

可调谐法布里-珀罗滤波器的高精度大范围实时定标

乔学光 王 瑜 傅海威 赵大壮 王 炜 张 晶

(西安石油大学陕西省光电传感测井重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要 将乙炔(C_2H_2)气体的吸收光谱作为标准波长参考,对可调谐光纤法布里-珀罗滤波器进行波长实时定标,使解调系统的测量精度提高到 1 pm。根据可调谐光纤法布里-珀罗滤波器谐振波长的周期性,提出了大波长范围的波长定标方法,从而可以在 1525~1615 nm 的范围内对可调谐光纤法布里-珀罗进行精确定标,实现了高精度大波长范围的信号探测。相比于传统的以光纤光栅作为波长参考的定标方法,该方法的测量精度、测量范围、系统运行可靠性都大为改善。

关键词 光纤光学; 光纤光栅传感; 信号解调; 可调谐光纤法布里-珀罗滤波器; 气体吸收池

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

High-Accuracy Real Time Calibration of Tunable Fabry-Pérot Filter on Large Range

Qiao Xueguang Wang Yu Fu Haiwei Zhao Dazhuang Wang Wei Zhang Jing

(Shaanxi Key Laboratory of Photoelectron Sensing Logging, Xian Shiyou University,
Xian, Shaanxi 710065, China)

Abstract Absorption spectrum of acetylene (C_2H_2) is used as the wavelength reference to calibrate the tunable fiber Fabry-Pérot (TFFP) filter in real time, and the accuracy of interrogation system based on TFFP has been improved. According to the free spectrum periodic characteristic of TFFP, a method to increase the wavelength calibration range was proposed. The system has a resolution of 1 pm over a working range of 1525~1615 nm in experiment. Compared with many traditional wavelength reference methods, this interrogation method is greatly improved in measurement precision, wavelength range and working reliability.

Key words fiber optics; fiber-optical grating sensing; signal demodulation; tunable fiber Fabry-Pérot filter; gas cell

1 引 言

光纤光栅传感网络实用化的一个关键技术就是研究开发出高性能、低成本的多波长检测解调系统。通过对各种典型解调技术的比较分析,可调谐光纤法布里-珀罗(TFFP)滤波器扫描法^[1]是实现光纤光栅传感网络解调最直接有效的方法。但可调谐光纤法布里-珀罗滤波器在实际应用中存在温度漂移、电压-波长的调谐关系具有滞后性、蠕动性以及非线性等技术难题,使解调系统的精度和分辨力很难提高,传统的波长校正方法最高只能达到 10 pm 的解调精度^[2]。

为了实现大范围解调,本文提出了利用可调谐光纤法布里-珀罗滤波器谐振波长的周期性,增大可调谐光纤法布里-珀罗滤波器扫描范围的方法,可以对其进行 C+L 波段的大范围精确定标。

2 实时定标理论

2.1 气体吸收谱做波长标定

基本原子或分子吸收光谱的波长值仅与原子受激吸收跃迁的上下两能级之间的能量间隔有关,对于外界的温度、压强的变化几乎不敏感^[3]。 C_2H_2 在 1510~1540 nm 范围内有 50 根明显的吸收谱线,国

收稿日期: 2007-09-28; 收到修改稿日期: 2007-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(60654001)、国家 863 计划(2006AA06Z210)、中国石油天然气集团公司应用基础研究项目(20050719)、陕西省教育厅产业化培育项目(05JC23)、西安市科技局信息技术专项项目(ZX05041)、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司庆咸管道线路工程光纤光栅检测项目(A-2006-JS-003)资助课题。

作者简介: 乔学光(1955-),男,陕西人,教授,博士生导师,主要从事光纤传感与检测等方面的研究。

E-mail: qiaoxueguang@xsyu.edu.cn

际标准化组织也已经对它的振动转动光谱吸收峰的每一根谱线的波长都做了标定^[4](图 1)。因此,将密封了 C_2H_2 的气室连接在光纤布拉格光栅(FBG)传感解调系统的光路中,通过光纤来输入和输出光信号,这些吸收谱线就可以在较大范围内提供精确的波长参考,从而提高系统测量精度。

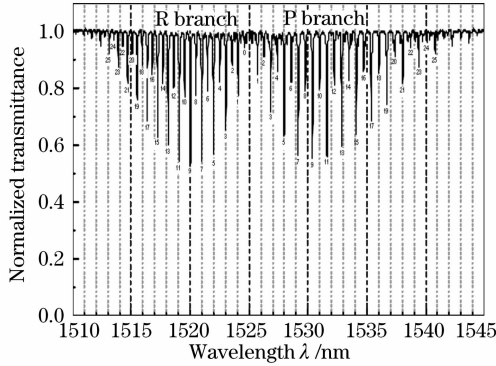


图 1 乙炔(C_2H_2)气体在近红外波段的吸收谱线

Fig. 1 Acetylene absorption spectrum in near infrared region

2.2 可调谐光纤法布里-珀罗滤波器工作原理

可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的结构是基于法布里-珀罗干涉结构。通过在仔细对准的平行光纤端面上淀积高反射涂层,光纤端面严格平行充当两块平行镜面,面之间的介质是空气(折射率 $n=1$),这两个平行镜面构成了光学谐振腔。将其固定在压电陶瓷上,通过外加电压使压电陶瓷产生电致伸缩作用来改变谐振腔的长度,从而改变光在光纤中的光学传输特性,即入射光经过可调谐光纤法布里-珀罗滤波器滤波后,其出射光的频率(光谱)特性发生变化。

可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的光学工作原理是多光束干涉^[5],当一束相干光入射到法布里-珀罗腔中,入射光在法布里-珀罗腔中来回多次反射,产生多光束干涉形成光学谐振。在每次反射过程中,相邻两束反射光或透射光的相位差都相等,其相位差满足以下关系:

$$\varphi = \frac{4\pi nd}{\lambda} = \frac{4\pi f}{c}nd, \quad (1)$$

式中 φ 为相邻两束透射光的相位差, n 为法布里-珀罗腔内材料的折射率, d 为法布里-珀罗谐振腔的长度, λ 为入射光波长, f 为入射光频率, c 为真空中光速。根据相长干涉,当相位差是 2π 的倍数时,透射光最强。由(1)式可看出,相位差 φ 与法布里-珀罗腔的折射率 n 和腔长 d 有关,因此通过调节法布里-珀罗腔的腔长或折射率均可改变法布里-珀罗滤波器对不同频率光的反射光强或透射光强,从而改变其光

传输特性。

2.3 波长校正

由可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的工作原理可知^[6],其透射谱(反射谱)由于多光束干涉呈谐振现象,峰值所对应的谐振频率 f_k 和谐振波长 λ_k 分别为

$$f_k = Ck/2nd, \quad (2)$$

$$\lambda_k = 2nd/k, \quad (3)$$

式中 $k = 1, 2, 3, \dots$, 为干涉级数。

自由光谱范围(Free spectral range, R_{FS})定义为相邻两谐振频率的间距,如图 2 所示。图中 T 为透射功率, T_{\min} 、 T_{\max} 分别为最小值和最大值,自由光谱范围表征可调谐光纤法布里-珀罗滤波器扫描滤波的极限范围,输入光的谱宽不能大于这一频率范围。由(3)式可求出

$$R_{FS} = \Delta\lambda = \frac{\lambda_{k-1}}{k} = \frac{\lambda_{k-1}^2}{2nd}, \quad (4)$$

式中 n 为定值,可以看出,可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的自由光谱范围与腔长成反比,当 d 固定时,自由光谱范围也是固定的,若已知 λ_1 则可求出 λ_2 。

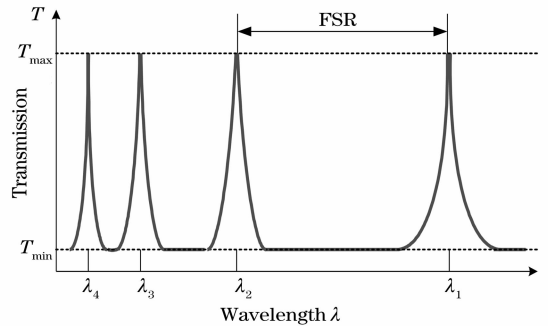


图 2 可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of the Fabry-Pérot filter

基于这种思想,使用 0~15 V 的锯齿波作为可

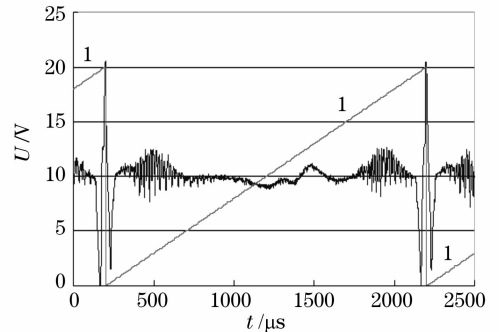


图 3 示波器采集法布里-珀罗滤波器两级次透射波长扫描气体吸收谱

Fig. 3 Gas absorption spectrum scanned by two harmonic of tunable Fabry-Pérot filter

调谐光纤法布里-珀罗滤波器的扫描电压,使相邻两级透射波长都能扫过气室的吸收谱波长范围(1525~1540 nm),如图3所示,示波器采集到的法布里-珀罗滤波器两级次透射波长扫描气体吸收谱,可以看到明显两级的气体吸收谱线,曲线1为给可调谐光纤法布里-珀罗滤波器加的锯齿波电压。根据谐振频率间距和腔长的恒定关系,结合(4)式拟和出可调谐光纤法布里-珀罗滤波器在1525~1605 nm范围的透射波长和锯齿电压的对应关系,实现可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的大范围波长精确定标。

3 光纤光栅传感信号解调系统设计

解调系统采用可调谐窄线宽激光器扫描法^[7],用可调谐光纤法布里-珀罗滤波器作为波长调谐元件来控制激光器的波长连续调谐输出,输出激光主动扫描传感光纤布拉格光栅反射谱,当激光波长调谐至光纤布拉格光栅反射峰值波长时,在探测器处接收的反射信号光强最大。用锯齿波驱动可调谐光

纤法布里-珀罗滤波器来进行波长的线性调谐,则由电压-波长关系可得到传感光纤布拉格光栅的中心反射波长。这类系统的信号光功率高,可以忽略噪声,适于测量静态或准静态参量。

如图4所示,通过锯齿波调节可调谐法布里-珀罗滤波器及时连续反复的扫描激光波长,产生的扫描激光经 $1 \times N$ (N 为需要检测的传感通道个数, $N > 2$)的耦合器后被送入 N 个传感通道。其中一个通道经3 dB耦合器后又被分为两路,一路进入传感光栅阵列,另一路进入气体吸收池参考通道后进行光电转换;还有一个通道经3 dB耦合器后被分为两路,一路进入传感阵列,另一路直接进行光电转换后减去气体吸收池吸收峰,使气体吸收峰倒置,便于进行数据拟合。每个传感通道又可以接入多个不同中心波长的光纤光栅传感器,从而可以复用更多的传感器,提高测量范围。 N 路传感通道反射回来的信号,进入光电探测器进行光电转换,经数据采集后送入计算机进行处理。

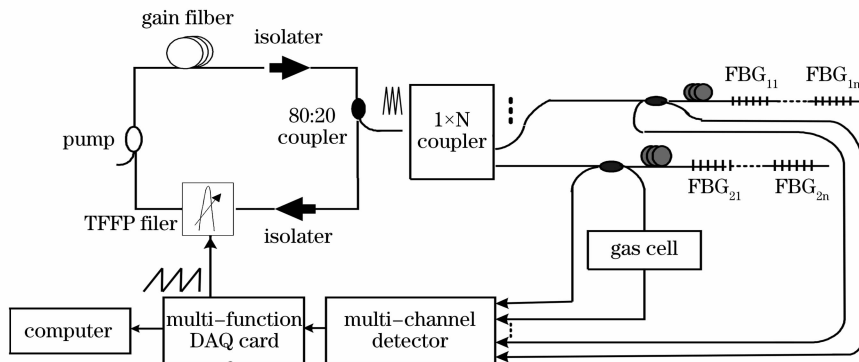


图4 高精度光纤光栅解调系统

Fig. 4 High-accuracy demodulating system of fiber grating sensors

4 数据拟合

在每次扫描过程中,光电探测器输出的电信号通过多路数据采集卡采集,高精度的模/数(A/D)转化之后,送入计算机进行处理。记录两级气体吸收谱每一个峰值点出现时刻的法布里-珀罗滤波器的扫描电压值,再根据可调谐光纤法布里-珀罗滤波器透射波长和扫描电压的关系,由锯齿波电压值和气体吸收谱线对应的波长值组成数据对,采用三次样条插值法^[8]进行数据拟合,中间非气体吸收谱部分的波长电压关系采用线性插值进行数据拟合,得出可调谐光纤法布里-珀罗滤波器透射波长与数据点(即扫描电压0~15 V)的曲线函数关系。最后将传感光栅峰值所对应的锯齿波电压值代入拟合曲线函

数中,就可精确得出光纤布拉格光栅传感器的波长值。

5 实验步骤及结果

1) 根据国际标准化组织(NIST)对 C_2H_2 的振动转动光谱的吸收峰的每一根谱线的波长做出的标定,选取其中适当的吸收谱线作为参考。

2) 选取3个待测光栅在光谱仪上测定其中心波长依次为:1531.648 nm, 1563.164 nm, 1582.252 nm。

3) 根据实验系统,进行三次随机实验,测出所选的气体吸收谱线所对应的锯齿波电压的位置,和法布里-珀罗滤波器下一级次的谐振波长扫描到的谱线所对应的锯齿波电压的位置,同时测定3个待

测光栅的锯齿波电压位置。

4) 由锯齿波电压值和吸收谱线所对应的波长值组成标定数据对 (u_i, λ_i) , 用三次样条插值结合线性插值方法标定出可调谐光纤法布里-珀罗滤波器

透射波长与数据点(即扫描电压 $0\sim 15\text{ V}$)的曲线函数关系, 将测定的待测光栅反射峰对应的锯齿波电压代入函数关系式, 即可得其布拉格中心波长 λ'_i , 如表 1 所示。

表 1 测量待测光栅的实验结果

Table 1 Experimental results of the grating to be measured

FBG center wavelength	1st measurement	2nd measurement	3rd measurement	spectrum measurement	absolute error
λ'_1/nm	1531.6486	1531.6474	1531.6483	1531.648	$\Delta < 1\text{ pm}$
λ'_2/nm	1563.1650	1563.1649	1563.1650	1563.164	$\Delta \leq 1\text{ pm}$
λ'_3/nm	1582.2527	1582.2519	1582.2524	1582.252	$\Delta < 1\text{ pm}$

5 结 论

设计实现了高精度大范围检测的光纤光栅传感系统, 从实验结果可以看出, 采用气体吸收池作为波长标定器件, 可以显著提高系统的测量精度, 测量绝对误差小于 1 pm 。同时提出了加大可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的扫描范围的方法, 使其可以在 80 nm 的范围精确定标。整个系统的控制处理由多通道高速数据采集卡和计算机完成, 数据处理中采用插值算法, 大大提高了系统的可靠性。本系统高精度大范围的性能特点, 适合于各类工程测量应用, 具有较高的市场推广价值。

参 考 文 献

1 F. T. S. Yu, S. Yin. *Fiber Optic Sensors* [M]. Marcel Dekker, Inc., 2002. 317~321
 2 M. A. Davis, A. D. Kersey, D. G. Bellemore. Fiber Bragg grating interrogation system with adaptive calibration[P]. United States Patent, 1998. 5818585

3 S. L. Gilbert, W. C. Swann. Acetylene $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ absorption reference for 1510 nm to 1540 nm wavelength calibration—SRM 2517a[C]. *NIST Special Publication*, 2001. 260~133
 4 Sarah Gilbert. Wavelength references for optical fiber communications[C]. *NIST ATP National Meeting November*, 1999. 1~20
 5 N. Neumann, M. Ebermann, K. Hiller *et al.*. Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Pérot filter[C]. *MOEMS and Miniaturized Systems*, 2007
 6 Guan Bai'ou, Yu Youlong, Ge Chunfeng *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Pérot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 34~37
 关柏鸥, 余有龙, 葛春风 等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 34~37
 7 Jin Wei, Ruan Shuangchen, Chen Zhichao *et al.*. *New Progress of Optical Fiber Sensing* [M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 2005. 240~244
 靳 伟, 阮双琛, 陈志超 等. *光纤传感技术新进展*[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 2005. 240~244
 8 Bo Junjie. Multichannel Distributed FBG Sensing Network[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. 69~71
 柏俊杰. 多通道分布式光纤 Bragg 光栅传感网络波长解调技术的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2006. 69~71