

两种红外干涉图采集及光谱复原方法的对比研究

李 妍^{1,2} 李 胜^{1*} 高 闽 光¹ 徐 亮¹ 冯明春¹ 叶树彬^{1,2} 刘建国¹ 李相贤¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 目前,傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪主要的采样方法有 He-Ne 激光触发方法和 Brault 方法。Brault 方法使用硬件计数器而且采集到的数据有延时,会增加数据处理的时间,因此讨论了一种基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法,该方法采用同步数据采集卡,同时采样两路数据,用近似的相似三角形法得到精确的 He-Ne 激光过零点信息,然后根据三次样条插值方法重采样干涉信号,实现了软件数据采样与处理。将该方法与 He-Ne 激光触发方法得到的光谱图进行对比。结果表明,两种方法得到的背景光谱图中 H₂O 和 CO₂ 的吸收峰与标准吸收谱带一致,基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法提高了光谱的信噪比,其激光过零点信息可得到动镜扫描速度的稳定性,而 He-Ne 激光触发方法的采样与处理时间小于改进的 Brault 方法。

关键词 光谱学; 傅里叶变换红外光谱仪; 采样与处理方法; 三次样条插值法; 信噪比

中图分类号 O438.2; TP274

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0930005

Comparative Study on Two Infrared Interferogram Acquisition and Spectrum Recovery Methods

Li Yan^{1,2} Li Sheng¹ Gao Minguang¹ Xu Liang¹ Feng Mingchun¹

Ye Shubin^{1,2} Liu Jianguo¹ Li Xiangxian¹

¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The primary data sampling methods of Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer include He-Ne laser triggering method and Brault method. The Brault method uses the hardware counter and the collected data has time delay, which may lead to the increase of subsequent data processing time. Therefore an improved data sampling and processes method based on the Brault method is proposed. The method adopts the synchronous data acquisition card, and samples two-path data simultaneously, to get the precise zero crossing information of He-Ne laser with approximate similar triangle method. Interference signal is resampled according to the cubic spline interpolation method, and the software data sampling and processing is realized. In addition, the spectra obtained by the He-Ne laser triggering method and the proposed method are compared. The comparison results show that the background of H₂O and CO₂ absorption peaks in spectra obtained by the two methods are consistent with the standard absorption spectra, the improved data sampling and processing method based on the Brault method improves the signal-to-noise ratio of the spectrum, and the laser zero crossing information can get the stability

收稿日期: 2015-01-18; 收到修改稿日期: 2015-05-06

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ22064302)、国家自然科学基金(41105022, 41305020)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB050405000)

作者简介: 李 妍(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事大气环境监测傅里叶变换红外光谱仪器相关技术方面的研究。

E-mail: yli@aiofm.ac.cn

导师简介: 高闽光(1962—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境光学与环境遥感监测技术等方面的研究。

E-mail: mggao@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: shengli@aiofm.ac.cn

of the moving mirror scanning speed. However, sampling and processing time for the He-Ne laser triggering method is less than that for the improved Brault method.

Key words spectroscopy; Fourier transform infrared spectrometer; sampling and data processing method; cubic spline interpolation; signal-to-noise ratio

OCIS codes 300.6300; 260.3160; 070.4790; 300.6340

1 引 言

傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪的核心部件为迈克尔孙干涉仪,主要是基于对经过干涉仪后的红外干涉信号进行傅里叶变换得到光谱图的原理,广泛地应用于环保^[1-2]、刑侦、石油、煤炭、医药^[3]等领域。干涉信号转换为光谱图时,必须要对其进行数字化,这就要求等光程差间隔采样干涉信号^[4]。

FTIR中实现等光程差间隔采样红外干涉信号的方法很多,大致可以分为两类:1)利用He-Ne激光信号作为脉冲触发采样红外干涉信号,实现等光程差间隔采样^[5];2)将He-Ne激光信号作为参考,等时间间隔采样参考与目标干涉图,然后进行重采样,最终得到等光程差间隔采样信号。第一类方法过多地依赖于硬件,价格昂贵,对光谱仪的精密度要求较高,且不能通过后期相位修正改进干涉仪动镜运动不均匀所引起的采样误差。第二类方法的采样由Brault^[6]首次提出,采用了两个不同步的独立计数器记录激光信号和红外信号,采样过程比较简单,但数据量较大。采用Brault方法不仅可以减少后期可通过相位修正的动镜运动均匀时的采样误差,还可以降低动镜运动不均匀时的采样误差,提高信噪比(SNR),因此随着目前处理器运算速度的提高,对于第二类方法的研究更为广泛和深入。Brasunas等^[7]在此基础上提出了均匀时间采样法;后续都是在Brault方法上进行的研究^[8-12]。在Brault方法中,激光信号过零点信息直接影响了红外干涉信号的重建,现有的过零点检测方法^[13-15]是寻找符号翻转区,在这个区间大致确定过零点位置信息,因此,得到的过零点信息不是非常准确,结果会导致谱线发生畸变。任利兵等^[16]在此基础上提出了软过零方法来计算过零点信息,以此得到相对准确的光谱图。

原Brault方法由于采用独立计数器,不同步采样增加了后续处理的复杂度,所需时间为90 s。而且硬件部分对周围环境的要求较高,使得仪器结构较为复杂,所需成本较高,因此需要研究一种对周围环境不敏感,在确保仪器信噪比的同时能够降低仪器复杂度的采样方法。本文根据原Brault方法及其为基础的软过零方法,进一步讨论了一种改进的数据采样与处理方法。利用多路同步数据采集卡,同时采样He-Ne激光干涉信号和红外干涉信号,然后利用相似三角形方法,计算出准确的激光过零点位置信息,根据三次样条插值方法对红外信号进行重采样,结果可以在较短时间内得到红外干涉信号,最后进行傅里叶变换得到光谱图。并将该方法与前期工作开发的He-Ne激光触发方法^[17]得到的光谱图进行了对比研究。

2 理论基础

2.1 He-Ne激光触发采样方法

由于探测器探测到的信号是等时间间隔信号,而不是等光程差间隔,而光程差与波数互为倒数,所以不等的光程差间隔采样会导致光谱的谱线发生畸变。因此,为了得到高质量的光谱,必须等光程差间隔采样干涉信号。图1所示为激光触发方法的原理示意图。首先将探测器探测到的正弦波形式的He-Ne激光干涉信号整形为过零点脉冲,然后利用这个脉冲信号触发等时间间隔采样的红外干涉信号。由于过零脉冲信号的间隔对应于红外干涉信号的等光程差间隔,因此实现了红外干涉信号的等光程差间隔采样。

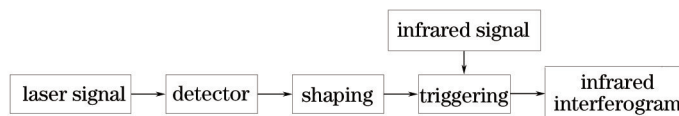


图1 He-Ne激光触发方法信号采样与处理工作原理

Fig.1 Working principle of He-Ne laser triggering method

2.2 基于Brault方法改进的数据采样与处理方法

图2所示为基于Brault方法改进的信号采样与处理过程示意图。采用He-Ne激光作为参考信号。具体步骤如下:

1) 等时间间隔同步采样两路信号

用 60 kS/s 采样频率同步采集 He-Ne 激光信号与红外信号, Δt 为采样时间间隔, $t_i = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$ 为各采样点对应的采样时刻,

$$I_i = I_{\text{He-Ne}}(t_i), \tag{1}$$

式中 I_i 为红外信号第 i 个采样点的光强, $I_{\text{He-Ne}}$ 为 He-Ne 激光信号 t_i 采样时刻的光强。

2) 寻找激光过零点

根据 Nyquist 采样定理, 不失真采样的频率 f_{sam} 至少是干涉信号最大频率 f_{max} 的 2 倍, 即

$$f_{\text{sam}} \geq 2f_{\text{max}}. \tag{2}$$

在比较注重波形的工程应用中, 采样频率一般是干涉信号最大频率的 5~10 倍。这样会出现过采样现象^[18-19]。首先根据这些过采样的数据点确定符号翻转区, 找出激光干涉信号过零点前后的两个数据, 然后利用近似的相似三角法准确计算出激光信号过零点位置信息并予以记录。

3) 插值重采样红外信号

根据得到的激光信号过零点信息, 利用三次样条插值方法重采样红外信号, 得到等光程差间隔的红外干涉信号。

4) 处理重采样的红外干涉信号

对重采样得到的干涉信号进行相位校正、傅里叶变换等操作, 得到光谱图并对其进行相关分析。

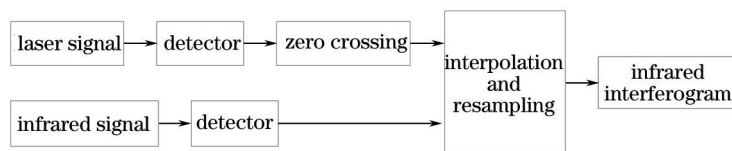


图 2 基于 Brault 方法改进的干涉信号采样与处理过程

Fig.2 Improved interference signal sampling and processing based on Brault method

2.3 三次样条插值法

如果分段函数 $S(x) \in C^2[a, b]$, 即 $S(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上的二阶导数连续, 并且在每个 $[x_k, x_{k+1}]$ ($k = 0, 1, \dots, n-1$) 子区间上是三次多项式, 则称函数 $S(x)$ 是关于互异点 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ 的三次样条函数, 若进一步有 $S(x_k) = f(x_k)$ ($k = 0, 1, \dots, n$), 则称 $S(x)$ 是 $f(x)$ 关于 $\{x_i\}_{i=0}^n$ 的三次样条插值函数^[20-22]。具体的插值方法如(3)式所示:

$$S(x) = M_k \frac{(x_{k+1} - x)^3}{6h_k} + M_{k+1} \frac{(x - x_k)^3}{6h_k} + \left[f(x_k) - \frac{M_k h_k^2}{6} \right] \frac{x_{k+1} - x}{h_k} + \left[f(x_{k+1}) - \frac{M_{k+1} h_k^2}{6} \right] \frac{x - x_k}{h_k}, \tag{3}$$

$$x \in [x_k, x_{k+1}], k = 0, 1, \dots, n-1,$$

式中 $h_k = x_{k+1} - x_k$ 。图 3 为 LabView 中三次样条插值法示意图, 其中 $P_k(x)$ 为前后相邻两点 (x_k, y_k) 和 (x_{k+1}, y_{k+1}) 之间的三次多项式。图中白色的点表示原始数据, 红色的点表示插值数据。

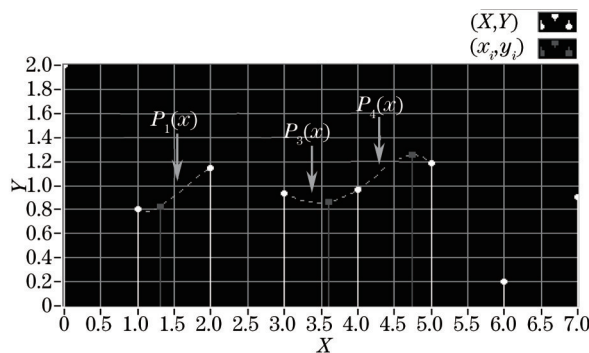


图 3 LabView 中三次样条插值方法

Fig.3 Cubic spline interpolation method in LabView

相对于分段插值, 三次样条插值方法插值的数据及导数在区间内都是连续的, 插值后的曲线平滑性可

得到保证,更接近复原光谱的形状。因此,基于 Brault 方法改进的采样方法中采用了三次样条插值方法。

3 实验装置

FTIR 光谱仪数据采样与处理系统主要由红外与 He-Ne 激光光源、迈克尔孙干涉仪、红外与 He-Ne 激光探测器、AD 采集卡(ADC)以及计算机构成,图 4 所示为利用 He-Ne 激光触发方法来采样与处理数据的系统框图。由控制系统驱动干涉仪动镜转动,并得到所需的激光过零点脉冲和起始点脉冲。经由干涉仪的红外干涉信号被探测放大后,通过一个带通滤波板来消除干扰信号。此时得到的红外干涉信号为等时间间隔。根据系统中的触发方式,采用 USB2.0 总线 16 bit 中速采集卡,方便即插即用、实时采集,且支持内、外部触发和外部时钟。可以用并行方式采集和处理数据,实现实时不间断连续采集。将 He-Ne 激光过零点脉冲作为采集卡的外部时钟,即采样频率为 He-Ne 激光过零点脉冲的频率。利用此外部触发采样红外干涉图,将得到等光程差间隔的红外干涉信号。

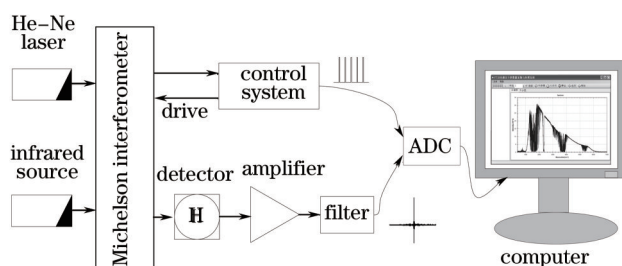


图 4 基于 He-Ne 激光触发方法的数据采样与处理框图

Fig.4 Block diagram of data sampling and processing based on He-Ne laser triggering method

基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法系统结构如图 5 所示。其中采集卡使用四路同步模拟输入采集卡,分辨率为 24 bit,每个通道的最高采样率为 204.8 kS/s,电压输入范围为 ± 316 mV $\sim\pm 42.4$ V,动态范围为 118 dB。由图 5 中可以看出经过干涉仪的信号与 He-Ne 激光干涉信号分别进入探测器,并经过相应的放大滤波后到达同步采集卡,在上位机编写相应程序,通过驱动程序进行通信,最终实现了信号采样与处理过程。由于利用采集卡内部高精度时钟来驱动进行数据的采样,同时驱动两个通道的采样,保证了二者在时间上同步,不存在时间差。因而简化了后续处理过程。

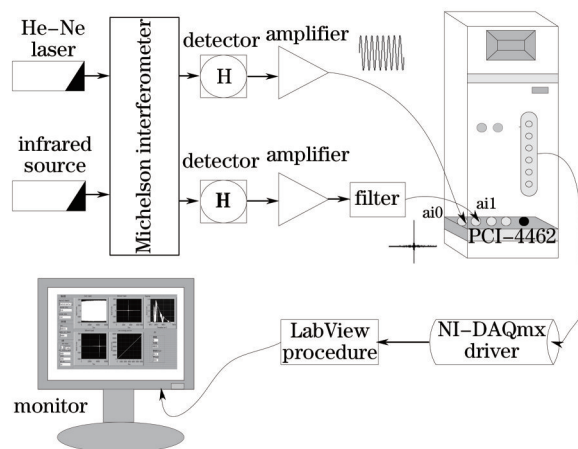


图 5 基于 Brault 方法改进的干涉信号采样与处理系统结构

Fig.5 Improved system structure for interference signal sampling and processing based on the Brault method

4 实验结果与分析

采用自主研发的抽取式 FTIR 光谱仪,光程长度为 10 m,分辨率为 1 cm^{-1} ,使用的探测器为热电制冷探测器,波数响应范围为 $1.5\sim 10\ \mu\text{m}$,He-Ne 激光波长 $\lambda = 632.8\ \text{nm}$,采用 He-Ne 激光触发方法和基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法对干涉信号进行采样与处理。基于 He-Ne 激光触发方法系统中,采样频率为激光过零点脉冲频率,使用此脉冲触发得到等光程差间隔的红外干涉信号,然后利用实验室自主研发的软件对其进行

处理,得到光谱图。而基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法中使用采集卡的双通道进行同步连续采样,采样频率设为 60 kS/s,每个通道的采样数设为 60000,图 6 所示为基于 Brault 方法改进的数据采样与处理的显示界面。图中 Laser signal 和 Infrared signal 分别为等时间间隔采样得到的激光与红外干涉信号。zero crossing position 为近似的相似三角形方法计算得到的激光干涉信号过零点位置信息,随时间线性增加。该实验条件下,测量计算得到过零点数 64250,根据过零点位置信息的间隔可以得到动镜的速度稳定性。由实验得到过零点间隔最小值为 8.689,最大值为 18.871,平均值为 9.46,这些数据表明,激光干涉信号的均匀性较好,同时反映出干涉仪的动镜速度较为稳定。为了得到较为平滑的谱形,使用三次样条插值方法,根据激光过零点位置信息对红外干涉信号进行重采样,得到等光程差间隔采样的红外干涉图;Infrared Signal 为进行相关处理后的等光程差间隔红外干涉图;Spectrum 为红外干涉图经过傅里叶变换得到的光谱图。

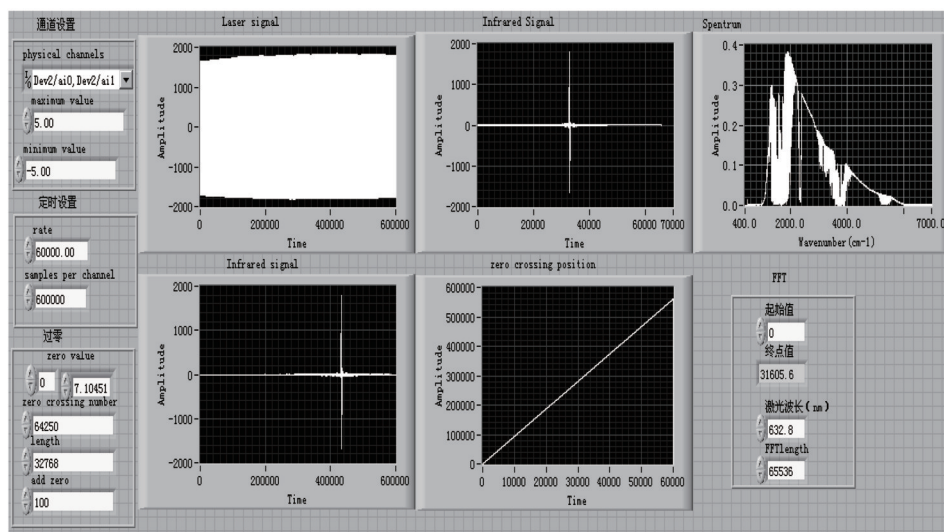


图 6 基于 Brault 方法改进的数据采样与处理界面

Fig.6 Data sampling and processing interface of the improved Brault method

图 7 和图 8 所示分别为 He-Ne 激光触发方法和基于 Brault 方法得到的红外干涉信号变换后的光谱图。比较两种采样与处理方法得到的光谱图可以看出其谱形基本一致,图中 H₂O 的吸收峰中心波数约为 1595 cm⁻¹,CO₂ 的吸收峰为 2349 cm⁻¹,H₂O 和 CO₂ 在 3500 cm⁻¹ 左右有一个吸收峰;近红外波段中 H₂O 的吸收峰为 5332 cm⁻¹,与其标准吸收谱带^[23]一致。图 9 所示为 He-Ne 激光触发方法和基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法所得到的 100% τ 线,根据 100% τ 线可计算出信噪比。表 1 所示为两种采样方法的对比,从表中可知基于 Brault 方法改进的采样方法数据处理时间为 7 s,而 He-Ne 激光触发方法的处理时间为毫秒级,但是其信噪比是后者的 1.4 倍,一是因为采用了 24 bit $\Sigma - \Delta$ ADC,二是因为激光过零点的寻找较为精确,这正是基于 Brault 改进的采样方法的优势,因为 $\Sigma - \Delta$ ADC 不支持 He-Ne 激光触发采样。说明基于 Brault 方法改进的采样方法可以改善光谱的质量,但是其运算速度还有待提高。

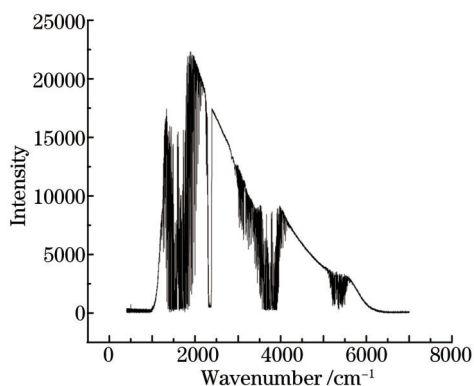


图 7 He-Ne 激光触发方法得到的光谱图

Fig.7 Spectra by He-Ne laser triggering approach

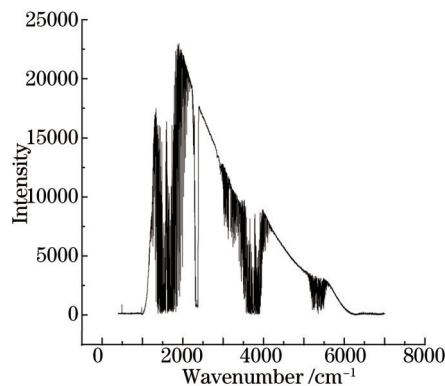


图 8 改进的 Brault 采样方法得到的光谱图

Fig.8 Spectra by improved Brault sampling method

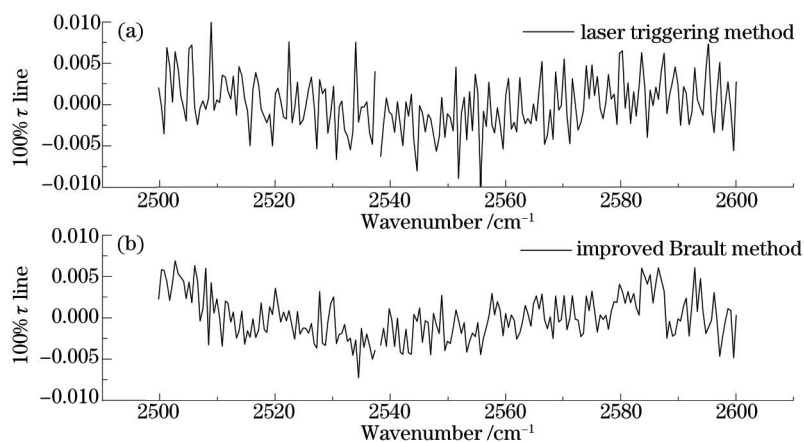


图9 两种采样方法得到的100% τ 线

Fig.9 100% τ lines by the two sampling methods

表1 两种采样方法的比较

Table 1 Comparison of two sampling methods

Methods	Improved Brault method	He-Ne triggering method	Ratio
Processing time	7 s	17 ms	412
SNR	7067.1	4997.5	1.4

5 结 论

研究了基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法。该方法采用多路同步模拟输入采集卡,同时得到等时间间隔过采样 He-Ne 激光与红外干涉信号,利用相似三角形方法得到激光干涉信号过零点位置信息,判断干涉仪动镜速度的稳定性,并根据位置信息利用三次样条插值法重采样红外干涉信号,得到等光程差间隔的红外干涉信号并对其进行傅里叶变换,最终得到背景光谱图。与此同时,与 He-Ne 激光触发方法进行了对比研究,结果表明,两种方法得到的光谱图谱形相似,谱线吸收峰位置与标准吸收谱带一致。此外,基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法的精确度更高,信噪比是 He-Ne 激光触发方法的 1.4 倍,可以简化光路并降低对硬件的要求,但是其运算速度远不及后者。因此,要将基于 Brault 方法改进的数据采样与处理方法应用于快速实时测量领域,还应该改进过零检测方法,使得处理时间满足要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Wei, Liu Wenqing, Zhang Tianshu. Continuous field measurements of stable isotopes in atmospheric water vapor by FTIR spectrometry[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0130003.
王 薇, 刘文清, 张天舒. 利用傅里叶变换红外光谱技术连续测量环境大气中水汽的稳定同位素[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0130003.
- 2 Cheng Siyang, Gao Minguang, Xu Liang, *et al.*. Study on remote sensing of water vapor column concentration in the atmosphere by direct-sun infrared absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1001001.
程巳阳, 高闽光, 徐 亮, 等. 大气中水汽柱浓度的直射太阳光红外吸收光谱遥测研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1001001.
- 3 Dong Haisheng, Zhang Lifan, Zhong Yue, *et al.*. Determination of serum triglyceride content by Fourier near infrared spectroscopy and partial least squares[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s130001.
董海胜, 张丽芬, 钟 悦, 等. 傅里叶变换近红外光谱结合偏最小二乘法测定血清甘油三脂含量[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s130001.
- 4 P R Griffiths. Fourier transform infrared spectrometry[J]. Science, 1983, 222: 297-302.
- 5 Wang Jun, Lu Yihuai, Wei Xiuli. FTIR spectrometer data acquisition system based on PCI bus card[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(7-1): 123-125.
王 君, 陆亦怀, 魏秀丽. 基于 PCI 的 FTIR 光谱仪数据采集系统[J]. 微计算机信息, 2008, 24(7-1): 123-125.
- 6 J W Brault. New approach to high-precision Fourier transform spectrometer design[J]. Applied Optics, 1996, 35(16): 2891-2896.
- 7 J C Brasunas, G M Cushman. Uniform time-sampling Fourier transform spectroscopy [J]. Applied Optics, 1997, 36(10): 2206-2210.
- 8 A Simon, W Metz, A Keens. Data acquisition and interferogram data treatment in FT-IR spectrometers[J]. Vibrational Spectroscopy, 2002,

- 29(1-2): 97-101.
- 9 L Palchetti, G Bianchini, F Castagnoli, *et al.*. Breadboard of a Fourier-transform spectrometer for the radiation explorer in the far infrared atmospheric mission[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(14): 2870-2878.
- 10 Li Baosheng, Liu Yong, Yu Qinghua, *et al.*. Sampling system of optical fiber Fourier transform spectrometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(1): 16-21.
李保生, 刘 勇, 于清华, 等. 光纤傅里叶变换光谱仪采样系统[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(1): 16-21.
- 11 Li Baosheng, Liu Yong, Wang An. Uniform sampling method of optical fiber Fourier transform spectrometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 2007, 26(3): 201-204.
李保生, 刘 勇, 王 安. 光纤傅里叶光谱仪干涉图均匀抽样方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(3): 201-204.
- 12 J Campbell. Synthetic quadrature phase detector/demodulator for Fourier transform spectrometers[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(36): 6889-6894.
- 13 A Molinaro, Y D Sergeev. An efficient algorithm for the zero crossing detection in digitized measurement signal[J]. *Measurement*, 2001, 30(3): 187-196.
- 14 Lian Kai, Feng Zhenming, Lu Mingquan. Modified zero crossing detection[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2006, 29(1): 39-40.
练 锴, 冯振明, 陆明泉. 过零点检测法改进[J]. *电子测量技术*, 2006, 29(1): 39-40.
- 15 M B Djuric, Z R Djuric. Frequency measurement of distorted signals using Fourier and zero crossing techniques[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(8): 1407-1415.
- 16 Ren Libing, Wei Haoyun, Li Yan. Study on the application of soft zero-crossing detection in the infrared spectral measurement system[C]. *Proceedings of Conference of the Chinese Optical Society*, 2010.
任利兵, 尉昊赞, 李 岩. "软"过零检测在红外光谱测量系统中的应用研究[C]. *中国光学学会2010年光学大会论文集*, 2010.
- 17 Li Yan, Gao Minguang, Xu Liang, *et al.*. Infrared spectroscopy application based on trigger sampling method and phase correction[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(7): 2054-2059.
李 妍, 高闽光, 徐 亮, 等. 基于触发采样方法和相位校正的红外光谱测量的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(7): 2054-2059.
- 18 Ren Libing, Wei Haoyun, Li Yan. Digital filter method of oversampling Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1438-1441.
任利兵, 尉昊赞, 李 岩. 过采样型傅里叶红外光谱仪的数字滤波方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1438-1441.
- 19 Zhou Xiaozheng, Xu Xizong. Study on the applications of over-sampling method[J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology*, 2011, 19(2): 28-30.
周晓正, 徐熙宗. 过采样方法的应用研究[J]. *北京石油化工学院学报*, 2011, 19(2): 28-30.
- 20 Zhai Ruicai, Xie Weisong. *Numerical Analysis*[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001: 139-148.
翟瑞彩, 谢伟松. *数值分析*[M]天津: 天津大学出版社, 2001: 139-148.
- 21 Pan Yubao, Zhang Zhixin, Ma Xiaojiang. Software implementation of the resampling technology based on LabVIEW[J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2006, 13(3): 115-116.
潘玉宝, 张志新, 马孝江. 基于LabVIEW平台的重采样技术的软件实现[J]. *仪器仪表用户*, 2006, 13(3): 115-116.
- 22 S A Roy, J Genest, P Giaccari. Hybrid sampling approach for imaging Fourier-transform spectrometry[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(35): 8482-8487.
- 23 G Herzberg. *Infrared and Raman spectra of polyatomic molecules*[M].// Wang Dingchang *Trans. Molecular Spectra and Molecular Structure*. Beijing: Science Press, 1986: 263.
赫兹堡. *多原子分子的红外光谱与拉曼光谱*[M]. 王鼎昌 译. *分子光谱与分子结构*. 北京: 科学出版社, 1986: 263.

栏目编辑: 吴秀娟