

文章编号 1004-924X(2008)09-1677-05

# 基于虚拟锁相的原位光学测量技术

何玲平<sup>1,2</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 杨林<sup>1,2</sup>, 刘世界<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 构建了一套基于虚拟锁相放大技术能准确测量微弱信号的高精度宽波段原位光学测量系统。介绍了该测量系统的构建目的、系统结构及原理;通过美国 Ni 公司的图形化编程语言 Labview 虚拟实现了锁相放大器功能,并应用于本套测量系统;测量了系统光源在 200~2 500 nm 的光强分布以及系统的测量重复性。最后利用该套系统测量了一块石英玻璃的透过率,并与  $\lambda_{950}$  的测量结果比较,两者测量结果平均相差 0.95%。实验结果表明,虚拟锁相放大技术不仅能有效地抑制杂光和电气设备带来的噪声,而且简化了系统结构。

**关键词:** 原位光学测量;锁相放大;虚拟仪器;Labview

**中图分类号:** V251.2;TB96 **文献标识码:** A

## In situ optic measuring technique based on virtual lock-in

HE Ling-ping<sup>1,2</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>1,2</sup>, LIU Shi-jie<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** In order to measure the changes of optic characteristics for spacial materials before and after space radiation, a in situ optic measuring system with high precision and wide scanning wavelength was designed to measure feeble signal accurately buried in noise based on a virtual lock-in technique. The system structure, and measuring principle were introduced. Then, the G language Labview was used to develop a program to implement the virtual lock-in technique, and apply it in the system. After that, the light source intensity distribution and the system measuring repetitiveness were measured. Finally, proposed system was used to measure the transparence of a quartz glass. Compared with that of  $\lambda_{950}$ , the measured results show that the mean error between them is 0.95%. The experimental results indicate that the virtual lock-in technique not only restrains effectively the noise brought by interferential light and electronic equipment, but also simplifies the system structure; This in-situ measuring system by using such technique can accurately measure optic characteristics of spacial materials.

**Key words:** in-situ optical measurement; lock-in technique; virtual technique; Labview

## 1 引言

空间材料的光学性能测量对空间活动有着重要意义。一般地面都有空间环境模拟系统对空间材料进行辐射,然后用分光光度计等设备测量空间材料的光学性能变化;但是,样品离开真空后其性能会发生变化,影响了测量的准确性。因此,需要建立一套原位光学材料系统,在真空室里对其进行光学性能测量<sup>[1]</sup>。

光学性能测量属于精密测量技术,在测量中必须考虑环境杂光及电子系统噪声对测量精度的影响。尤其是红外部分,由于红外光能量小,且相关探测器灵敏度低,为了保证测量精度,一般都使用锁相放大器对测量信号进行锁相放大处理。本文利用 Labview 图形化编程语言,编程实现了该项功能,而不是采用锁相放大器。这样既简化了系统结构又降低了成本<sup>[2-3]</sup>。

## 2 测量原理

本测量系统的基本组成有光源系统、单色仪、准直系统、探测器系统以及信号采集、锁相分析处理及显示系统。

图 1 为其系统结构图:斩光器将光源发出的光调制成频率为  $f_s$  的调制光信号,同时产生一个频率为  $f_r$  ( $f_r = f_s$ )、占空比为 50% 的方波(作为参考信号用来进行锁相处理);调制光信号经单色仪分光之后变成单色调制光,然后经准直系统后成为平行光,再打在样品上,探测器测量其反射、散射或投射光强,通过单色仪扫描波长即可得到反射、散射或投射光强分布。

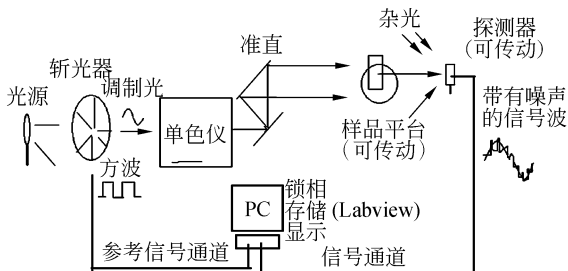


图 1 测量原理图

Fig. 1 Principle of measuring system

### 2.1 光源系统及斩光器

为了让系统获得从紫外到红外的光谱范围,本系统使用了两个光源。一个是氙灯,提供紫外光及部分可见(200~600 nm)光;一个是钨灯,提供部分可见及红外光(600~2 500 nm),将它们的光复合在一起就满足了系统的光源需求。

本文使用了 EG&G 公司的 Model 192 斩光器,调制频率连续可调,频率稳定度能达到 0.15%。

### 2.2 单色仪

本系统采用双光栅单色仪,最高分辨率能达到 0.4 nm,两光栅参数为 1 200 g/mm ( $\lambda_p = 500$  nm) 和 600 g/mm ( $\lambda_p = 1 000$  nm),能从紫外的 185 nm 扫描到红外的 2 500 nm。该单色仪采用非对称水平光路,消慧差设计。仪器的孔径数为  $F/4.5$ ,能很好地利用光能。单色仪的波长扫描准确度高,重复性好,最小步距能达到 0.02 nm。

该单色仪通过 RS232 串口同计算机相连,通过 Labview 编程实现波长扫描自动化。

### 2.3 探测器及其传动系统

对于紫外及可见光部分(200~860 nm),本文采用光电倍增管采集紫外光信号,对于红外光部分本文采用硫化铅红外探测器进行光信号采集。两个探测以固定间距一起固定在传动装置上,当光经过样品台反射后可以通过传动装置将探测器转动到合适位置以接收反射或(散射)光信号;单色仪扫描到 860 nm 时通过微调传动装置转换探测器,并可以左右扫描寻峰<sup>[4]</sup>。

### 2.4 数据采集系统

探测器探测到的信号经过信号通道连接到插在计算机 PCI 插槽上的数据采集卡上;本文采用了美国 NI 公司 PCI4472 数据采集卡,该卡自带信号调理,能防止混频现象产生;8 个信号通道可以同时采集信号,采集速度可高达 102.4 kbyte/s<sup>[5]</sup>。

### 2.5 杂光消除和信号处理

探测器探测的信号当中,除了有经样品反射(或散射)后的调制光,还有环境中难以消除的杂光。为了消除杂光对测量的影响,提高测量精度,必须对采集到的信号进行锁相放大处理。以前这部分工作都是由锁相放大器这样的硬件来实现的,本文通过 NI 公司的图形化编程软件 Labview 编程,由程序实现了锁相放大的功能。

### 3 锁相放大 (Lock-in amplifier) 的虚拟实现

#### 3.1 锁相放大器原理

为了测量被噪声掩盖的信号,常常需要使用锁相放大器。锁相放大器需要两个输入来获得一个输出,除了信号通道之外,还需要一个参考信号通道。锁相放大器能够从被测量信号中检测出与这个参照信号频率相同的分量,将被测量的信号里所包含的各种信号分量中与参照信号频率相同的那个分量变成直流,然后通过低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)。其他频率的分量仍然是交流信号,被 LPF 滤除<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 Labview 虚拟实现锁相放大原理及各主要功能模块

锁相放大器是用来测量微弱交流信号的,通过对被测信号在参考信号的频率和相位处能进行傅里叶变换移除信号中的噪声。锁相放大器相当于一台工作在参考信号频率  $f_r$  的低通滤波器。

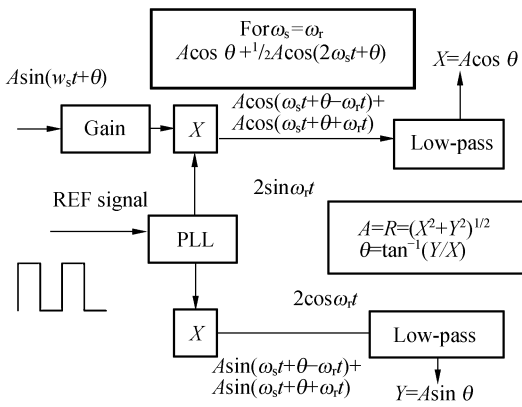


图 2 虚拟锁相放大器原理

Fig. 2 Principle of virtual lock-in technique

如图 2 所示,PLL(Phase Lock in Loop)提取参考信号的频率和相位,产生一个正弦信号  $\sin\omega_r t$  和余弦信号  $\cos\omega_r t$ ;这两个信号分别与被测信号做乘法运算,运算之后的信号中包括两部分:差频部分  $A\sin(\omega_s t + \theta - \omega_r t)$  (或  $A\cos(\omega_s t + \theta - \omega_r t)$ ) 和倍频部分  $A\sin(\omega_s t + \theta + \omega_r t)$  (或  $A\cos(\omega_s t + \theta + \omega_r t)$ )。对于信号通道中  $\omega_s = \omega_r$  的信号来说,差频部分就变成了直流。在乘法器后面加一个低通滤波器,  $\omega_s = \omega_r$  倍频部分及  $\omega_s \neq \omega_r$  的倍频

和差频都被滤掉了,只输出了  $\omega_s = \omega_r$  的差频部分  $X = A\cos(\theta)$  (或  $Y = A\sin(\theta)$ ),再对  $XY$  进行运算就可以得出调制信号的幅值和相位了。

Labview 是美国 NI 公司提供的图形化编程语言,具有编程效率高,使用简单的特点。本文使用它来编写了锁相放大程序,主要编写了 3 个功能模块,它们都是由 Labview 编成子 vi(subvi):

(1) LockinPLL. vi;

LockInPLL. vi 是锁相环(phase lock loop)算法的软件实现,主要用来测量参考信号的频率和相位,然后将这些信息传递给下面两个 subvi。

(2) LockinDemodulatorSettings. vi;

主要用来计算 LockinDemodulator. vi 中的乘法器及低通滤波器中的一些关键内部设置,比如滤波器的时间常数和稳定时间。

(3) LockinDemodulator. vi

LockinDemodulator. vi 是整个程序中的最关键部分,利用前面 LockinPLL 测量的信息产生参考信号,并虚拟实现了一个乘法器和一个低通滤波器。通过乘法运算和滤波器,能将被测信号中频率和相位等于参考信号的部分提取出来。

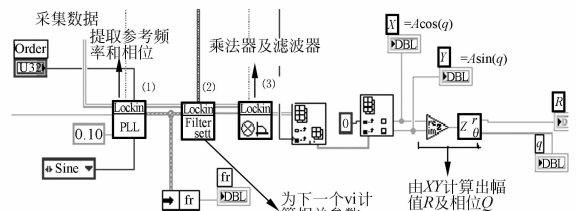


图 3 锁相放大部分程序框图

Fig. 3 Main program of virtual lock-in technique

图 3 为锁相放大部分程序框图,先由 Lockin PLL. vi 对采集的数据运算提取出参考信号的频率和相位,接着由 2 号模块 LockindemoDulatorSetting. vi 根据上一个 vi 提供的频率和相位信息为下一个 vi 计算相关设置信息;最后由 3 号模块完成信号产生、乘法运算及滤波运算,输出锁相放大结果  $XY$ ,再计算出幅值  $R$ <sup>[7]</sup>。

### 4 光强分布测量及测量重复性分析

图 4 为光源在 200~2 500 nm 的光强分布。在紫外可见波段(200~600 nm),除了 200 nm 附近信号比较弱(1 mV)以外,其他波长位置信号一

般都在 10 mV 以上,而在这个波段探测器(pmt)的噪声在 3  $\mu$ V 左右,信噪比 3000 左右,能够满足测量精度要求。本文对该波段氙灯光谱测量 3 次并进行了比较,测量重复性很好,测量标准误差为 0.12%。在 600~860 nm 波段,信号在 25 nm-460 mV 之间,探测器(pmt)噪声为 3  $\mu$ V,信噪比很高,但是钨灯光源稳定性不如氙灯,所以测量重复性并没有提高。而在 860~2 500 nm 波段,经过锁相处理以后,探测器的噪声能限制在 15  $\mu$ V 以下,从图 4 中可以看出该波段信号大部分(860~2 200 nm)在 200~700 mV 之间;2 200 nm 后面的信号相对微弱,在 50~100 mV 之间,信噪比也比较高。但是钨灯的不稳定性影响了测量的重复性,因此在整个 860~2 500 nm 波段,测量的重复性没有 200~860 nm 波段好。

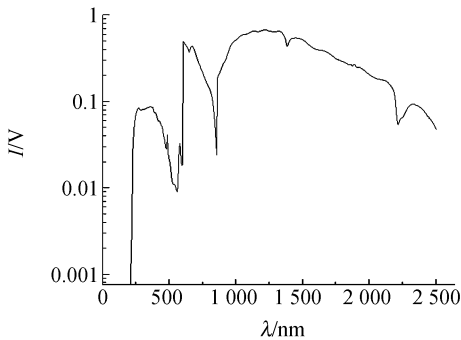


图 4 系统光源光强分布

Fig. 4 Distribution of lamp intensity

由于硫化铅探测器噪声很大,如果不进行锁相处理,信号基本埋在噪声里。图 5 所示为不

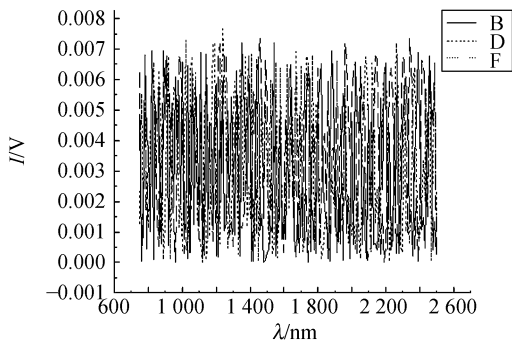


图 5 3 次非锁相得到的测量结果

Fig. 5 Three measuring not with virtual lock-in technique

采用锁相放大的 3 次测量曲线,基本上无法提取有用信号。图 6 则是锁相测量得到的结果,3 次测量曲线基本重合在一起。如果这 3 次测量取连续 5 个测量点计算标准误差 ( $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{X} - X_i)^2}$ ) 来表示测量重复性,则标准误差平均为 0.54%,如表 1 所示。

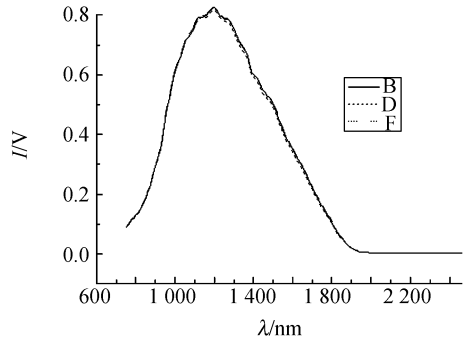


图 6 800~2 500 nm 锁相处理 3 条曲线

Fig. 6 Three measuring nots with virtual Lock-in technique

表 1 红外光谱测量标准误差

Tab. 1 Precision of infrared spectrum measuring

次数 波长	第一次 测量	第二次 测量	第三次 测量	标准误差 (%)
1 200 nm	0.824 166	0.826 129	0.816 614	0.50
1 210 nm	0.818 232	0.820 670	0.810 247	0.55
1 220 nm	0.809 452	0.810 762	0.800 936	0.53
1 230 nm	0.799 709	0.802 260	0.791 337	0.57
1 240 nm	0.792 438	0.794 959	0.783 999	0.57
			平均标 准误差	0.54

## 5 石英玻璃透过率测量

利用本套基于虚拟锁相的原位光学测量系统,本文对石英玻璃的透过率进行了测量,并与 PERKINELMER 公司 Lambda950 分光光度计进行了比较,见图 7、8。

PERKINELMER 公司 Lambda950 是成熟的商用化产品,测量精度非常高。图 8 中曲线图是图 7 中曲线 1 和 2 数据相除得到的,用来说明本套测量系统与 Lambda950 测量结果的符合程度。可以看出,本套原位测量系统测量结果与

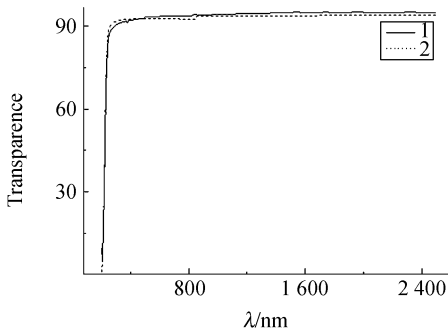


图7 石英玻璃 200~2 500 nm 透过率(1 为本系统测量结果,2 为 Lambda950 测量结果)

Fig. 7 Transparency of a quartz glass at 200~2 500 nm(1:result by proposed system,2:result by lambda950's)

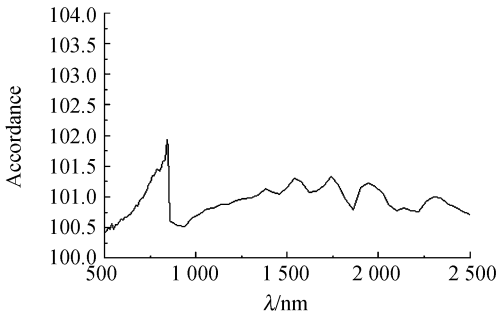


图8 图7中1和2曲线符合度曲线

Fig. 8 Accordance of 1 and 2 in fig. 7

Lambda950 测量结果符合得很好,平均误差 0.95% (Mean),这表明本测量系统测量结果准确可信。

## 6 结 论

本套系统主要用于在空间辐射模拟系统中对空间材料的光学性能进行原位测量。实验结果表明,本套原位光学测量系统测量重复性高,测量结果准确可信,能胜任对空间材料光学性能的原位光学测量。

本文用 Labview 编程语言编写程序虚拟实现了锁相放大功能。在光学信号测量过程中,如何降低杂光及电气设备带来的噪声影响,提高信噪比,是个十分重要的问题。一旦测量精度满足不了要求时,人们一般采用锁相放大器之类的硬件来对测量信号进行处理。但是这类硬件的成本高,且一般只能对一个数据通道进行锁相,当需要多通道采集时需要多个锁相放大器。本文阐述了一种用软件来实现锁相放大处理的方法,该方法可以根据具体实验测量要求修改软件,灵活性好,便于计算机控制,成本低,且能简化测量系统结构。

## 参考文献:

- [1] 王小兰, 香兴民. 航天材料光学性能原位测量系统控制软件的开发[J]. 测控技术, 2004, 23(8): 50-52.  
WANG X L, XIANG X M. Software development of the original position mearure system for optical property of spacecraft material[J]. *Measurement & Control Techniques*, 2004, 23(8): 50-52. (in Chinese)
- [2] 李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.  
LI Q CH, JIANG Y J. *Theory for Spectrum Instrument*[M]. Beijing: Beijing Technology University Press, 1999. (in Chinese)
- [3] GRIEGER F, WEIGELT G. Objective prism spectroscopy and wideband projection speckle spectroscopy[J]. *Optics in Complex Systems*, 1990(7): 440-441.
- [4] 齐立红, 李忠芳. 水靶激光等离子体光源 11~20 nm 波段光谱实验[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 272-275.  
QI L H, LI ZH F. Experimental study of the spectrum at 11~20 nm of a laser-produced plasma source using water target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 272-275. (in Chinese)
- [5] 尼启良. 纳秒激光等离子体光源的光谱测量技术[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 211-218.  
NI Q L. Technology for measuring spectrum from nanosecond laser plasma soft X-ray source[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 211-218. (in Chinese)
- [6] 吴爱华, 胡志忠. 基于 Labview 的微弱光电信号锁相检测技术[J]. 医疗设备信息, 2005, 20(13): 5-6.  
WU A H, HU ZH ZH. Investigation of a phase-locked amplifier for slight photo-electric signal detection based on Labview[J]. *Information of Medical Equipment*, 2005, 20(13): 5-6. (in Chinese)
- [7] ROBERT H B. *Learning with LABVIEW 7 Express*[M]. Prentice Hall, 2003.

作者简介:何玲平(1982—),男,江西新余人,博士研究生,主要从事短波段光学技术的研究。E-mail: hlp200201@yahoo.com.cn.

导师简介:陈波(1961—),男,吉林长春人,研究员,主要从事短波段光学技术的研究。E-mail: bochen2000@yahoo.com.cn.