最终的两路光程差方程为

$$\Delta = 2(\Delta L_1 - \Delta L_2) =$$

$$2 \left\{ \frac{d}{\cos\theta} [n - \cos(\alpha - \theta)] - \frac{d}{\cos\theta'} [n - \cos(\beta - \theta')] \right\} \quad (10)$$

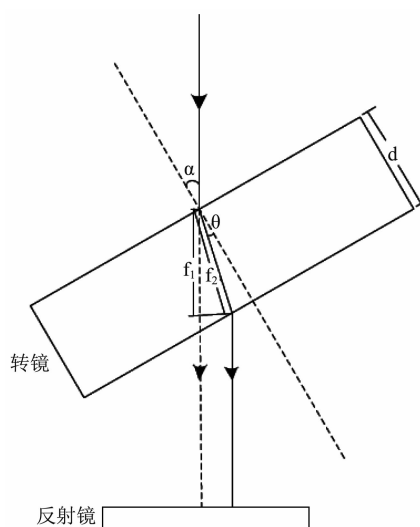


图 2 加入转镜后的光程增加情况

随着转镜的旋转, 入射角  $\alpha$  发生改变。由于旋转过程具有对称性, 只需分析角度范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$  时的光程差变化规律即可。通过 MATLAB 计算了采样角度范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$  时光程差的变化曲线。设转镜的厚度为 25 mm, 未加转镜时两路光程相等, 仿真结果如图 3 所示, 两条曲线分别是转镜折射率为 1.5 和 2.5 时光程差随入射角变化的曲线图。

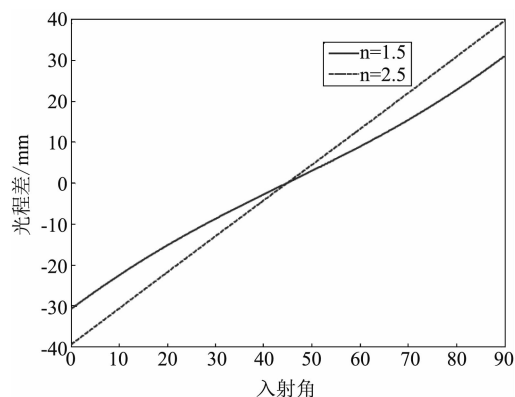


图 3 光程差随角度的变化

### 3 非线性分析

通过建立转镜光程差方程并进行 MATLAB 仿真, 可以看出, 光程差的非线性曲线关于转镜入射角为  $45^\circ$  处对称。因此, 一般调试

光路时, 将两光路调至光程相等, 即  $L_1=L_2$ , 使  $45^\circ$  处成为零光程差位置。可以看出, 随着转镜的转动, 若其中一路光程差改变量为  $\Delta l$ , 另外一路也相应改变  $-\Delta l$ , 又由于光线来回两次通过转镜, 最终形成的光程差为  $4\Delta l$ 。扫描的光程差大小直接与光谱分辨率相关。因此, 基于转镜的迈克尔逊干涉仪不仅可靠性高, 还可获得较大光程差, 便于提高光谱分辨率<sup>[6]</sup>。

若通过速度反馈电机可控制转镜在较理想的匀角速度下旋转, 按时间进行均匀采样就会出现如上的光程差非线性采样。而要获得较理想的测试光谱, 必须进行等光程差采样。因此, 需根据非线性光程差方程获得等光程差对应的时间非均匀关系。如果据此进行时间的非均匀采样并反演, 就不必采用稳频氦氛激光器触发采样, 从而可节省大量成本, 并减小仪器的体积与重量。根据理论模型, 后续工作可在具体实验中进行验证。除此之外, 折射率色差也会对测试结果造成影响, 在精度要求较高的情况下, 还应校正不同波长的折射率差。

#### 4 总结

针对透射转镜式傅里叶光谱仪存在的光程差扫描非线性, 从转镜迈克尔逊干涉仪的工作原理出发, 提出了一种光程差非线性数学计算

模型, 建立了转镜光程差方程, 并进行了 MATLAB 仿真分析。据此, 若通过速度反馈电机可控制转镜匀速旋转, 根据本文的非线性光程差方程可获得等光程差对应的时间非均匀关系, 从而实现时间的非均匀采样, 并反演出准确光谱, 而不必采用稳频氦氛激光器触发采样, 可达到节省成本和减小仪器体积与重量的目的。基于理论模型, 可进行后续的实验验证工作。

#### 参考文献

- [1] 代作晓. 迈克尔逊型傅立叶光谱仪动镜直线运动 [J]. 红外, 2002, 23(2): 1-9.
- [2] 殷纯永. 现代干涉测量技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- [3] Henry B, Luc R, Francois C. Evolution of FTIR Technology as Applied to Chemical Detection and Quantification [C]. SPIE, 2004, 5269: 132-142.
- [4] 翁诗甫. 傅立叶变换红外光谱仪 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 沈为民, 时善进. 紧凑型静态傅立叶变换光谱仪 [J]. 半导体光电, 2001, 21(6): 50-55.
- [6] 吴航行, 华建文, 王模昌. 新型红外空间遥感用傅立叶变换光谱仪 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 397-400.

(上接第 32 页)

- [10] 冉晓强, 汶德胜, 邱跃洪, 等. 基于 FPGA 的空间面阵 CCD 相机驱动时序发生器与下位机的一体化设计 [J]. 光子学报, 2007, 13(s1): 278-281.
- [11] Laquerre P, Bernal O, Lescure M. Non-linear-

ity in High Gain CMOS Buffer Amplifiers for CCD Processor Applications [C]. Warsaw: IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 2007: 1-6.