

空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调中 LED 光源的影响研究

江俊峰^{1,2} 吴 凡^{1,2} 刘铁根^{1,2} 刘 琨^{1,2} 王 双^{1,2}

尹金德^{1,2} 秦尊琪^{1,2} 邹盛亮^{1,2} 张学智^{1,2}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072
² 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 结合恢复单色频率绝对相位解调算法研究了光源输出参数对空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调影响。建立了相位解调值随光源中心波长变化的数学模型,通过改变光源光功率和光谱进行了解调实验研究。结果表明压力解调值的误差值与光源输出光功率有关;当温度升高时光源光谱会产生红移,使压力解调值产生误差;解调值与光源光谱中心波长满足二次函数关系。实验结果与理论分析一致,在 140 kPa 范围内保证 0.1% 的解调误差时,光源光谱中心波长波动小于 1.79 nm。

关键词 光纤光学;光纤法布里-珀罗;低相干干涉;光源;光纤传感

中图分类号 TN212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0223002

Research on LED Effect in Spatial Scanning Optical Fiber Fabry-Perot Sensing Demodulation System

Jiang Junfeng^{1,2} Wu Fan^{1,2} Liu Tiegeng^{1,2} Liu Kun^{1,2} Wang Shuang^{1,2}

Yin Jinde^{1,2} Qin Zunqi^{1,2} Zou Shengliang^{1,2} Zhang Xuezhhi^{1,2}

¹ College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The impact of optical source on the accuracy in recovery monochromatic frequency absolute phase demodulation algorithm for optical fiber Fabry-Perot sensor is studied in this paper. The relationship between phase demodulation value changes and the output spectrum of optical source is discussed both in theoretical aspect and demodulation experiment. Results show that the demodulating error has a relationship with the light source optical power. When the temperature changes from low to high, the source spectrum's redshift causes pressure demodulation value error. The demodulation results show a quadratic relationship with various central wavelength of optical source, which is consisted with the theoretical analysis. Within the pressure range of 140 kPa, the central wavelength fluctuation of light source should be lower than 1.79nm when 0.1% demodulation error is needed.

Key words fiber optics; fiber Fabry-Perot; low coherence interferometry; light source; optical fiber sensor

OCIS codes 230.3670; 060.2370; 120.2230

1 引 言

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器具有体积小、重

量轻、灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰能力强、抗腐蚀能力强等优点,是获得广泛应用的光纤传感器

收稿日期: 2013-07-26; **收到修改稿日期**: 2013-09-16

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(11004150, 61227011, 61108070)、天津市科技支撑计划(11ZCKFGX01900)、天津市自然科学基金(13JCYBJC162000)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、教育部留学回国人员科研启动基金

作者简介: 江俊峰(1977—),男,副教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光电检测和光纤偏振技术等方面的研究。

E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn

之一,在建筑结构、航空航天等领域有很好的应用前景^[1-2]。获取高精度、高稳定的光纤 F-P 传感解调是发挥光纤 F-P 传感器优势的关键。基于低相干干涉的空间扫描型光纤 F-P 解调是通过光楔实现光程差的空间扫描,并采用线阵 CCD 接收光信号,完成光纤 F-P 传感器的腔长查询。由于未使用移动部件,解调系统的稳定性好、可靠性高,非常适合于现场恶劣环境下应用。研究人员在这方面提出了多种方案,如 Chen 等^[3]通过 Michelson 干涉仪倾斜两个反射镜构成虚拟光楔,Dändliker 等^[4]利用 Wollaston 棱镜构成双折射光楔并研究了信号处理算法,Belleville 等^[5]利用 Fizeau 干涉仪构成光楔,Marshall 等^[6]利用 Mach-Zehnder 干涉仪构成虚拟光楔。在计算模型研究方面,赵艳等^[7]研究了光楔的互相关数学模型,李磊等^[8]研究了双折射光楔对光程差分布的影响,建立了 CCD 的光照度数学模型^[9],并提出了恢复单色频率绝对相位算法^[10]。在上述研究中,对光源的讨论少。然而在很多应用中会涉及到高精度压力测量,如航空中的大气数据测量^[11],光源作为关键部件,其光输出性能对光纤 F-P 传感解调精度必然会产生影响。由于 LED 光源具有低成本和大谱宽等优点,常在空间扫描型光纤 F-P 解调系统中采用 LED 光源,而 LED 光功率和光谱会受到电流、温度的影响^[12-14]。本文将结合恢复单色频率绝对相位算法研究 LED 光源功率稳定性、光谱稳定性对解调系统的精度影响。

2 理论分析

2.1 空间扫描型光纤 F-P 传感解调原理

光纤 F-P 传感器将待测物理量转变为 F-P 腔长,经过空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统解调出腔长信息实现传感。空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统主要由 LED 光源、解调光路 and 数据处理单元三部分组成,如图 1 所示。其中,解调光路包括柱面镜、起偏器、双折射光楔、检偏器和线阵 CCD。

LED 光源耦合进光纤后,通过耦合器入射到 F-P 传感器,经 F-P 传感器的两个端面反射后形成两束光后产生干涉,两束光的光程差为两倍 F-P 腔长。反射光再次通过耦合器入射到柱面镜,被柱面镜聚焦成线状后通过起偏器起偏,双折射光楔在空间提供光程差扫描,在检偏器后形成低相干干涉条纹,采用线阵 CCD 将光信号转化为电信号,最后在数据处理单元中通过提取低干涉条纹的绝对相位完成解调。

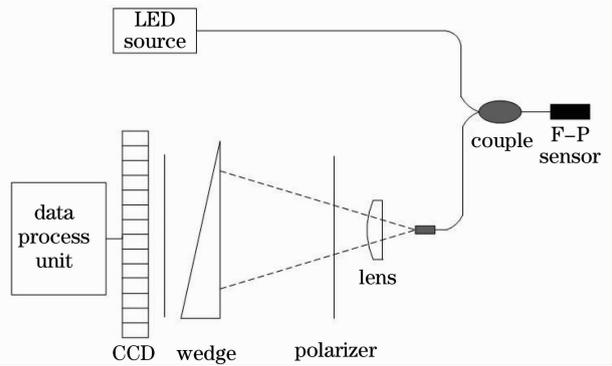


图 1 空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统
Fig. 1 Schematic diagram of spatial scan fiber F-P sensor demodulation principle

2.2 LED 光源光功率变化对解调精度的影响

LED 光源加载的电流是影响 LED 输出光功率的主要因素。解调光路入射光功率的大小直接影响着 CCD 的光积分过程,进而影响到信噪比。低相干干涉信号质量可用信噪比(SNR) $R_{SN} = 20 \log(V_{p-p}/V_n)$ 表示^[9],其中 V_{p-p} 为干涉信号的峰峰值,即干涉信号中波峰与波谷的最大幅值差值, V_n 为信号噪声的标准差。当入射光功率不足时,光电转化后的干涉信号弱而信噪比低,在用恢复单色频率绝对相位法对每一帧低相干干涉信号数据进行处理时,噪声的随机变动导致解调结果波动,直接影响了 F-P 传感解调精度。当光功率过大时,CCD 输出的信号会出现饱和和失真,使低相干干涉信号的傅里叶变换结果产生误差,从而影响解调精度。

2.3 LED 光谱变化对解调精度的影响

恢复单色频率绝对相位算法中,只要光谱宽度满足一定要求,就不会对解调产生影响,因此主要研究 LED 光源中心波长的影响。LED 光源光谱主要受环境温度和加载电流的影响。当环境温度升高时,高温产生的热效应引起带隙收缩,LED 禁带宽度 E_g 变小,峰值波长会向长波长的方向移动;当电流增大时,LED 的峰值波长会向短波长的方向移动^[15-16]。

通过双折射光楔后的干涉条纹可以表示为

$$I = I_0 \exp \left\{ - \left[\frac{\pi \Delta \lambda (\Delta n \cdot x \tan \theta - 2h)}{\sqrt{\ln 2} c} \right]^2 \right\} \times \cos \left[(\Delta n \cdot x \tan \theta - 2h) \frac{\pi \lambda_0}{c} \right]. \quad (1)$$

式中 I_0 为干涉信号光强最大值, $\Delta n = n_o - n_e$ 为光楔在中心波长的双折射率差, x 为干涉条纹在 CCD 上的位置, λ_0 为光源光谱中心波长, $\Delta \lambda$ 为光谱半峰全宽, c 为光速, θ 为光楔楔角, h 为 F-P 腔长。

则干涉条纹峰值位置为

$$x_0 = \frac{2h}{\Delta n \tan \theta} \quad (2)$$

双折射光楔存在双折射色散,是波数 k_0 的函数,可表示为 $\Delta n = f(k_0)$ 。当光源光谱发生移动的时候,双折射光楔同一空间位置对应的光程差发生变化,从而使求出的腔长值产生偏差。

在恢复单色频率绝对相位算法解调中,所选单色频率 Ω 表示为

$$\Omega = n_k \delta, \quad (3)$$

式中 n_k 为所选频率序号, δ 为频率分辨率, $\delta = 1/(N\Delta n\Delta d)$, N 为 CCD 像元个数, Δd 为相邻像元几何光程差。

当光源光谱发生移动时,双折射光楔光程差扫描范围发生变化,使频率分辨率发生变化,导致选取的单色频率 Ω 随之改变。干涉信号的相频函数 $\varphi(\Omega, x_0)$ 表示为

$$\varphi(\Omega, x_0) = -\Omega x_0. \quad (4)$$

代入(2)式和(3)式,得到

$$\varphi(\Omega, x_0) = \frac{2hn_k}{Nf^2(k_0)\tan\theta\Delta d}. \quad (5)$$

由于双折射色散通常比较小, $f(k_0)$ 可近似为波数的一次函数,因此,绝对相位与中心波数的平方成反比,即与中心波长成二次函数关系。通过(5)式可以计算出光谱中心波数变化引起的绝对相位的偏差,从而分析出解调误差。

图 2 为 LED 在两个中心波长下的仿真计算结果图,计算时 F-P 腔长保持不变, CCD 像元数为 3000, 像元宽度为 $7 \mu\text{m}$, LED 光源为高斯光谱,中心波长为 438 nm、光谱半峰全宽为 25 nm, 红移后的中心波长为 448 nm、光谱半峰全宽为 25 nm, 双折射率差在 438 nm 和 448 nm 时分别为 0.011992 和 0.011977^[17]。

由图 2 的局部放大图中可知,当中心波长发生 10 nm 的变化时,干涉条纹的峰值位置发生偏移,偏移量约为 5 个 CCD 像元,即干涉峰值有约 $35 \mu\text{m}$ 的偏移量。

对两个低相干干涉信号分别进行离散傅里叶变化,得到两个信号的相对相位曲线,选取频谱中序号 76 的频率作为解调采用的单色频率,以该频率对应的相位为基准进行相位解包裹,得到绝对相位曲线,如图 3 所示, DFT 表示离散傅里叶变换。可知,随着光源中心波长发生变化,信号的相位曲线也发生移动。

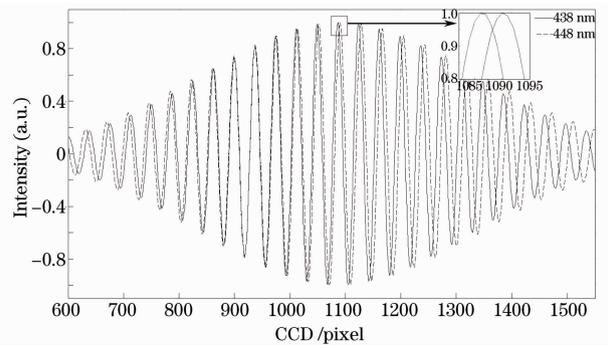


图 2 CCD 接收到的低相干干涉条纹

Fig. 2 Low coherence interference fringes received by CCD

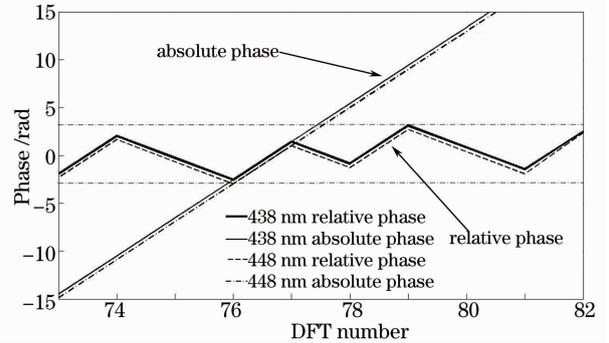


图 3 相频曲线

Fig. 3 Phase-frequency curves

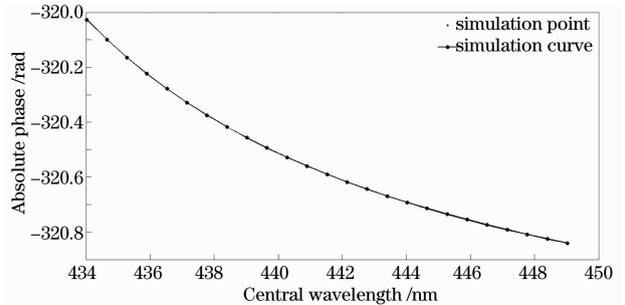


图 4 绝对相位随中心波长变化曲线

Fig. 4 Variation of absolute phase with the central wavelength

图 4 为绝对相位随中心波长变化曲线,其中中心波长满足二次函数关系,二次拟合系数为 0.0028。由于二次系数比较小,在小的波长变化范围内,可以采用线性近似来简化分析。在 438~448 nm 仿真范围内,绝对相位由 -320.4232 rad 变为 -320.8521 rad , 变化量 0.4289 rad 。

3 实验与结果分析

系统中采用 3 W 蓝光 LED 芯片,发光面积为 1 mm^2 、发光角度为 140° ,光谱为高斯分布,室温下中心波长为 439 nm。进行实验的 F-P 压力传感器

放置于压力容器中并采用高精度高稳定性压力源施加压力,通过控制驱动电流和温度改变 LED 光输出参数进行实验。

3.1 光源光功率对干涉信号信噪比和解调精度影响

将 F-P 压力传感器置于压力容器中保持压力 103.75 kPa 不变下,调节 LED 光源的驱动电流改变输出光功率。图 5 为 LED 参数随驱动电流的变化。

由图 5(a)可知 LED 输出光功率与加载电流呈线性关系,电流在从 0.2 A 增大到 0.75 A 时,耦合到光纤的光功率改变约 $40 \mu\text{W}$;由图 5(b)可知 LED 光谱随着电流的增大,向短波长方向漂移,但中心波长变化小于 0.7 nm;由图 5(c)可知 LED 光源光谱半峰全宽随电流增大首先会快速减小,但在 0.4 A 后趋于稳定,0.8 A 与 0.2 A 相比光谱宽度减小 1.6 nm。

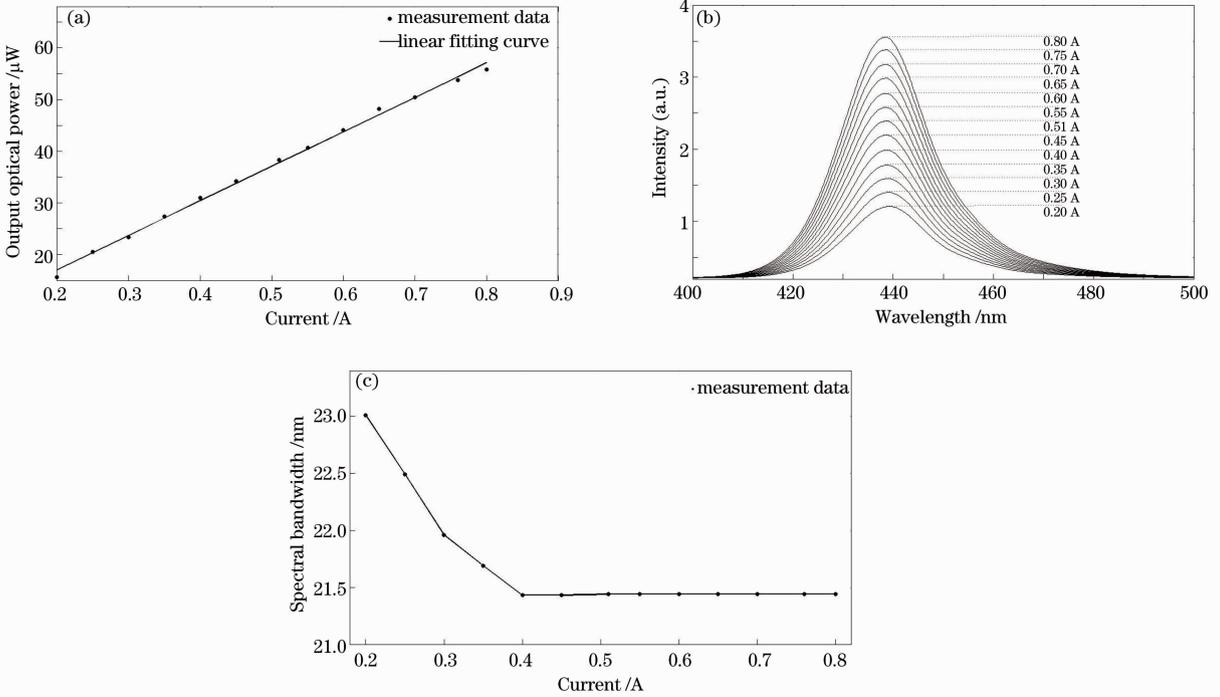


图 5 LED 参数随驱动电流的变化。(a)输出光功率;(b)光谱;(c)光谱谱宽

Fig. 5 Dependence of LED parameters on current. (a) Output optical power; (b) spectrum; (c) spectral bandwidth

实验中在同一入射光功率下采集 100 frame 低相干干涉条纹数据,每隔 2 s 采集一帧,计算该 100 frame 数据的信噪比并用其平均值代表信噪比真值,同时计算该 100 frame 数据的相位解调值及其标准差。图 6(a)为干涉信号信噪比随光源光功率的变化由图可知,干涉信号信噪比随光源光功率先增大后

减小,在光源光功率处于 $34 \sim 38 \mu\text{W}$ 之间时,干涉信号信噪比均大于 24.3 dB。光源光功率增大,干涉信号信噪比减小的原因是由于直流偏置较大,干涉条纹出现饱和失真,当光源光功率增大到 $50 \mu\text{W}$ 时,信号出现严重的饱和失真,一半的干涉峰已经被削平;图 6(b)为压力解调误差随光源光功率的变化,

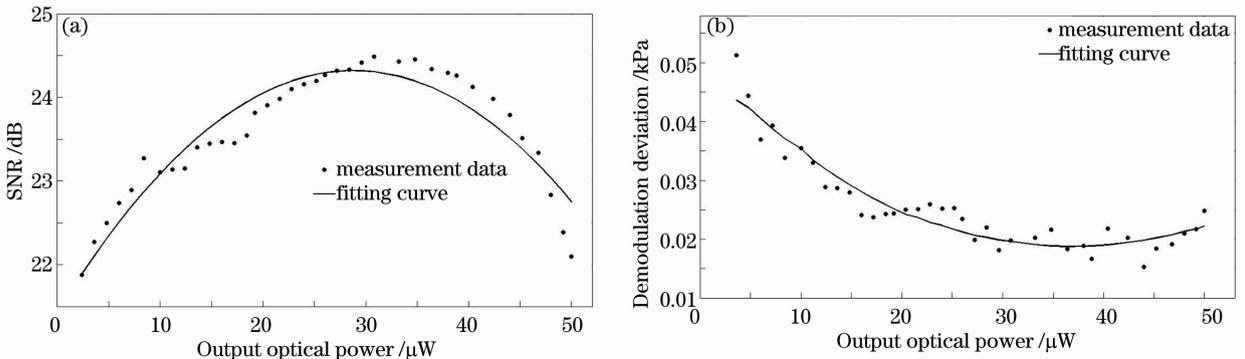


图 6 (a)信噪比随光功率的变化;(b)解调误差随光功率的变化

Fig. 6 (a) SNR varies with the optical power; (b) demodulation error varies with the optical power

可知压力解调误差随光源光功率增大而减小,当光功率增大到 $34\sim 38\ \mu\text{W}$ 之间时,压力解调误差小于 $\pm 0.02\ \text{kPa}$,继续增大光功率,由于信号饱和和失真逐渐严重,解调误差逐渐增大。

3.2 光谱中心波长变化对解调精度的影响

实验中,将 F-P 压力传感器置于压力容器中保持压力 $103.75\ \text{kPa}$ 不变,并保持驱动电流不变,将 LED 光源放入温控箱,通过改变温度实现波长调节。温控箱控温温度为 $-20\ ^\circ\text{C}\sim 90\ ^\circ\text{C}$,温控步距为 $10\ ^\circ\text{C}$ 。当温控箱内温度稳定后,每间隔 $2\ \text{s}$ 记录一帧数据,采集 $100\ \text{frame}$ 数据取平均作为压力解调结果的真值,并同步记录 LED 光源光谱。

图 7(a)显示了在 $-16.3\ ^\circ\text{C}\sim 90.6\ ^\circ\text{C}$ 之间光源光谱随温度的变化;图 7(b)显示了当温度由 $-16.3\ ^\circ\text{C}$ 升到 $90.6\ ^\circ\text{C}$ 时,光源中心波长由 $437.26\ \text{nm}$ 变化到 $444.58\ \text{nm}$,产生了 $7.26\ \text{nm}$ 的红移,光谱中心波长漂移响应与温度基本符合线性关系;图 7(c)显示了光谱

带宽随温度的变化,当温度升高时,光谱带宽变大, $90.6\ ^\circ\text{C}$ 时的光谱带宽为 $23.78\ \text{nm}$,比 $-16.3\ ^\circ\text{C}$ 时的光谱宽度增加 $4.43\ \text{nm}$,光谱带宽与温度符合二次函数关系;图 7(d)为相应的压力解调结果,可知中心波长 $7.26\ \text{nm}$ 的变化使低相干干涉绝对相位改变了 $0.447\ \text{rad}$,产生 $0.323\ \text{kPa}$ 的压力解调误差,压力解调值与光谱中心波长呈二次曲线分布,与图 4 的理论分析基本一致。图 7 中仿真曲线与实验拟合曲线趋势一致,但它们之间还存在明显差异,这可能是由于实际系统中光束不是垂直入射到光楔,而模型为简化分析采用了垂直入射条件所致。在 $140\ \text{kPa}$ 范围内要保持 0.1% 的精度^[13],则压力误差要小于 $140\ \text{Pa}$ 。如果误差仅由光源波长解调引起,对于光谱中心波长为 $438.44\ \text{nm}$ 的光源,波动要小于 $1.79\ \text{nm}$,光源工作温度波动要小于 $26.9\ ^\circ\text{C}$,通过控温是比较容易做到的。

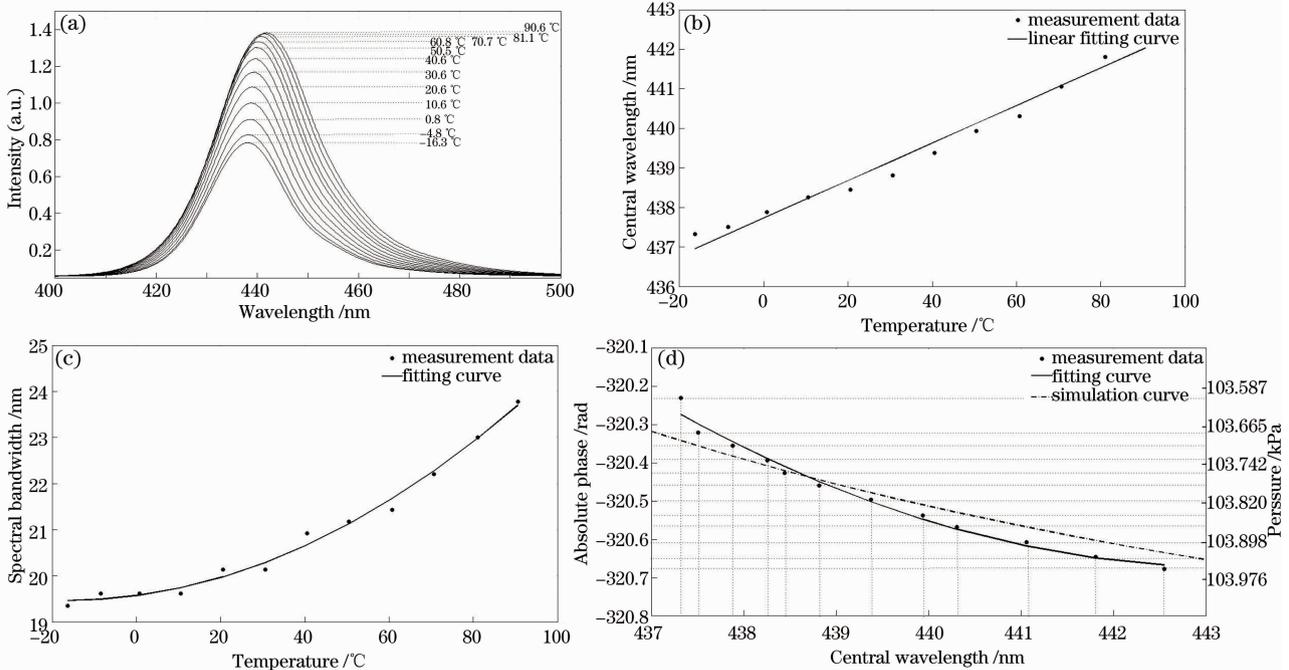


图 7 (a)不同温度下的光谱;(b)光源中心波长随温度的变化;(c)光源光谱带宽随温度变化;(d)相位和压力解调值随光源中心波长的变化

Fig. 7 (a) Spectra under different temperatures; (b) variation of central wavelength with temperature; (c) variation of spectral bandwidth with temperature; (d) variation of phase and pressure demodulation result with central wavelength

4 结 论

结合恢复单色频率绝对相位算法,探讨了空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 LED 光源对解调精度的影响。建立了相位解调数学模型并进

行了分析,分析结果表明相位解调值与 LED 光源中心波长成二次函数关系。通过改变驱动电流和温度控制进行了实验,实验结果表明,LED 光源输出光功率在一定范围时,低相干干涉信号信噪比较大,压力

解调误差较小,且压力解调值的误差大小与光源输出光功率有关;LED光源在温度由 $-16.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $90.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过程中光谱发生红移,使绝对相位发生了改变,压力解调值产生误差,压力解调值与光源光谱中心波长满足二次函数关系,与理论分析一致。在高精度解调中主要考虑光源的中心波长漂移控制,在 140 kPa 范围保证 0.1% 的解调误差时,光源光谱中心波长波动要小于 1.79 nm 。

参 考 文 献

- 1 Xu Fuguo, Rao Yunjiang, Ran Zengling, *et al.*. Optical fiber Fabry-Perot strain sensor fabricated by using laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2202–2207.
徐富国, 饶云江, 冉曾令, 等. 激光微加工的光纤法布里-珀罗应变传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2202–2207.
- 2 Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometry [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1413–1420.
江毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1413–1420.
- 3 Chen S, Rogers A J, Meggitt B T. Electronically scanned optical-fiber Young's white-light interferometer [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(10): 761–763.
- 4 Dändliker R, Zimmerman E, Frosio G. Electronically scanned white-light interferometry: a novel noise-resistant signal processing [J]. *Opt Lett*, 1992, 17(9): 679–681.
- 5 Belleville C, Duplain G. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(1): 78–80.
- 6 Marshall R H, Ning Y N, Jiang X, *et al.*. A novel electronically scanned white-light interferometer using a Mach-Zehnder approach [J]. *J Lightwave Technol*, 1996, 14(3): 397–402.
- 7 Zhao Yan, Wang Daihua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106007.
赵艳, 王代华. 用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0106007.
- 8 Li Lei, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.*. Birefringent wedges effects on cross-correlation polarization demodulation in optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2012, 23(1): 67–73.
李磊, 刘铁根, 江俊峰, 等. 光纤 F-P 传感器偏振互相关解调中光楔参数的影响研究[J]. *光电子•激光*, 2012, 23(1): 67–73.
- 9 Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, *et al.*. Mathematical model of illumination of CCD in the space scanning optical fiber F-P sensor demodulation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1128006.
孟祥娥, 江俊峰, 刘铁根, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1128006.
- 10 Jiang J, Wang S, Liu T, *et al.*. A polarized low-coherence interferometry demodulation algorithm by recovering the absolute phase of a selected monochromatic frequency [J]. *Opt Express*, 2012, 20(16): 18117–18126.
- 11 Petersen K, Pourahmadi F, Brown J, *et al.*. Resonant beam pressure sensor fabricated with silicon fusion bonding [C]. 1991 International Conference on IEEE, 1991: 664–667.
- 12 Chen Chao, Xia Mingfei, Yang Hongru, *et al.*. Affect of power spectrum of source on white-light interference measurement [J]. *Optical Technology*, 2011, 32(5): 1032–1036.
陈超, 夏明飞, 杨鸿儒, 等. InGaN 基白光 LED 光谱特征和结温相关性研究[J]. *应用光学*, 2011, 32(5): 1032–1036.
- 13 He G, Zheng L. A model for LED spectra at different drive currents [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(11): 1090–1094.
- 14 Ding Tianping, Guo Weiling, Cui Bifeng, *et al.*. The effect of temperature on the PL spectra of high power LED [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1450–1453.
丁天平, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 温度对功率 LED 光谱特性的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1450–1453.
- 15 Chang C C, Sirkis J S. Absolute phase measurement with extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors [C]. SPIE, 1996, 2839: 111–121.
- 16 Liu T, Fernando G F. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Perot sensor system for strain and displacement measurements [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(3): 1275–1278.
- 17 Hodgman C D, Lind S C. Handbook of chemistry and physics [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1949, 53(7): 1139–1139.

栏目编辑: 张 腾