

文章编号 1004-924X(2003)05-0448-05

# 相位检测法定镜自适应校正技术

于立民,代作晓,王模昌,施志华

(中国科学院 上海技术物理研究所,上海 200083)

**摘要:**为保持傅里叶变换光谱仪在动镜运动和外界震动等恶劣条件下动镜和定镜间的准直性,采用了相位检测法检测准直性误差的定镜自适应校正技术。介绍了相位检测法的基本原理和实现自适应校正的途径以及自适应校正系统的基本结构。采用高速压电倾斜镜作为驱动补偿元件,分析了相位检测精度对校正精度的影响。实验结果表明,采用自适应校正后系统干涉效率明显提高。

**关键词:**相位检测;自适应校正;准直性;高速压电倾斜镜

**中图分类号:**TH744.1 **文献标识码:**A

## Adaptive alignment of fixed mirror by phase detection

YU Li-min, DAI Zuo-xiao, WANG Mo-chang, SHI Zhi-hua

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In order to keep the dynamic alignment Fourier transform spectrometer (FTS) between the moving mirror and the fixed mirror while the mirrors are moving and the temperature is changing, a phase detecting method is proposed for magnitude and tilt direction. The structure of dynamic alignment system and the basic principle of the phase detection are discussed. Fast steering mirror is adopted in the self-alignment system. The features and structure of the fast steering mirror are detailed. Alignment results show that dynamic alignment has obvious effects on performance.

**Key words:** phase detection; adaptive alignment; collimation; piezoelectric fast steering mirror

## 1 引言

傅里叶变换光谱仪作为一种高分辨率的分光技术,具有分辨率高,有较高的光通量,采用单元探测器而不必采用探测器阵列且有较多的通道数等优点。近年来该项技术广泛用于物质分析、空间遥感等领域,具有很大的发展前景。

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,垂轴偏摆很小,这样对系统机械性能提出了很高的要求。由于单纯考虑机械结构

性能不能满足要求,环境温度的变化也对光谱仪产生无规律的影响,即使考虑到材料的温度膨胀系数进行结构优化,仍然不能解决温度对准直性的影响,因此解决准直性变化是傅里叶光谱仪的一个难点。

傅里叶光谱仪的动态校正就是基于光谱仪的上述缺陷而采用的一种措施。这种技术的优点可以表现为以下几方面<sup>[1]</sup>:

(1) 采用定镜动态校正系统可以保证光谱仪的工作性能在一定的范围内得到改善。

(2) 采用定镜动态校正系统可以使某些动镜

运行要求放宽。采用动态校正系统可以对电机机械系统的精度要求从零点几  $\mu\text{m}$  放宽到几十  $\mu\text{m}$ , 这对驱动电机是非常重要的。

(3) 能够自适应校正的光谱仪有助于克服机械震动、大气扰动和温度变化等带来的影响, 为光谱仪能够在一定的不良条件(震动、温度变化)下工作提供了可能性。

(4) 自适应校正系统不仅在傅里叶光谱仪上可以应用, 还可以扩展到其他仪器。

定镜自适应校正系统是根据自适应光学原理<sup>[2]</sup>, 采用快速倾斜反射镜来补偿波前扰动、系统震动等产生的准直性变化, 响应速度快, 精度高, 具有很高的实际应用价值。

## 2 校正系统基本方案

### 2.1 干涉仪光路结构

自适应校正方案的种类很多, 随干涉系统光路结构和探测方案不同而不同, 本系统采用的基本方案如图 1 所示。

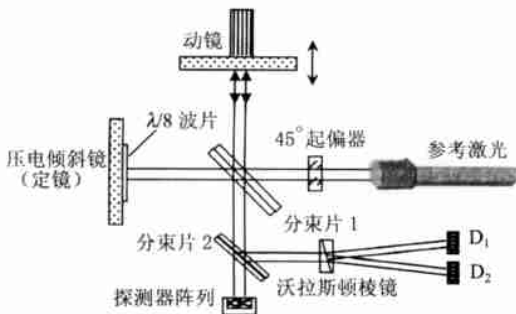


图 1 光谱仪系统及动态校正子系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of dynamic alignment system

系统由动镜、定镜和分束片组成, 三部分形成干涉系统。45°起偏器、 $\lambda/8$ 波片、沃拉斯顿棱镜以及两个探测器  $D_1$ 、 $D_2$  用来实现运动方向探测, 探测器阵列用来探测干涉信号, 从中取出倾角变化的值, 将倾斜的量值进行处理反馈给压电校正反射镜达到补偿误差的目的。

动镜作直线扫描运动, 形成光程差变化, 在探测器上得到与波长和光程差相关的干涉信号。为了得到稳定的干涉信号, 必须使动镜和定镜的像之间在运动中保证平行, 而由于动镜采用的运动机构必然使二者之间产生倾角, 并且大小和方向发生变化。激光经扩束系统产生平行光用作参考

光。由于激光的单色性好、干涉距离长, 可以产生稳定的干涉信号, 因此激光可以作为进行位移探测和干涉效果检验的标准尺度。

### 2.2 定镜校正的基本原理

定镜校正技术是根据位相探测原理, 由于倾斜角的存在使得探测器阵列面上光强分布的不均匀, 相位差与空间位置成线性关系, 因此探测干涉孔径范围内的相位就是探测干涉孔径范围内的光强不均匀度, 校正的最终目的是使整个干涉孔径范围内光强达到均匀。由于两探测器间测得的相位差与两探测器的间距及准直误差角度有关, 他们的关系可以用下面公式表示<sup>[3-4]</sup>。

$$\alpha_x = 4 \cdot \frac{X_2 - X_1}{D} \cdot \tan \alpha_x$$

其中  $X_1$ 、 $X_2$  分别表示两探测器的位置坐标。  $\alpha_x$  为准直误差倾斜角, 当角度很小时该公式可以近似为公式。

$$\alpha_x \approx 4 \cdot \frac{X_2 - X_1}{D} \cdot \alpha_x$$

因此可以认为两探测器间的相位差与误差角成线性关系。当两探测器间距一定时倾斜角度的最大值决定了相位差是否处于可测量的  $\pm$  范围。适当选择探测器间距, 间距大可以增加测量精度, 但是减小测量范围。间距太小可增加测量范围, 但是降低测量精度, 受探测器尺寸限制。

相位提取的基本原理是根据上述原理, 选取存在一定距离的两探测器, 两探测器接收有一定距离的两路干涉信号, 两路信号的相位差处于  $0 \sim \pm 180^\circ$  之间, 可以将相位差的值转化为脉动直流信号, 直流电平可以处理后用于控制或经过 A/D 进行数字信号处理等<sup>[5]</sup>, 基本工作框图如图 2。

校正的量值的确定是根据过零触发平均值检验原理。两路输入信号经过限幅放大, 成为等幅的两路交流信号, 再经过脉冲整形进行过零比较成为方波信号, 两路方波信号经过异或, 形成脉宽占空比与相位成正比的方波信号, 相位差越小脉宽占空比越小, 当两路信号相差为  $\pm 180^\circ$  时, 方波信号全部成为高电平。此信号经过一个低通滤波器产生一个脉动直流电压, 直流电压值的大小与脉冲宽度成正比。最大直流电压值等于方波信号的高电平值。限幅放大是为了保证干涉信号陡度一致, 以保证整形时翻转精度, 同时要保证信号的噪声水平和两路信号的对称性。误差值和对称性

决定了脉宽的精度和方向变化准确性,因此尽量做到两路信号的对称性。量值的精度决定了反射镜校正的精度。

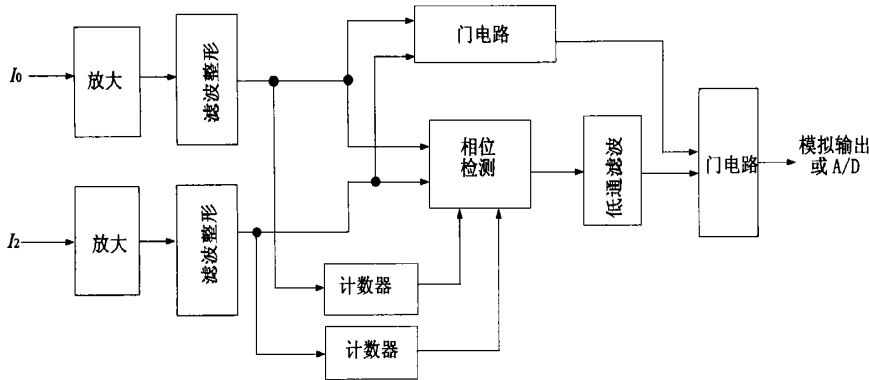


图 2 相位检测系统的基本框图

Fig. 2 Block diagram of phase detecting system

在相位差小于  $\pm 2$  时,由于方波脉冲信号周期内的积分值与脉冲宽度成线性关系,通过低通滤波器得到直流电压值用于小信号校正。当两路干涉信号相差超过  $\pm 2$  时,设两路信号某时刻脉冲数差为  $N$ ,  $\bar{v}$  为通过鉴相电路得到的方波信号经过反向和低通滤波得到的直流信号值,则实际相位差值  $V_o$  满足如下关系。

$$\begin{cases} V_o = \bar{v} + N \cdot v_s & N \text{ 为奇数} \\ V_o = v + N \cdot v_s & N \text{ 为偶数} \end{cases}$$

$v_s$  为使两路信号相位差增加或减少  $\pm 2$  时所对应的信号值,即当信号鉴相电路输出全部为高电平时得到的输出直流信号。该信号经过适当的处理电路,将信号的量值与方向信号相结合成为具有方向性的交流信号送到驱动机构。

倾斜误差方向的确定方法如下,两路方波信号进行鉴相的同时送入门控电路,当一路信号作为时钟信号而另一路作为触发信号,先后顺序的不同则触发产生不同的相反两电平。这两种电平代表了时钟信号正跳变相对于输入信号高电平的先后差别。两种时序信号对于不同先后顺序时的值,同样在一个波长范围内代表了两种不同的倾斜方向。

由于两信号脉冲数差值很大时,用以上方法进行方向检验不再可靠,因此采用如下方法进行方向判别。根据正交判向方法得到了动镜运动方向的信息,运动方向和反射镜的倾斜方向决定了在脉冲计数时计数值的正负。因此根据运动方向和计数值的正负可以得到倾斜方向信息,基本关

系如表 1。其中三者关系是在作了统一规定情况下,假定运动方向向前为状态 1,向后为状态 0,计数差值为正规定为状态 1,相反为 0。倾斜方向则符合给定的方向为状态 1 和 0。

由表 1 可以看出,倾斜方向与运动方向和计数差值之间的关系依赖于方向的定义。

表 1 动镜运动方向、计数差值与误差倾斜角方向的关系

Tab. 1 Relationship among moving direction, count number difference and tilt direction

动镜运动方向	计数差方向	倾斜方向
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

正交判向的原理如下。激光束经过 45°起偏器成为与水平和竖直成 45°角的线偏振光,光振动矢量两分量相位差为 0 或 180°,经过分束入射到动镜和定镜表面,从动镜反射回来的光仍然为线偏振光,偏振方向不变。入射到压电倾斜镜的线偏振光要两次经过 1/8 波片,两次经过 1/8 波片产生  $\pm 1/2$  或  $\pm 1/2 + 2k$  的相位差。由光振动矢量关系可知出射的光束变成圆偏振光。动镜和定镜的两路光再经过分束片后,圆偏振光和线偏振光发生干涉,其中圆偏振光水平分量与线偏振光水平分量干涉,垂直分量与垂直分量干涉。两路信号相差始终为动镜产生的相位差加或减  $\pm 1/2$ ,因此随着动镜运动方向的不同产生相位分别超前和滞后  $1/2$  的干涉条纹相位差,将两路信号

送入鉴相电路就可以得到运动方向信号。

### 2.3 快速压电倾斜反射镜的基本结构

快速压电倾斜反射镜的基本结构如图 3 所示,系统由殷钢基座、反射镜和压电驱动器组成<sup>[6-7]</sup>。其中压电驱动器是关键部件。应用中要

求三个压电驱动器物理特性和电-机械特性一致性较好,这样可以保证压电驱动器的校正精度和温度特性。该倾斜反射镜采用二维校正方式,如图 3 所示。

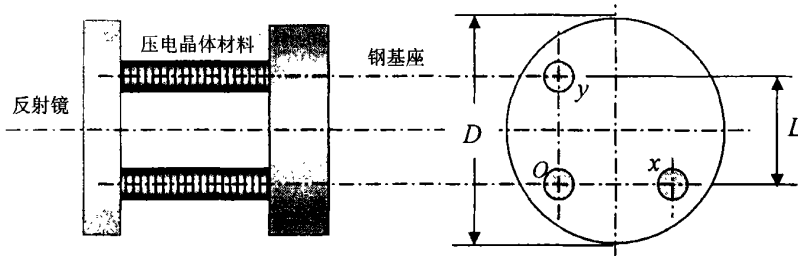


图 3 高速压电倾斜镜的基本结构

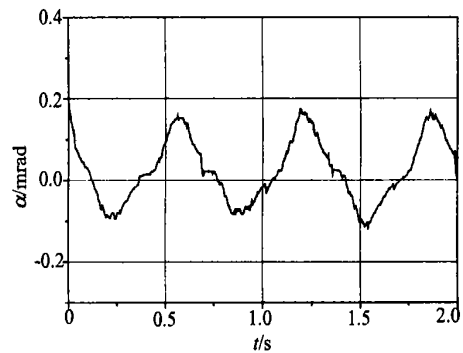
Fig. 3 Structure of piezoelectric fast steering mirror

基本参数如下:最大倾斜角  $\alpha_{max} = \Delta_{max} / L = \pm 4$ 。位移分辨率  $\Delta_{min} = 0.01 \mu\text{m}$ ,实际测得的角分辨率约为 0.15。系统带宽——最大倾角为  $\pm 2$  时带宽响应  $> 350 \text{ Hz}$ 。响应时间—— $\pm 4$  的响应时间为  $< 1 \text{ ms}$ 。

### 3 实验结果和误差分析

系统开环情况下测得倾斜误差结果如图 4 所示。(a)为静止时系统准直性失调误差角,(b)为动镜运动时产生的倾斜角变化。从图中可以看出,系统准直性受动镜结构的系统误差影响很大。

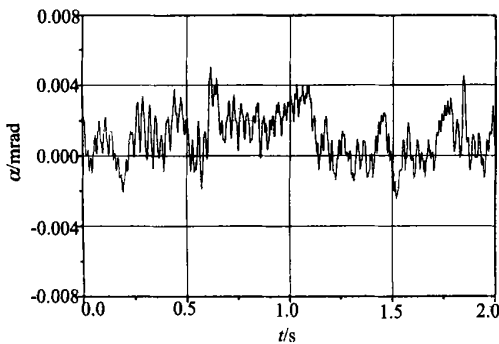
校正后的结果可以根据激光干涉信号的调制度来评价。图 5 为校正前后的信号调制度  $M$  随光程差  $\delta$  变化的曲线,曲线(1)为校正前的信号调制度,曲线(2)为校正后的信号调制度。



(b) 动镜运动时

(b) Moving mirror in moving state

图 4 准直性失调角度在动镜静止和运动时的情况  
Fig. 4 Misalignment angle in static and working state



(a) 动镜静止时

(a) Moving mirror in static state

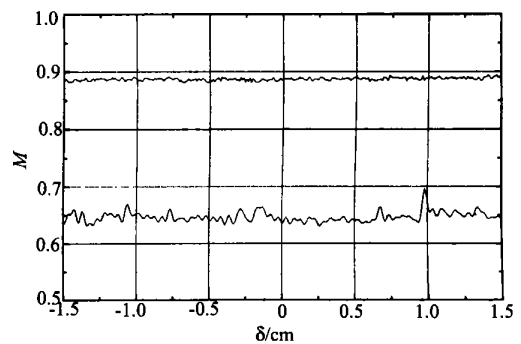


图 5 校正前后干涉光信号的调制度变化

Fig. 5 Modulation variation of interference signals before and after alignment

从实验结果来看,系统倾斜误差的大小和方向能够被实时探测到,系统的可见光调制度从原来的 65% 提高到 90% 左右。系统准直性误差角度减小到由于杂散光和衍射等效应的影响,系统的调制度不能达到 100%,因此实际信号在该调制度下可以满足系统要求。

通常情况下相位检测电路的相位检验精度为 1 左右,若以最大倾斜误差为 4,两探测器可检验的最大倾斜相位误差为 4,则角度校正误差为 0.3,这一误差值小于系统允许的最大准直性失调角。实际上为了放大相位检测范围而减小探测器间距,当探测器间距很小且探测器感光面尺寸一定时,探测到的相位差的误差要呈线性放大,所以探测器间距不能无限减小。

另外两路信号对称性的差异,以及两路电路

上参数的差别也影响输出信号的幅度,例如信号整形后,脉冲宽度的不同使得信号触发时机出现误差,脉冲沿的陡度的差异使脉冲宽度出现误差。方位信号出现微小误差。低通滤波及放大电路的模拟误差及 D/A 转换的分辨率误差等。

## 4 结论

从实验结果来看,定镜自适应校正系统可以准确检测出误差信号,并能够进行误差校正,经过校正的系统干涉效率明显提高。通过进一步完善信号信噪比和减小信号探测误差,校正的效果可以进一步提高。另外,减少探测器的数目也是进一步发展的方向。

### 参考文献:

- [1] 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 spectrometer[J]. *Infrared*, 2001, 12:1-11. (in Chinese)
- [2] 周仁忠, 阎吉祥, 俞信, 等. 自适应光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1996.  
ZHOU R ZH, YAN J X, et al. *Adaptive optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Publishing House, 1996. (in Chinese)
- [3] MACO Y N H, BROBERG H. Dynamic alignment design and assessment for scanning interferometers[J]. *SPIE*, 1996, 2832:126-154.
- [4] 郭红卫, 陈明仪. 相移器平移误差与倾斜误差不敏感相移新算法[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(2):185-188.  
GUO H W, CHEN M Y. New algorithm insensitive to the piston and tilt errors of reference mirror for phase stepping interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2):185-188. (in Chinese)
- [5] 尤德裴. 数字化测量技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1980.  
YOU D P. *Digital measuring technology* [M]. Beijing: Publishing House of Machinery Industry, 1980. (in Chinese)
- [6] 凌宁, 陈东红, 官春林, 等. 二维高速压电倾斜反射镜[J]. 光电工程, 1995, 22(1):151-160.  
LING N, CHEN D H. Two-dimension piezoelectrical fast steering mirror [J]. *Opto Electronic Engineering*, 1995, 22(1):51-60. (in Chinese)
- [7] 叶露. 主动调节刚性支撑薄膜型反射镜面形调整机构的研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(2):201-204.  
YE L. Micro-move devices for supporting and adjusting large membrane mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(2):201-204. (in Chinese)

作者简介:于立民(1973-)男,黑龙江绥滨人,2000年毕业于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所并获得硕士学位,现为中国科学院上海技术物理研究所博士研究生,主要从事星载红外傅里叶变换光谱仪自适应校正系统的研制工作。E-mail:toxiaoliuyu@sohu.com, Tel:021-65420850 转 45405。