

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0143-04

基于光纤法布里-珀罗滤波器的便携式 近红外光谱仪

丁 晖 吴相楠 梁建奇

(西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要 介绍一种以光纤法布里-珀罗(FFP)滤波器为核心的便携式近红外光谱仪的设计方法。为克服 FFP 控制电压和扫描波长之间的迟滞和非线性效应,实现光谱仪扫描波长的准确定位,采用一组光纤光栅(FBG)的中心波长为参考,利用粒子群优化(PSO)算法对每个 FBG 中心波长进行准确定位。在此基础上,采用多项式拟合技术,实现了在每一个 FFP 扫描周期内,在线建立 FFP 扫描波长与其控制电压间的关系模型,从而构建了一种准确度高、小型便携的近红外光谱仪。实验证明该光谱仪扫描波长范围为 1490~1590 nm,波长测量误差低于 0.15 nm,波长分辨率小于 0.4 nm。

关键词 光谱学;光纤法布里-珀罗滤波器;近红外光谱仪;粒子群优化算法;光纤光栅

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0143

A Compact Near Infrared Spectrometer Based on Fiber Fabry-Perot Filter

Ding Hui Wu Xiangnan Liang Jianqi

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract A kind of compact near infrared spectrometer based on fiber Fabry-Perot (FFP) Filters is proposed in this paper. In order to reduce the nonlinearity and hysteresis effects of FFP and realize wavelength measurement accurately, a group of fiber Bragg gratings (FBGs) with fixed center wavelength are employed as a wavelength reference. Particle swarm optimization (PSO) algorithm is employed in finding the peak positions of FBGs accurately. On the base of that, polynomial fit is employed to model wavelength-voltage relationship of FFP online in each scanning cycle. Hence a kind of a compact near infrared spectrometer has been designed. Experiments have demonstrated the accuracy of wavelength measurement of the system. The range of the wavelength of the proposed spectrometer is 1490~1590 nm, the maximum absolute wavelength measurement error is as low as 0.03 nm and the spectra resolution is up to 0.4 nm.

Key words spectroscopy; fiber Fabry-Perot filter; near infrared spectrometer; particle swarm optimization; fiber Bragg gratings

1 引 言

近红外光谱技术由于具有速度快、检测过程无污染、无损伤以及可实现物质多成分检测等优点,在石油化工、农业生产、食品工业、环境监测、生物医疗等领域有着广泛的应用^[1,2]。

根据所采用的不同分光系统,目前的近红外光谱仪主要分为固定波长滤光片型、傅里叶变换型、光

栅色散型和声光可调滤波器型。这些传统的红外光谱仪普遍存在成本高、体积大、操作复杂等缺点,主要限于实验室分析使用。近几年,伴随着光学技术和计算机技术的不断发展,红外光谱仪正不断地向低成本、小型化、低能耗方向发展。其应用领域也正从实验室分析走向工业现场的在线测试^[3~5]。

本文介绍一种以 FFP 为核心的近红外光谱仪。

基金项目: 国家自然科学基金(60772016)资助项目。

作者简介: 丁 晖(1969-),女,博士,副教授. 主要从事光纤传感技术、智能传感器系统方面的研究。

E-mail: teacherdh@hotmail.com

其基本原理是:FFP在一定波形的控制电压的作用下,使不同波长的光能以最大透射率透过干涉仪,从而实现光谱的扫描。但由于FFP控制电压和扫描波长之间的迟滞和非线性关系,很难准确建立二者的对应关系。针对这一问题,本文采用光栅阵列结合粒子群优化算法(PSO),对每一扫描过程,实时建立控制电压和扫描波长的准确对应关系,从而实现光谱仪波长的准确定标。

该光谱仪具有结构简单、成本低、小型便携、光谱分辨率高等优点。它克服了传统光谱仪体积庞大的缺点,可用于在线测试分析场合,对一些特殊应用场合,如多组分混合气体的成分在线定量检测也具有重要应用意义。

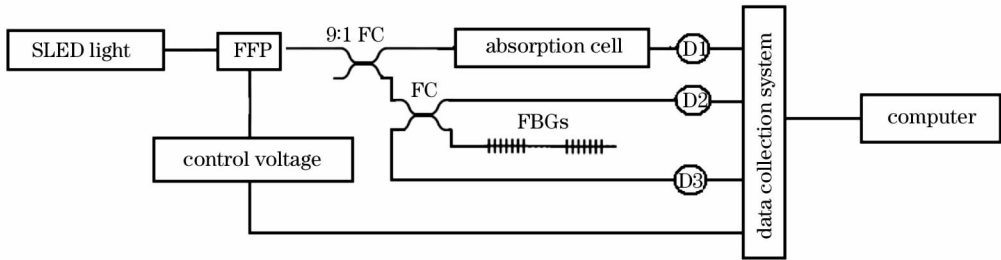


图1 系统光路图

Fig.1 Optical configuration of system

探测器D1~D3的输出信号经数据采集系统送入计算机分析处理。

FBG的反射光为窄带光(典型3 dB带宽为0.1~0.2 nm),适用于系统扫描波长的定位。首先确定出4个FBG中心波长对应的控制电压,然后利用多项式拟合,建立系统全程扫描波长与控制电压的对应关系。为了准确确定每个FBG中心波长相对应的控制电压,最直接的办法是尽可能缩小FFP的步进扫描波长。本系统中的FFP的自由光谱范围为100 nm,则欲达到0.01 nm的扫描步进波长,需要D/A输出的点数为10000,这样FFP每次的扫描时间将很长。为解决这一问题,同时消除信号采集时系统噪声的影响,本文采用粒子群优化算法,在不增加扫描步进波长的情况下,准确寻找出4个FBG中心波长对应的控制电压。

3 粒子群优化算法的基本原理

传统的识别FBG反射峰值的方法是采用滤波器抑制信号采集中的噪声^[6~8],以提高FBG反射峰值的检测准确度。但由于噪声所处频段的不确定性,造成识别效果不佳。粒子群优化(PSO)算法是

2 基于FFP的近红外光谱仪工作原理

系统结构原理图见图1所示。系统光源采用SLED宽带光源。计算机通过D/A口输出锯齿波或三角波电压控制信号,经功率放大后,加在FFP的电压控制端。随着控制电压的变化,不同波长的透射光由FFP输出,经过9:1光纤耦合器(FC)分光后,大部分光能量进入吸收池,经被分析物吸收后的光能由探测器D1检测。另一部分光经光纤耦合器,一部分直接送入探测器D2,可作为光谱本底信号,另一部分入射到FBG阵列。FBG阵列用于系统扫描波长的定位。当FFP的透射光与FBG阵列中的某个FBG的中心波长相吻合时,探测器D3将接收到由光栅反射回的光信号,否则将无信号输出。

一种基于个体群的随机优化技术。与其它的优化算法相比,PSO算法具有搜索能力强,收敛速度快,参数设置少,编程简单等特点,在许多工程设计中得到广泛的应用^[9~11]。

PSO算法在求解参数优化时,首先初始化一群随机粒子,每个粒子的维数为 k ,粒子个数为 M 。每个粒子的位置为 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}]$,速度为 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}]$, $(i = 1, 2, \dots, M)$ 。然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,所有粒子的位置与一个目标函数相比,得到两个“极值”,若粒子位置优于这个极值,则以粒子的当前位置来取代极值。这两个极值一个称做个体极值 $pbest$,是粒子自身所找到的当前最优解,另一个称做全局极值 $gbest$,是整个群体当前找到的最优解。找到这两个最优值之后,粒子群将按下式更新自己的速度和位置。

$$V_{id}(t+1) = \omega V_{id}(t) + c_1 r_1 (pbest_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (gbest_{id} - x_{id}(t)), \quad (1)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, M$, $d = 1, 2, \dots, k$; ω 为惯性因子; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 是介于[0 1]之间的随机数; t 为当前迭代次数。

当 FPI 的透射光谱带宽足够窄,远小于 FBG 的反射谱带宽(FWHM)时,目标函数 $S_v(\lambda)$ 可近似为 FBG 反射谱函数(为高斯函数)。在本文的系统中,所选用的 FFP 的透射光的带宽与 FBG 反射光的带宽相近,因此目标函数 $S_v(\lambda)$ 应是 FBG 反射光和 FPI 透射光谱函数的卷积(如(2)式所示),即

$$S_v(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(\gamma)g_2(\gamma - \lambda)d\gamma, \quad (2)$$

式中 $g_1(\lambda), g_2(\lambda)$ 分别是 FBG 反射光谱和 FPI 透射光谱函数,且

$$g_1(\lambda) = a \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\omega_1^2} \ln 2\right], \quad (3)$$

式中 a 为 FBG 的反射率, λ_B 为中心波长, ω_1 是 FBG 的半峰全宽(FWHM)。

$$g_2(\lambda) = \frac{(1 - R)^2}{1 + R^2 - 2R \cos \frac{4\pi l}{\lambda}} I_0(\lambda), \quad (4)$$

式中 R 为 FPI 反射面的反射率, l 为腔长。

4 实验结果及分析

4.1 FBG 中心波长的定位

按图 1 组建系统,光源中心波长为 1550 nm,带宽为 ± 20 nm,最大输出功率为 30 mW。FFP 的自由谱范围(FSR)为 1490~1590 nm。光电探测器采用 PIN 管。

由计算机控制 D/A 口发出 10~30 V 三角波控制电压,使 FFP 在其自由光谱范围内进行正、反两个行程的全程扫描,得到图 2 所示扫描结果。图 2 中尖峰处为 FBG 的反射光。

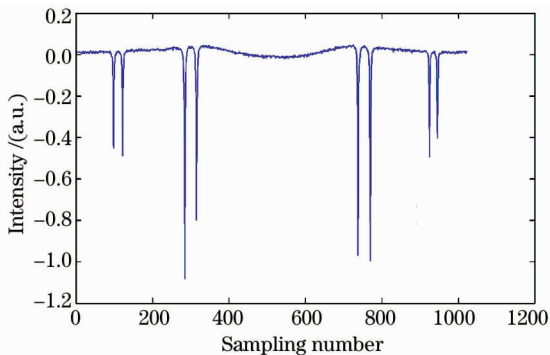


图 2 系统正、反两个行程全程扫描光谱图
Fig. 2 Global scanning spectrum of the system in both forward and back trip

利用 PSO 算法对每个 FBG 的反射峰逐一进行定位。这里选择种群规模 $M = 30$, 惯性因子 $\omega = 0.729$, 学习因子 $c_1 = c_2 = 1.49$, 维数 $k = 3$ 。目标函数为(2)式。经过约 300 次迭代后,分别得到 4 个

FBG 的中心波长对应的采样点序号,根据(5)~(6)式,可以推出相对应的控制电压大小。

$$V_i = \frac{N_i}{M}(V_{\max} - V_{\min}) \quad (i = 1, 2, \dots, 4), \quad (5)$$

$$V_i = \frac{N_i - \frac{M}{2}}{M}(V_{\max} - V_{\min}) \quad (i = 5, 6, \dots, 8), \quad (6)$$

式中 V_i 为 FBG 中心波长处对应的控制电压; N_i 为第 i 个 FBG 中心波长出对应的采样点序号; V_{\max} 和 V_{\min} 分别为最大和最小控制电压; M 为总采样点数。

得到 4 个 FBG 8 个反射光中心波长对应的控制电压后,通过多项式拟合,可分别得到系统正行程扫描过程中,控制电压与扫描波长的关系,如图 3 所示。从该图可以看到,FFP 的控制电压与扫描波长之间存在明显的迟滞和非线性关系。但是通过在系统每次扫描过程中,实时建立扫描波长和控制电压关系的方法,保证了系统扫描波长的准确定位。

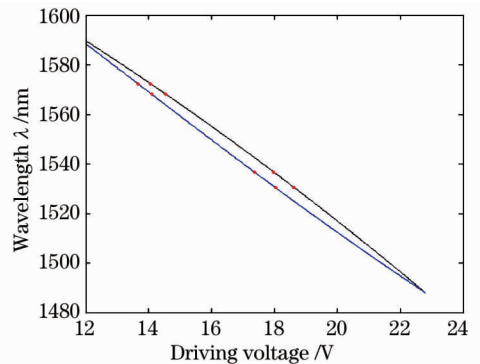


图 3 FFP 正行程扫描波长与控制电压关系
Fig. 3 Relation between scanned wavelength and driving voltage in both forward and back trip

4.2 乙炔气体吸收线的扫描

图 4 为由 Hitran 数据库中得到的乙炔标准吸收谱线和光谱仪对乙炔吸收谱线的扫描结果的对比。可以看出,二者在乙炔的强吸收峰处很好地对准,但在相邻的强、弱吸收峰之间存在“模糊”效应。这与 FFP 的波长扫描分辨率有关。

扫描分辨率不仅与控制电压的控制精度有关,同时与 FFP 的透射光的带宽有关。

本文选用 16 位的 D/A 口,FFP 的满量程范围(FSR)为 100 nm,因此 FFP 的波长扫描精度大约为 1.5 pm。但是 FFP 在扫描过程中,得到的光谱事实上是 FFP 的透射光谱与被分析物质吸收线的卷积结果。因此,FFP 透射光的带宽对光谱扫描分辨率的影响是不能忽视的。限于实验室现有的 FFP 的

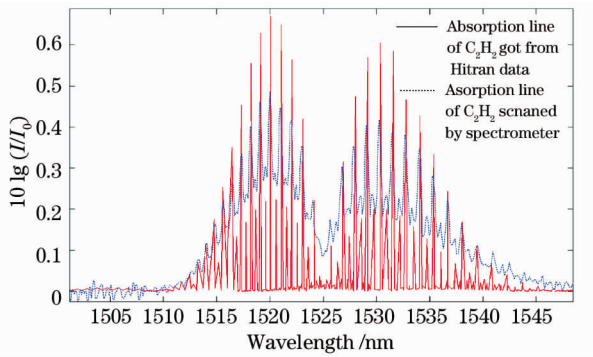


图 4 光谱仪对乙炔吸收线的扫描结果
与 Hitran 数据库中的乙炔吸收谱线的对比

Fig. 4 Comparison of absorption line of C_2H_2 scanned
by spectrometer and that obtained from Hitran data base

透光光带宽为 0.38 nm, 而乙炔的强吸收峰和与其相邻的一个弱吸收峰之间最小间隔大约 0.3~0.5 nm, 因此, 该光谱仪在扫过乙炔时, 在一个强吸收峰和与其相邻的弱吸收峰处会发生“模糊”效应。如果选择精细度较高的 FFP, 这种“模糊”效应将大大减小。

经对比计算, 在强吸收峰处, 光谱仪的扫描谱与标准谱波长的最大偏差小于 0.15 nm, 说明本文提出的 FBG 结合 PSO 的算法对 FPI 的扫描波长的准确定位是十分有效的。

5 结 论

以 FFP 为核心设计了一种低成本、便携式近红外光谱仪。通过实验验证, 扫描范围 1490~1590 nm, 波长准确度 ± 0.15 nm, 波长分辨率 0.4 nm。该光谱仪对工业现场的在线红外分析测试具有重要的应用意义。

参 考 文 献

1 Tusset Victor, Lemaire Olivier, Zeimetz Eva *et al.*. Use of

portable mini-emission spectrometers in metal industry [J]. *Metallurgical Analysis*, 2007, **27** (5): 8~13

2 Liu Naiwei, Lin Qican. Monitoring for unconventional leakage based on open path Fourier transform infrared [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2007, **28** (4): 183~186

刘乃维, 林启灿. 应用长光程傅里叶变换红外光谱仪监测石化厂区异常泄漏 [J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28** (4): 183~186

3 Chu Xiaoli, Lu Wanzhen. Recent development of near infrared spectrometer [J]. *Analytical Instrumentation*, 2008, (1): 1~4

褚小立, 陆婉珍. 近红外光谱仪新进展 [J]. *分析仪器*, 2008, (1): 1~4

4 T. Ganz, H. G. von Ribbeck, M. Brehm *et al.*. Compact frequency-comb Fourier-transform infrared spectrometer [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281** (14): 3827~3830

5 Zhang Hongbo, Zeng Libo, Ke tingyu *et al.*. Control system design for a novel near-infrared spectrophotometer based on AOTF [J]. *Journal Of Basic Science And Engineering*, 2006, **14** (1): 137~143

张宏波, 曾立波, 柯亨玉等. 基于 AOTF 的新型近红外光谱仪控制系统设计 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2006, **14** (1): 137~143

6 Zhu Haoran, Qin Haikun, Zhang Min *et al.*. Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35** (6): 893~897

朱浩瀚, 秦海琨, 张敏等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法 [J]. *中国激光*, 2008, **35** (6): 893~897

7 J. J. Liang, P. N. Suganthan, C. C. Chan *et al.*. WaveLength detection in FBG sensor network using tree search DMS-PSO [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18** (12): 1305~1307

8 C. C. Chan, C. Z. Shi, W. Jin. Improving the wavelength detection accuracy of FBG sensors using an ADALINE network [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15** (8): 1126~1128

9 Lu Kezhong, Wu Pu, Wang Ruchuan. A method of parameter estimation in a nonlinear system model based on particle swarm optimization [J]. *Computer Technology and Development*, 2008, **18** (6): 57~59

陆克中, 吴璞, 王汝传. 基于粒子群优化算法的非线性系统模型参数估计 [J]. *计算机技术与发展*, 2008, **18** (6): 57~59

10 U. Baumgartner, Ch. Magele, Renhart W. Pareto. Optimality and particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, **40** (2): 1172~1175

11 Z. Gaing. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, **19** (2): 384~91