

基于LED调制和光纤阵列的多通道光纤 法布里-珀罗传感解调系统研究

江俊峰 秦尊琪 王 双* 刘铁根 刘 琨 尹金德 邹盛亮 石俊锋 曹 潇

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 光纤传感研究所, 天津, 300072

摘要 提出了一种基于发光二极管(LED)脉冲调制和光纤阵列的多通道光纤法布里-珀罗(F-P)压力传感解调系统。在建立的多通道光程差分布理论模型基础上,通过采用光纤阵列实现了多通道并行光路的复用,并采用LED脉冲调制的方法实现了多个通道的切换,该方法能够有效地抑制耗尽层(PN结)温度升高,减小因PN结温度升高对解调的影响。实验研究了LED脉冲调制的占空比和频率的影响,表明在占空比低于60%、调制频率大于35 Hz时具有最优的解调效果。采用脉冲调制频率为50 Hz、占空比为12.5%的8通道解调系统实验表明,各通道解调一致性很好,并且在全量程范围(F.S.)所有通道的误差均在0.045%以内。

关键词 光纤光学;多通道复用;光纤法布里-珀罗压力传感;LED调制;空间扫描

中图分类号 TN212 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0606001

Research on Multi-Channel Optical Fiber Fabry-Perot Sensing Demodulation System Based on LED Modulation and Optical Fiber Array

Jiang Junfeng Qin Zunqi Wang Shuang Liu Tiegeng Liu Kun

Yin Jinde Zou Shengliang Shi Junfeng Cao Xiao

College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Ministry of Education, Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Tianjin University, 300072

Abstract A multi-channel optical fiber Fabry-Perot (F-P) sensing demodulation system based on light emitting diode (LED) pulse demodulation and optical fiber array is proposed. Based on multi-channel optical path difference distribution theory model, multi-channel parallel light path is realized with optical fiber array and LED pulse demodulation is used for channel switching, which alleviates the temperature rising of positive-negative (PN) junction and the influence of the PN's rising temperature on demodulation. The experiments investigate the effects of pulse duty cycle and modulation frequency. The results show that the demodulation can be in good performance when duty cycle is less than 60% and the modulation frequency is higher than 35 Hz. Using pulse modulation with 50 Hz and 12.5% duty cycle, the experiment results show that the 8-channel system has good channel consistency, and the modulation precisions of all 8 channels are less than 0.045% in full scale(F.S.).

Key words fiber optics; multi-channel multiplexing; fiber Fabry-Perot pressure sensor; LED modulation; spatial scanning

OCIS codes 060.2310; 060.4253; 060.2370; 230.3670; 330.6100

收稿日期: 2014-12-30; 收到修改稿日期: 2015-02-02

基金项目: 国家973计划(2010CB327802)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、国家自然科学基金(61227011, 61378043, 61475114, 11004150, 61108070)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、深圳市科技创新委项目(JCYJ20120831153904083)

作者简介: 江俊峰(1977-),男,博士,教授,主要从事光纤传感、光纤相干及斯托克斯拉曼散射生物成像、光微流体生物传感、光电检测等方向研究。E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: sarahwang02166@gmail.com

1 引 言

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰能力强等优点,是目前获得广泛应用的光纤传感器之一,在桥梁结构、航空航天等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。但相比其他类型光纤传感器,光纤F-P传感器复用难度较大。目前提出的复用方法主要是频分复用^[4]和相干复用^[5-6],但均要求光纤F-P传感器具有不同的F-P腔长,这使得光纤F-P传感器制作过程复杂化且难以批量化制作。频分复用通常要求较长的F-P腔长,这降低了干涉信号的信噪比。相干复用通过时域机械扫描或空间扫描实现光程差扫描,从而使光程差匹配获得F-P腔长。采用机械扫描的相干复用具有较强的复用能力,但测量速度和精度低,采用空间扫描的相干复用正好与之相反。

为了能够适应批量生产、参数相同的光纤F-P传感器复用要求,2013年本课题组提出基于不同中心波长LED的空间扫描型光纤F-P压力传感波分复用方法^[7],取得了较好的复用效果,但可复用的通道数量受到市面上可获得的LED光谱限制。同年李丽慧等^[8]通过电机带动通光挡板旋转依次切断光通路的方式实现了8通道空间扫描型光纤F-P压力传感复用,但空间多纤耦合光路结构光损耗大,且其中的机械运动部件易导致可靠性问题。

本文提出了一种采用LED脉冲调制和光纤阵列实现时分复用的空间扫描型多通道光纤F-P压力传感解调系统。分析了不同通道的扫描光程差分布及其对解调的影响,实验研究了LED脉冲调制参数对LED温升及解调的影响,并实现了8通道复用,在脉冲调制频率为50 Hz、调制占空比为12.5%时,在全量程范围(F.S.)内8通道的解调误差均小于0.045%。

2 理论分析

2.1 多通道空间扫描型光纤F-P传感解调系统

图1为多通道空间扫描型光纤F-P传感解调系统结构示意图。多个LED光源在脉冲信号控制下,依次输出光,再经过50:50多模耦合器分别入射到对应的F-P传感器中,在传感器两个端面反射的两束光产生2倍F-P腔长的光程差后形成干涉。干涉信号再次经过耦合器进入光纤阵列,从光纤阵列不同位置射出,出射光经柱面镜整形,将沿水平方向会聚成线型光带,通过起偏器产生线偏振光,然后入射到双折射光楔中。起偏器起偏方向与双折射光楔光轴方向夹角为45°,产生强度相同的o光和e光,o光与e光之间的光程差由所通过双折射光楔的厚度和双折射率差决定,从而形成沿双折射光楔长度方向的光程差空间扫描。经过检偏器之后,o光和e光在线阵CCD上产生低相干干涉条纹。线阵CCD将光信号转化为电信号输出,最后在解调处理单元中通过恢复单色频率绝对相位解调算法提取低相干干涉条纹的绝对相位实现解调。

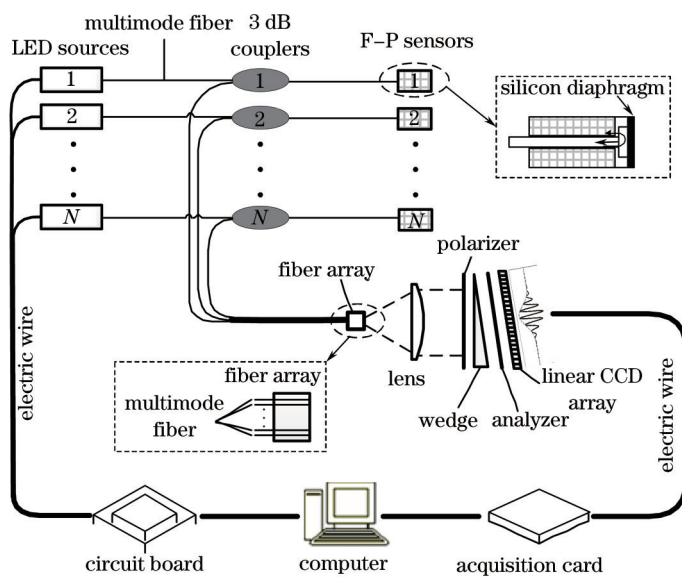


图1 多通道光纤F-P解调系统原理图

Fig.1 Principle of multi-channel optical fiber F-P demodulation device

2.2 LED 调制和光纤阵列对多通道解调的影响

系统中采用恢复单色频率绝对相位解调算法对采集到的信号进行解调,绝对相位与中心波长呈二次函数关系,中心波长的变化会引起绝对相位计算误差^[9]。在 220 kPa 压力测量范围内保证 F.S. 的 0.1% 误差需要中心波长漂移量小于 2.323 nm。LED 发光光谱主要由 PN 结温度及禁带宽度决定,而禁带宽度也受 PN 结温度影响^[10-13],所以 PN 结温度是决定 LED 发光光谱的主要因素。根据文献[14],采用方波脉冲调制的 LED 的 PN 结温度可表示为

$$T_j = R_{j-c} \cdot \eta V_{f_{\max}} \cdot D \cdot I_{f_{\max}} \cdot t, \quad (1)$$

式中 R_{j-c} 为 LED 的电热阻抗, η 为 LED 工作时的发热率, $V_{f_{\max}}$ 为调制脉冲的电压幅值, $I_{f_{\max}}$ 为电流幅值, D 为占空比, t 为调制脉冲周期。在外界环境温度稳定的条件下,PN 结温度可通过占空比和调制频率调节。

系统中采用光纤阵列来实现多通道复用,不同光纤位置导致不同通道具有不同的扫描光程差分布。图 2 为其中 1 个通道的光线传播示意图,光从光纤出射之后,以一定的发散角 2φ 入射到双折射光楔表面, θ 为双折射光楔楔角。AB、AC 分别为光在双折射光楔上的入射面和出射面,线阵 CCD 紧贴在出射面 AC 上。 S_1 、 S_2 为对应于 P 点从光纤端面出射的 o 光和 e 光光路, S_1 、 S_2 与 Y 轴的夹角分别为 φ_1 和 φ_2 , 两束光线入射到双折射光楔时的交点分别为点 Q_1 和 Q_2 , $\overline{Q_1J}$ 为光 S_2 沿 AB 方向相对于光 S_1 的侧向位移, $\overline{Q_1P}$ 和 $\overline{Q_2P}$ 分别表示 o 光和 e 光在双折射光楔中的传播路径。因此 S_1 、 S_2 通过双折射光楔之后在 P 点处的光程差 Δ_p 为

$$\Delta_p = n_e \cdot |\overline{Q_2P}| - n_o \cdot |\overline{Q_1P}| + n_i \cdot |\overline{Q_2J}|, \quad (2)$$

式中 n_o 、 n_e 分别为双折射光楔中 o 光和 e 光的折射率, n_i 为光在空气中折射率。

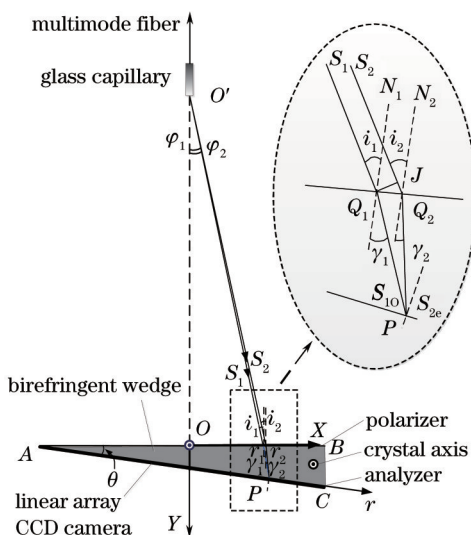


图 2 光线传播示意图

Fig.2 Schematic diagram of light propagation

设 r 为 P 点沿 AC 方向上与双折射光楔端点 A 的距离,代表 CCD 像素位置, q_1 、 q_2 分别为点 Q_1 、 Q_2 沿着 AB 方向上距离端点 A 的距离。设 $|\overline{AB}| = 2L$, 光纤出射点 O' 与坐标原点的距离为 z_0 , 则有 $\overline{AO'} = (L, -z_0)$, $\overline{O'Q_1} = (q_1 - L, z_0)$, $\overline{Q_1P} = (r \cdot \cos \theta - q_1, r \cdot \sin \theta)$, 入射面 AB 的法向量表示为 $\vec{n} = (0, 1)$ 。向量 $\overline{O'Q_1}$ 与 \vec{n} 的夹角即为入射角 i_1 , 向量 $\overline{Q_1P}$ 与 \vec{n} 的夹角为折射角 γ_1 , 根据向量夹角公式及三角函数公式得到 $\sin i_1 = \frac{q_1 - L}{\sqrt{(q_1 - L)^2 + z_0^2}}$

和 $\sin \gamma_1 = \frac{r \cdot \cos \theta - q_1}{\sqrt{r^2 q_1^2 - 2rq_1 \cdot \cos \theta}}$, 将其代入折射定律公式中,可以得到 r 与 q_1 的关系:

$$\frac{n_i(q_1 - L)}{\sqrt{(q_1 - L)^2 + z_0^2}} = \frac{n_o(r \cdot \cos \theta - q_1)}{\sqrt{r^2 + q_1^2 - 2rq_1 \cdot \cos \theta}}. \quad (3)$$

同理可以得到 r 与 q_2 的关系:

$$\frac{n_i(q_2 - L)}{\sqrt{(q_2 - L)^2 + z_0^2}} = \frac{n_e(r \cdot \cos \theta - q_2)}{\sqrt{r^2 + q_2^2 - 2rq_2 \cdot \cos \theta}} \quad (4)$$

联立(3)、(4)式可求出 q_1 、 q_2 ，再代入(2)式中即可得出光程差 Δ_p 与 r 的关系。

系统中采用的双折射光楔参数 $n_o = 1.38208$ ， $n_e = 1.39408$ ，楔角为 10° ，楔长 $2L = 30$ mm。单排8通道的多模光纤阵列不同通道间光的出射位置间距为 $125 \mu\text{m}$ ，选用的线阵 CCD 像素间距为 $7 \mu\text{m}$ 。根据上述理论及系统参数进行仿真，仿真中 r 的取值范围为(0 mm, 30.4628 mm)，如图3所示。为了体现不同通道间光程差分布差异，图3中纵坐标采用相对光程差 $\Delta_{p-R} = \Delta_{p-N} - \Delta_{p-1}$ 来表示，其中 Δ_{p-N} 为通道 N 的光程差分布， Δ_{p-1} 为通道1的光程差分布。

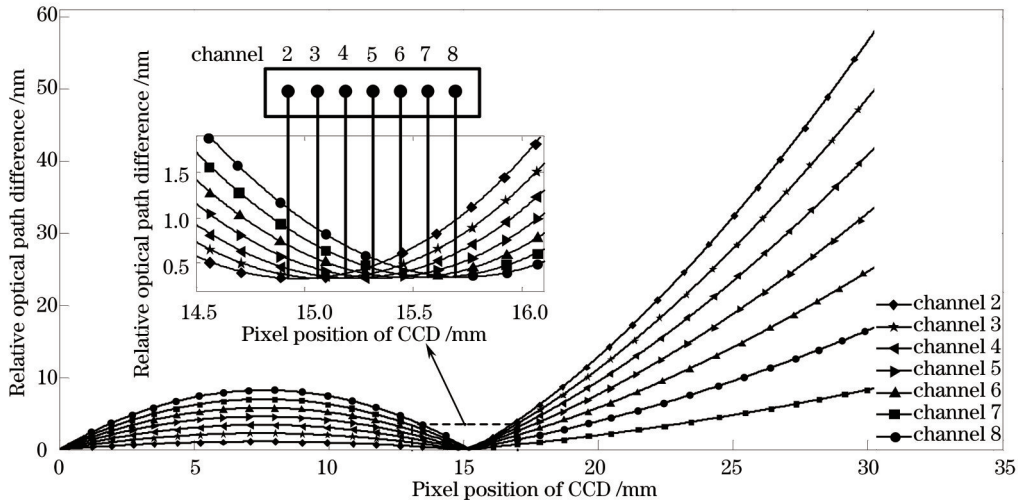


图3 通道2~7相对通道1的光程差分布仿真图

Fig.3 Distribution simulation diagram of relative optical path difference of channel 2 to 7 relative to channel 1

图3表明各个通道的光程差分布趋势基本一致，但由于各个通道间光的出射位置存在 $125 \mu\text{m}$ 的间距，光程差分布会产生 0.1457 mm 的偏移，导致相邻通道的干涉条纹中心位置在 CCD 上存在约 21 pixel 偏移量 p_o 。各个通道分时复用，因此相互之间不存在干扰，因此可以针对每个通道进行单独标定，完全消除干涉信号位置偏移产生的误差。由于每个通道均需要获取完整的干涉条纹，通道间存在偏移，因此允许的通道数会受到 CCD 像素数限制，允许的通道数 $C = (P_L/2 - R_n/2 - S_w)/p_o$ ，其中 S_w 为干涉条纹宽度、 R_n 为全压力范围内信号移动范围、 P_L 为 CCD 有效像素数。在同样的仿真参数下，理论允许的最大通道数为 38。

3 实验结果及分析

实验系统如图1所示，将蓝光 LED 耦合进多模光纤中，其光谱为近高斯分布，室温下中心波长为 $\lambda = 436.836$ nm。线阵 CCD 像素总数为 3000。采用铂电阻采集 LED 结温，并使用光谱仪采集光源光谱。进行实验的 F-P 压力传感器放置于压力容器中，采用高精度气压源施加压力，压力控制精度为 0.01 kPa，光源与压力容器均放置在温控箱内，实验中将温控箱温度保持到 25°C 。

3.1 LED 参数随调制脉冲占空比和调制频率的变化

实验中 LED 驱动脉冲调制频率为 50 Hz，脉冲调制占空比以 10% 的步长从 10% 增加到 90% ，待 PN 结温度稳定后，采集记录此时 LED 结温和光谱。图4为 LED 参数随调制脉冲占空比的变化，图4(a)显示 PN 结温度随着占空比的增大，温度也呈线性升高，趋势与理论分析一致。在占空比为 10% 时，PN 结温度升高了 2.35°C ，而在 90% 占空比时，PN 结温度则升高了 20.34°C 。图4(b)显示随着占空比增大，光谱中心波长向长波长方向漂移。占空比从 10% 到 90% 时，中心波长漂移量从 0.494 nm 增加到 2.858 nm。考虑到需要保证 F.S. 的 0.1% 误差范围，则占空比需要小于 60% 。

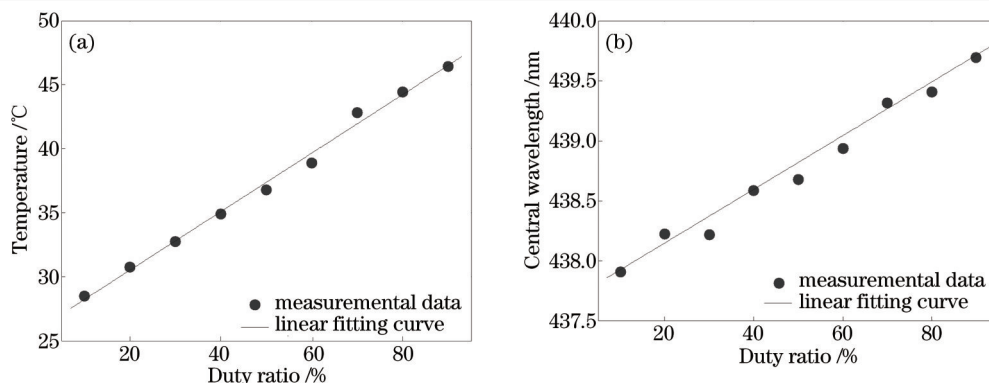


图4 LED参数随调制脉冲占空比的变化。(a) PN结温度升高响应;(b) LED中心波长漂移响应

Fig.4 LED parameters vary with the duty ratio of the pulse frequency modulation changing.

(a) Temperature response of PN junction; (b) central wavelength drift response of LED

在分析LED调制脉冲的频率影响时,固定占空比为50%。为了保证CCD输出信号具有较高的信噪比,调制频率以10 Hz为步长从5 Hz增加到105 Hz,待PN结温度稳定后,采集记录LED参数。图5为LED参数随调制频率的变化趋势。图5(a)显示PN结温度随着频率的升高呈线性下降趋势,与理论分析一致。图5(b)显示在占空比不变时,提高调制频率可以有效抑制中心波长漂移,并且随着调制频率的升高,LED中心波长趋于稳定,在35 Hz~105 Hz范围内,LED中心波长漂移量稳定在1.504 nm以内。综合以上分析,调制频率应大于35 Hz。

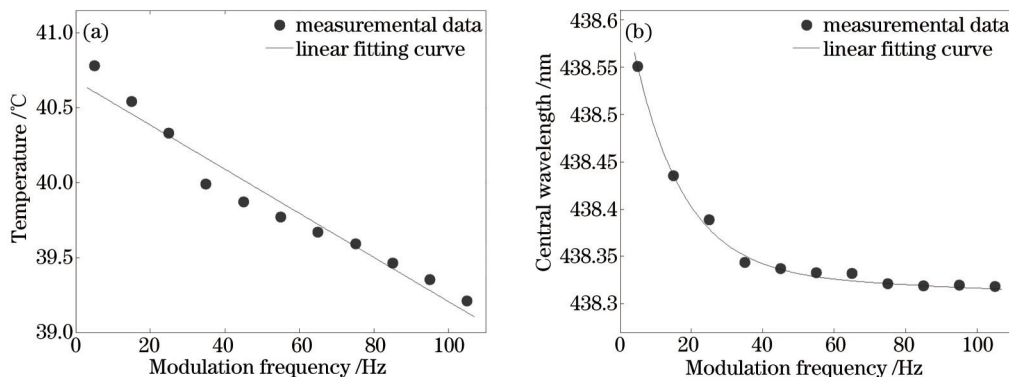


图5 LED参数随调制脉冲频率的变化。(a) PN结温度升高响应;(b) LED中心波长漂移响应

Fig.5 LED parameters vary with the pulse frequency modulation changing.

(a) Temperature response of PN junction; (b) central wavelength drift response of LED

为了验证脉冲调制方法对系统解调的影响,根据图2搭建了8通道解调系统,采用占空比为12.5%,频率以10 Hz为步长从5 Hz增加到105 Hz的脉冲信号进行实验,将传感器放在25°C、100 kPa的恒温恒压条件下,针对同一个通道进行信号采集。从图6中可以反映出,随着调制频率的增加,解调相位误差越来越小,这说明脉冲调制方式有效抑制了LED波长漂移。

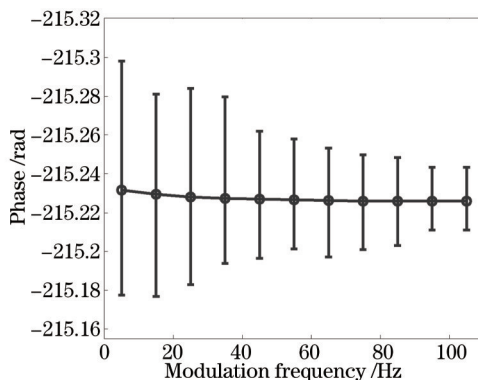


图6 不同频率下100帧数据的误差

Fig.6 Errors of 100 frame of data in different frequencies

3.2 8通道解调系统实验

实验中采用50 Hz、占空比为12.5%的调制频率,用同一只传感器在同样的压强条件下(从20 kPa到240 kPa,步长为5 kPa)对8个通道进行标定测量。图7为系统中通道1、通道4、通道8在100 kPa下采集到的信号原始图形,干涉条纹处于帧扫描数据中间,信号质量较高。此时,8个通道的信噪比(SNR)详见表1所示,所有通道信噪比^[15]均在26 dB以上。

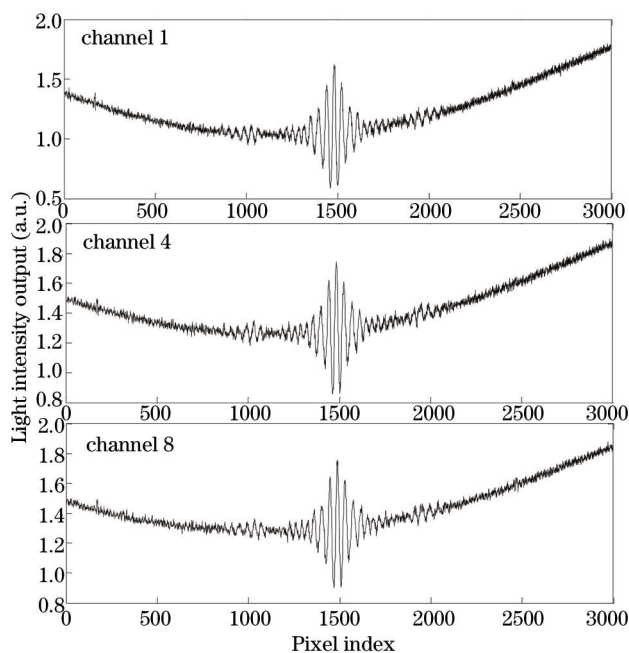


图7 通道1、通道4、通道8的原始信号图形

Fig.7 Original signal waveforms of channel 1, 4 and 8

表1 传感器处于100 kPa压力下各通道信噪比及误差参数

Table 1 SNR and the errors of all channels when the sensor is under the pressure of 100 kPa

Channel	Maximum error /kPa	Full scale error	SNR /dB
1	0.098	0.044%	27.3
2	0.096	0.043%	26.8
3	0.098	0.045%	27.1
4	0.095	0.043%	27.5
5	0.069	0.031%	27.0
6	0.072	0.033%	26.9
7	0.087	0.040%	27.1
8	0.090	0.041%	26.9

图8(a)为系统中8个通道的压力-相位拟合曲线,其中每一个通道数据均为50 frame数据的平均处理结果,图中显示经过标定以后各通道结果基本一致且线性度很好,各个通道的相位解调误差均小于0.53 rad。图8(b)为通道2~8相对于通道1的相对相位拟合曲线,由于在220 kPa压力范围内需要光楔中匹配光程差范围较小,因此主要对应理论仿真CCD探测位置的中间部分。可以看到实验中不同通道间在CCD上存在位置偏移,与理论仿真曲线中间部分偏移趋势基本一致。但是同理论仿真还存在较大差别,这可能是由于实际系统中光纤阵列、光楔、线阵CCD等器件摆放位置不够精确,使得与理想仿真参数存在一定差别。

图9为通道1~8经过标定之后的压力误差曲线。从图中可以看出,所有通道各压力点下的误差均保持在0.1 kPa以内,即误差稳定在F.S.的0.045%以内。从而可以说明该系统各个通道的解调效果一致。

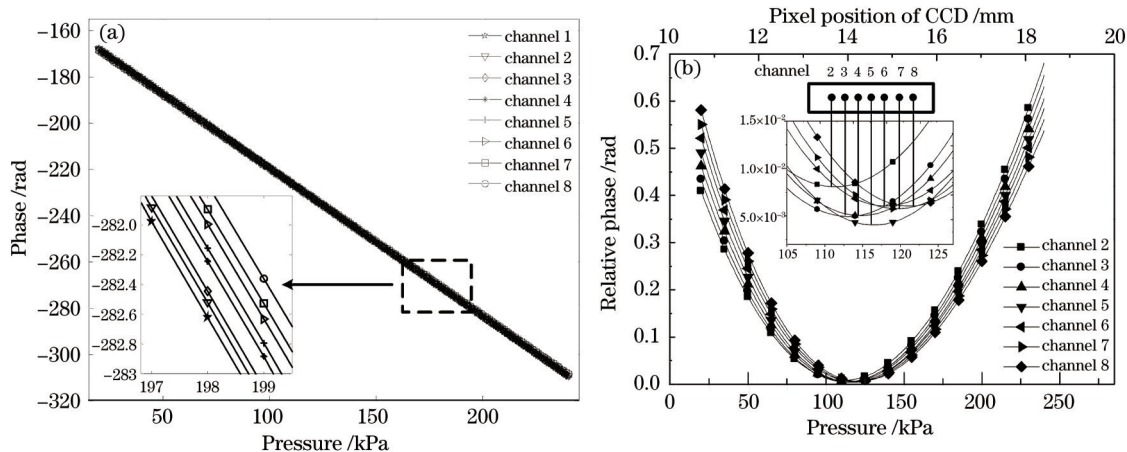


图8 系统中8个通道压力与相位拟合曲线

Fig.8 Pressure-phase fitting curves of eight-channel system

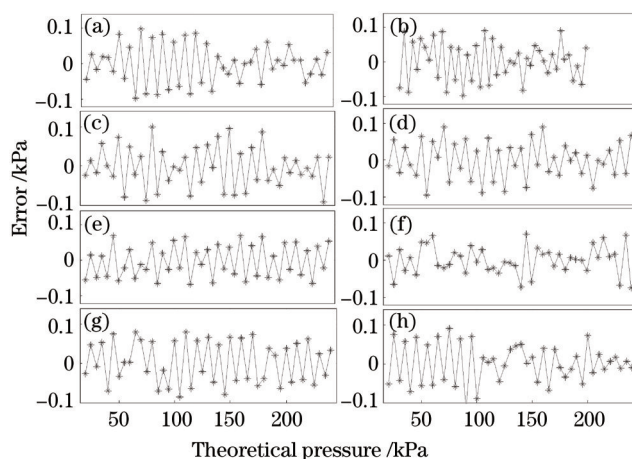


图9 通道1~8的误差曲线

Fig.9 Error curves of eight channels

4 结 论

提出了基于LED脉冲调制的多通道光纤阵列解调系统,建立理论模型分析了不同通道光程差分布对解调的影响,并通过实验验证表明单独标定可以消除影响。通过理论、实验分析了LED脉冲调制的占空比和频率对中心波长的影响。实验结果表明在外界环境温度稳定的情况下提高调制频率、降低占空比可以显著降低中心波长漂移,调制频率需要大于35 Hz、占空比小于60%为宜。在采用脉冲调制频率为50 Hz、占空比为12.5%的8通道系统中,各个通道在220 kPa范围内误差稳定在F.S的0.045%以内,且一致性较好。不过仍需对该系统进行更深入的研究,通过改善硬件电路性能对LED进行精确脉冲调控,进一步提高系统解调精度及稳定性。

参 考 文 献

- 1 Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometer[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.
- 2 Li Lei, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, et al.. Birefringent wedges effects on cross-correlation polarization demodulation in optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(1): 67-73.
李磊, 刘铁根, 江俊峰, 等. 光纤FP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.
- 3 Zhu Jiali, Wang Ming, Cai Dongyan, et al.. A fiber Fabry-Perot micro pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0428002.
朱佳利, 王鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里珀罗微压传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0428002.
- 4 Yi Jiang. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors

- [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(2): 75-77.
- 5 Wang Jianjun, Dong Bo, Evan Lally, *et al.*. Multiplexed high temperature sensing with sapphire fiber air gap-based extrinsic Fabry-Perot interferometers[J]. Opt Lett, 2010, 35(5): 619-621.
- 6 Yuan Yonggui, Wu Bing, Yang Jun, *et al.*. Tunable optical-path correlator for distributed strain or temperature-sensing application[J]. Opt Lett, 2010, 35(20): 3357-3359.
- 7 Yin Jinde, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.*. Wavelength-division-multiplexing method of polarized low-coherence interferometry for fiber Fabry-Perot interferometric sensors[J]. Opt Lett, 2013, 38(19): 3751-3753.
- 8 Li Lihui, Zhu Yong, Wang Ning, *et al.*. Analysis and experimental study on multi-channel optical fiber Fabry-Perot demodulation system[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(9): 1039-1045.
李丽慧, 朱永, 王宁, 等. 多通道光纤法-珀解调系统分析与实验[J]. 光子学报, 2013, 42(9): 1039-1045.
- 9 Jiang Junfeng, Wu Fan, Liu Tiegeng, *et al.*. Research on LED effect in spatial scanning optical fiber Fabry-Perot sensing demodulation system[J]. Acat Optica Sinica, 2014, 34(2): 0223002.
江俊峰, 吴凡, 刘铁根, 等. 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[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0223002.
- 10 Wang Jencheng, Fang Chiahui, Wu Yafen, *et al.*. The effect of junction temperature on the optoelectrical properties of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes[J]. Journal of Luminescence, 2012, 132(2): 429-433.
- 11 Chen Weimin, Wang Ning, Zhu Yong, *et al.*. Experimental study on the affection of gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(1): 88-92.
陈伟民, 王宁, 朱永, 等. 实际光源光谱分布对相位型光纤法-珀应变传感器的影响及其实验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(1): 88-92.
- 12 Wen Jing, Wen Yumei, Li Ping, *et al.*. Dominant factor impacting the photoluminescence and electroluminescence spectra in AlInGaP LEDs[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(5): 659-663.
文静, 文玉梅, 李平, 等. 影响 AlInGaP LED 光致发光与电致发光谱的决定性因素[J]. 光电子·激光, 2010, 21(5): 659-663.
- 13 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.
- 14 Loo K H, Lai Y M, Tan S C, *et al.*. On the color stability of phosphor-converted white LEDs under DC, PWM, and bilevel drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 974-984.
- 15 Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, *et al.*. Mathematical model of illumination of CCD in the space scanning optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system[J]. Acat 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.

栏目编辑: 王晓琰