

文章编号: 0258-7025(2005)06-0825-04

基于实时校准技术的光纤光栅传感解调系统

陈长勇, 乔学光, 王小凤, 贾振安, 党瑞荣

(西安石油大学光纤传感实验室, 陕西 西安 710065)

摘要 报道了一种采用实时校准技术的数字化光纤光栅传感解调方案。解调系统利用锯齿波电压信号和数字相位同步信号控制可调谐光纤法布里-珀罗(TFFP)滤波器,对光纤光栅传感器阵列进行扫描式寻址,同时采用非测量环境中的参考光栅和数字温度计提供精确的参考波长,并由高速数字信号处理器(DSP)实时校准滤波器的波长读取值,很好地消除了滤波器调谐的温度漂移、非线性和蠕动性引起的测量误差。结果表明,实验系统的波长寻址范围为 1520~1570 nm,扫描频率为 100 Hz,波长测量分辨率为 5 pm,应变测量分辨率为 4.13 $\mu\epsilon$ 。

关键词 光纤光学; 传感器; 可调谐光纤法布里-珀罗滤波器; 实时校准; 数字信号处理器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Demodulation System for Fiber Bragg Grating Sensors Based on a Real-Time Calibration Technique

CHEN Chang-yong, QIAO Xue-guang, Wang Xiao-feng, JIA Zhen-an, DANG Rui-rong

(Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract This paper reports a digital demodulation scheme for interrogating fiber Bragg grating (FBG) sensors based on a real-time calibration technique. The system controls a tunable fiber Fabry-Perot filter (TFFP) with sawtooth wave voltage and synchronous signal of its digital phase to interrogate FBG sensors in a single fiber. Meantime, a reference FBG and a digital thermometer provide an accurate reference wavelength, which is used to calibrate the wavelength readout of the TFFP in real-time by a digital signal processor (DSP). This method eliminates the measurement error induced by temperature drift, nonlinearity and creepage of TFFP. The result demonstrates that this experimental system has scanning range of 1520~1570 nm, scanning frequency of 100 Hz, measured wavelength resolution of 5 pm, and measured strain resolution of 4.13 $\mu\epsilon$.

Key words fiber optics; sensors; tunable fiber Fabry-Perot filter; real-time calibration; digital signal processor

光纤光栅传感器具有波长编码、抗电磁干扰的特点,容易在单根光纤上实现准分布式多点测量^[1,2]。具有大范围波长寻址和高精度波长检测的解调系统是其实用化的关键。可调谐激光器扫描法^[3]、非平衡马赫-曾德尔干涉仪法^[4]和匹配光栅滤波法^[5]可以进行高分辨率的解调,但解调范围较小。可调谐光纤法布里-珀罗(TFFP)滤波器法^[6,7]具有大范围寻址能力,是实现准分布式光纤光栅传感网络的重要途径。然而通过实验,发现可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的控制电压与透射波长的关系受温度漂移、压电陶瓷的滞后性和蠕动性的影响很大,直接由电压来读取波长^[8,9]难以实现高精度的波长检测。

本文提出一种波长实时校准方案,由参考光栅和数字温度计提供参考波长,在扫描调谐过程中提供可调谐光纤法布里-珀罗滤波器一个波长-控制电压的精确参考点,由高速信号处理器实时校准其电压-波长的对应关系,大大提高了波长检测的准确性。

1 系统工作原理

系统总体方案如图 1(a)所示,宽带光源(BBS)发出的平坦光经过耦合器 C_1 ,一部分光进入波分复用型光纤光栅传感器阵列(FBG_{s1}, FBG_{s2}, ..., FBG_{sn}),一部分光进入非测量环境中的参考光栅

收稿日期: 2004-07-01; 收到修改稿日期: 2004-09-20

基金项目: 国家 863 计划(2002AA313150)和国家自然科学基金(69877025)资助项目。

作者简介: 陈长勇(1979—),男,湖北人,西安石油大学光纤传感实验室硕士研究生,主要从事光纤光栅传感技术及光纤通信的研究。E-mail: ccy013@163.com

(FBG_r),各光栅的反射光经过 C₁ 叠加后返回进入可调谐光纤法布里-珀罗滤波器。考虑光纤光栅的反射谱为高斯函数分布^[10],则滤波器接收到的信号光可描述为

$$P_{\text{sig}}(\lambda) = k_1 \sum_{i=1}^n P_{s_i} \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{s_i})^2}{\Delta\lambda_{s_i}^2}\right] + k_1 P_r \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_r)^2}{\Delta\lambda_r^2}\right], \quad (1)$$

式中 P_{s_i} 是第 i 个传感光栅 FBG_{s_i} 的峰值反射功率, λ_{s_i} 为其峰值反射波长,变化量与该光栅处的被测量(如

压力、温度或应变等)呈线性关系, $\Delta\lambda_{s_i}$ 是其 3 dB 反射带宽; $P_r, \lambda_r, \Delta\lambda_r$ 是 FBG_r 的峰值反射功率、反射波长和 3 dB 反射带宽; k_1 表示信号光经过 C₁ 的功率损耗系数。图 1(b) 由上至下依次为传感阵列的反射谱、参考光栅的反射谱和可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的透射谱。可调谐光纤法布里-珀罗滤波器置于电子系统控制的微型恒温箱中,保证其调谐区间恒定,且覆盖所有光栅波长。解调系统的核心任务是精确分析出信号光的各个峰值波长 λ_{s_i} 。

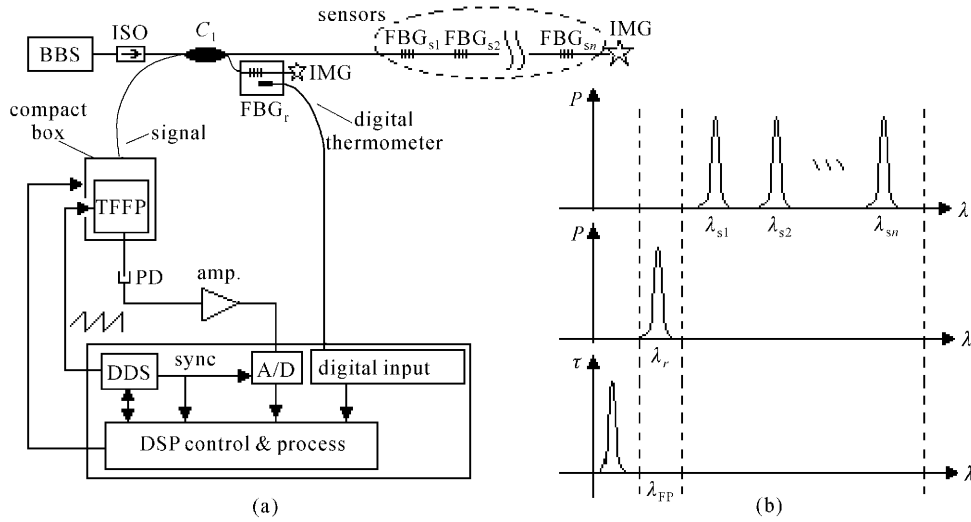


图 1 解调系统的总体方案(a)和信号光谱(b)

Fig. 1 (a) General scheme and (b) spectra of the signal of the demodulation system

电子系统一方面控制数字频率直接合成(DDS)模块产生锯齿波电压信号,周期性地调节可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的透射波长,实现对信号光的扫描式滤波,其滤波光强被光探测器(PD)电路转化为电压信号 $U_{pd}(t)$,一方面控制 A/D 对 $U_{pd}(t)$ 进行同步采集,同时由数字式温度传感器读取参考光栅处的温度 $T(t)$ 。考虑到可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的单个扫描周期很短,认为该时段内各光栅的反射波长不变,且将可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的透射谱 $\tau(\lambda)$ 近似为高斯函数分布,仅取单个透射波长,其值为 $\lambda_{FP}(t)$,则有

$$U_{pd}(t) = k_2 \int_0^{+\infty} \tau(\lambda) \times P_{\text{sig}}(\lambda) d\lambda = k_2 \int_0^{+\infty} \tau_{\text{max}} \exp\left[-4\ln 2 \frac{\lambda - \lambda_{FP}(t)}{\Delta\lambda_t^2}\right] P_{\text{sig}}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中 k_2 为光电转换系数, $\tau_{\text{max}}, \Delta\lambda_t$ 为可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的峰值透射系数和 3 dB 带宽。代入(1)式,且利用积分关系式

$$\int_0^{+\infty} \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_1)^2}{\Delta\lambda_1^2}\right] \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_2)^2}{\Delta\lambda_2^2}\right] d\lambda = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \frac{\Delta\lambda_1 \Delta\lambda_2}{(\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_2^2)^{1/2}} \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_2^2}\right], \quad (3)$$

可以得到

$$U_{pd}(t) = k_2 k_1 \tau_{\text{max}} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\lambda_t \Delta\lambda_{s_i}}{(\Delta\lambda_t^2 + \Delta\lambda_{s_i}^2)^{1/2}} \exp\left\{-4\ln 2 \frac{[\lambda_{FP}(t) - \lambda_{s_i}]^2}{\Delta\lambda_t^2 + \Delta\lambda_{s_i}^2}\right\} + k_2 k_1 \tau_{\text{max}} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \frac{\Delta\lambda_t \Delta\lambda_r}{(\Delta\lambda_t^2 + \Delta\lambda_r^2)^{1/2}} \exp\left\{-4\ln 2 \frac{[\lambda_{FP}(t) - \lambda_r]^2}{\Delta\lambda_t^2 + \Delta\lambda_r^2}\right\}, \quad (4)$$

由于各光栅的反射波长互不重叠, $U_{pd}(t)$ 的时序上会出现 $n+1$ 个峰值点

$$\lambda_{FP}(t_i) = \lambda_{s_i}, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad \lambda_{FP}(t_{n+1}) = \lambda_r, \quad (5)$$

所以,只要能够准确读取 $t_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 时刻可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的透射波长,即可获取各光栅传感器的反射波长 λ_{sr} ,进而根据传感器的被测量-波长的标定关系,可得各传感点的环境被测量信息。

由于波长调谐的非线性,将可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的控制电压与波长的关系式设为高次的非线性函数

$$\lambda_{FP}(t) = \lambda_0(t) + K_1 U(t) + K_2 U^2(t) + K_3 U^3(t) \quad (6)$$

实验证实,常量系数 K_1, K_2, K_3 可在恒定的波长扫描速率下标定,反映电压 $U(t)$ 与波长的相对变化量关系。 $\lambda_0(t)$ 在理想情况下应为常数,但因可调谐光纤法布里-珀罗滤波器透射波长的温度漂移性、滞后性、蠕动性等因素而成为随机量,其数值的准确分析决定了系统的绝对测量精度。

本系统采用动态的波长实时校准方法来分析 $\lambda_0(t)$ 值,从而对(6)式进行实时校正,达到精确读取可调谐光纤法布里-珀罗滤波器透射波长和传感器波长的目的。其电子处理思想是:利用程序搜索到光探测信号中参考波长对应的峰值点时刻 t_{n+1} ,然后借助于数字频率直接合成模块的同步信号得到该时刻可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的控制电压 $U(t_{n+1})$ 。系统读取参考光栅处的温度 $T(t)$,得到其反射波长(与温度的对应关系事先标定)的精确值 λ_r 。由(5)式可知,控制电压为 $U(t_{n+1})$ 时,可调谐光纤法布里-珀罗滤波器透射波长的精确值为 λ_r ,代入(6)式中,可以推算出 $\lambda_0(t)$ 的精确值,进而校准公式(6),然后根据(5)式,(6)式得到各传感器的精确波长值。系统采用高速数字信号(DSP)处理技术和数字频率直接合成技术,使 $U(t_{n+1})$ 和 λ_r 的获取极为实时和准确,保证了波长实时校准的精确度。

2 实验与结果

实验中,宽带光源(Lightcomm C+L ASE)总功率为 12 dBm,3 dB 带宽约 85 nm,光探测器(PD GT322D)转换电路的探测灵敏度为 0.1 nW。可调谐光纤法布里-珀罗滤波器(Micron Optics FFP-TF)的波长可调谐范围为 1520~1570 nm,控制电压为 0~10 V,透射波长的线宽为 0.12 nm,扫描速率达 1 kHz 以上。光纤光栅元件均用相位掩模板方法写入,反射带宽均约为 0.2 nm。电子系统由温控模块,数字频率直接合成模块,光探测电路,A/D 转换电路,数字信号处理单元,数字温度传感器通道等组成,根据系统需求分步骤设计了各部分的电路,

然后制作了集成电路板,保证了工作性能和可靠性。

在系统联合调试之前,对可调谐光纤法布里-珀罗滤波器进行了测试和常系数标定。保持可调谐光纤法布里-珀罗滤波器电极的电压为零,置于数控温箱中,调节温度,用光谱仪(Anritsu MS9710C)记录其透射波长,得到其波长-温度的平均漂移系数为 0.82 nm/°C,而且呈现非线性。保持可调谐光纤法布里-珀罗滤波器恒温,在 0~10 V 间调节电压,得到电压-波长的调谐曲线,多次测试的最大重复偏差为 2 nm,即可调谐光纤法布里-珀罗滤波器具有明显的蠕变性。但调谐曲线的形状保持不变,根据(6)式对实验数据进行最小二乘法拟合,得到常系数 $K_1 = 0.00707, K_2 = 0.00059, K_3 = 0.00006$ 。

本系统利用高速数字器件设计了数字频率直接合成模块,产生高精度的锯齿波和数字相位同步信号。锯齿波周期为 10 ms,即频率为 100 Hz,峰值电压为 10 V,每个周期对应 10000 个相位点,其同步信号确保了滤波光强采集和可调谐光纤法布里-珀罗滤波器控制电压的精确对应关系。温控模块由特定算法的程序控制,使可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的温度恒定在 20 ± 0.2 °C,避免了调谐区间的大幅度漂移。数字信号处理选用高速浮点处理器(TI TMS320VC33),可满足波长校准的实时处理需求。在噪声很低时,系统的波长分辨率 $\delta\lambda$ 取决于可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的波长读取分辨率

$$\delta\lambda = \delta U \times K_{\text{tune}} = \frac{10}{10000} \times \frac{50}{10} = 5 \times 10^{-3} \text{ nm} = 5 \text{ pm}, \quad (7)$$

根据传感光栅的应变响应关系式 $\delta\lambda/\lambda_0 = 0.78\delta\epsilon$,可得系统的应变测量分辨率约为 $4.13 \mu\epsilon$ 。

系统调试时,采用反射波长为 1547.2 nm, 1551.5 nm, 1556.5 nm 三个光纤光栅作为传感光

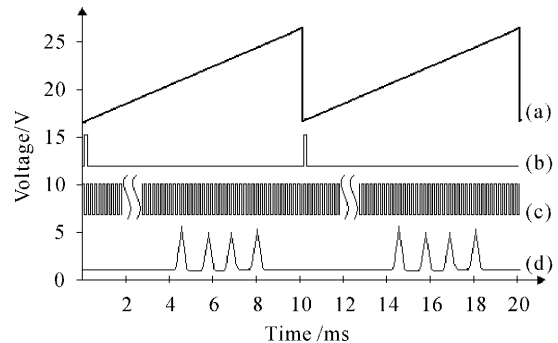


图2 执行连续测量的信号时序图

Fig. 2 Timing diagram of the system when performing continuous measurement

栅。波长为 1541.6 nm 的参考光栅置于封闭盒中,经测试,其波长与温度的线性度为 99.98%,温度系数为 0.012 nm/°C,数字温度传感器的读取精度为 0.1 °C,对应的参考波长读取精度为 1.2 pm,确保了高的校准精度。图 2 所示为系统执行连续测量时的信号时序图,图 2(a)为驱动可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的锯齿波,图 2(b),(c)分别为锯齿波的周期同步信号(100 Hz)和相位同步信号(1 MHz),图 2(d)为滤波光强的采集数据。

程序搜索到光强峰值,利用同步信号推算出该时刻可调谐光纤法布里-珀罗滤波器的电压。根据(5),(6)式,分别采用直接读取方法和实时校准方法

时,系统多次(间隔为 20 s)读取传感光栅波长的测试结果如图 3 所示。图 3(a)的平均读取误差为 0.29 nm,而且间隔 1 h 后的测试偏差达 1 nm 以上,证实可调谐光纤法布里-珀罗滤波器波长随环境的漂移很大。图 3(b)的读取误差均小于 0.016 nm,而且间隔 12 h 以上性能保持不变,这是由实时校准来保证的。通过抑制锯齿波的噪声可进一步减小测试误差。实时校准算法所消耗的时间小于 2 ms,系统可在进行下一次扫描采集时处理上一次测试数据,从而实现了对外界被测量的实时检测,扫描频率达 100 Hz。同时,本系统采用点阵式液晶显示测试结果,具有体积小、轻便和可靠性好的优点。

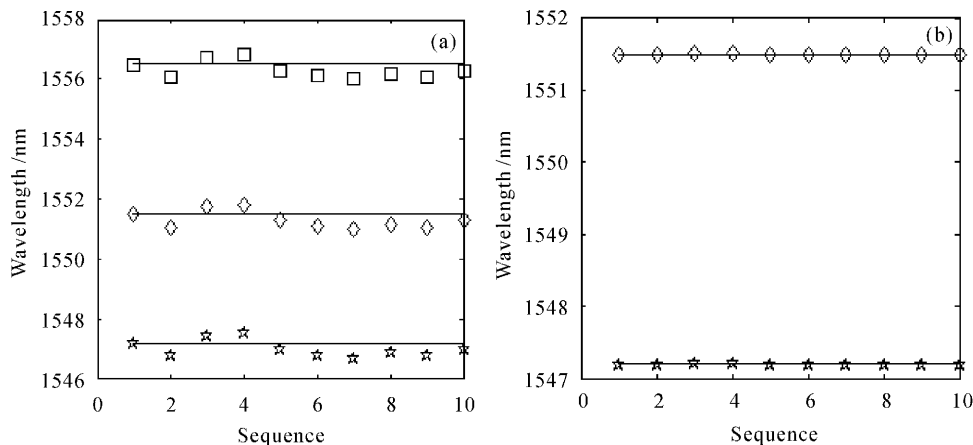


图 3 系统的测试结果。(a) 采用直接读取方法, (b) 采用实时校准方法

Fig. 3 Testing result of the system when adopting method of (a) direct readout and (b) real-time calibration

3 结 论

发现可调谐光纤法布里-珀罗滤波器在调谐过程中存在温度漂移性、滞后性和蠕动性,因此提出了一种新型的波长实时校准方案,在扫描过程中提供可调谐光纤法布里-珀罗滤波器一个波长-控制电压的精确参考点,并由高速信号处理器实时校准其电压-波长的对应关系,大大提高了波长检测的准确性。利用数字电子技术,实现了小型化的光纤光栅传感解调系统。

参 考 文 献

- 1 V. V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2000, **32**: 497~503
- 2 Y. J. Rao. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 1999, **31**: 297~324
- 3 Wei Jin. Investigation of interferometric noise in fiber-optic Bragg grating sensors by use of tunable laser sources [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(13): 2517~2525
- 4 Minh Song, Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin. Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7): 1106~1111
- 5 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 330~336
- 6 张伟刚,开桂云,董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论及实验研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 330~336
- 7 Yu-Lung Lo, Jen-Fa Huang, Po-Hsun Sung *et al.*. Intensity variation effects in fibre Bragg grating sensors scanned by a tunable filter [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**: 1456~1462
- 8 Yu Youlong, Tam Hwayaw. Active spatial/wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2): 131~134
- 9 余有龙,谭华耀. 有源波、空分复用光纤光栅传感网络 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2): 131~134
- 10 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Chung Wenghong. Technique for fiber Bragg grating array interrogation with a tunable Fabry-Perot Filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(12): 1103~1106
- 11 余有龙,谭华耀,钟永康. 基于可调 F-P 滤波器的光纤光栅传感器阵列查询技术 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(12): 1103~1106
- 12 Xie Fang, Wang Huiqin. A fiber Bragg grating sensing system with a fiber F-P wavelength filter [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(4): 359~362
- 13 谢芳,王慧琴. 用光纤 F-P 滤波器解调的光纤光栅传感器的研究 [J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(4): 359~362
- 14 Liu Yunqi, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. Theoretical and experimental researches on tunable filtering detection technique of fiber grating sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 88~92
- 15 刘云启,刘志国,郭转运等. 光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 88~92