

光纤法布里-珀罗传感解调中信号非线性失真的影响研究

曹潇 王双* 刘琨 刘铁根 邹盛亮 石俊锋

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

摘要 研究了光纤法布里-珀罗(F-P)传感解调中 CCD 非线性失真及其对解调的影响。测试 CCD 响应特性并建立拟合模型, 仿真分析了不同噪声下的非线性失真影响。结果显示解调出的绝对相位标准差随着非线性失真率的增大而逐渐增大; 且随着噪声增加, 产生解调干涉级次跳变的非线性失真率减小。利用搭建的光纤 F-P 压力传感系统研究了信号非线性失真的影响。实验结果表明固定压力下的非线性失真率随着光功率的增加而增加, 非线性失真率大于 26.3% 后会出现解调干涉级次跳变, 实验与仿真结果一致。非线性失真率在 0.3%~22.3% 范围内的满量程压力解调结果显示, 随着非线性失真率的增大, 解调精度逐渐降低。非线性失真率为 22.3% 时解调最大误差为 0.215 kPa, 相比非线性失真率为 0.3% 时增大了 1.24 倍。要保证满量程范围内解调精度优于 0.04%, 非线性失真率应小于 6.7%。

关键词 探测器; 光纤法布里-珀罗传感器; 非线性失真; 解调精度

中图分类号 TN29 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.040402

Research on Nonlinear Distortion Effect in the Space Scanning Optical Fiber Fabry-Perot Sensor Demodulation System

Cao Xiao Wang Shuang Liu Kun Liu Tiegen Zou Shengliang Shi Junfeng

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of the Ministry of Education, Institute of Optical Fiber Sensing, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract For the space scanning optical fiber Fabry-Perot (F-P) sensor demodulation system, the nonlinear distortion of CCD and its influence on absolute phase demodulation are investigated. The CCD response characteristic is measured and a fitting model is built. Then, the influence of nonlinear distortion under different standard deviation of noise is simulated. The simulation results show that the standard deviation of the demodulated absolute phase increases with the increase of the nonlinear distortion rate. Meanwhile, interference order jump error resulting from the nonlinear distortion rate decreases with the increase of noise. The influence of nonlinear distortion is studied based on the optical fiber F-P pressure sensor demodulation system. The experimental results show that the nonlinear distortion rate under a fixed pressure increases with the optical power, and the interference order jump error appears when the nonlinear distortion rate is larger than 26.3%, which agrees with the simulation results. In addition, the demodulation accuracy decreases with the increase of the nonlinear distortion rate when the nonlinear distortion rate of fiber F-P full pressure sensing demodulation ranges from 0.3% to 22.3%. The demodulation error is 0.215 kPa when the nonlinear distortion rate is 22.3%, which has increased by 1.24 times as compared with that when the nonlinear distortion rate is 0.3%. In order to ensure the demodulation accuracy better than 0.04% in full scale, the nonlinear distortion rate should be controlled less than 6.7%.

Key words detectors; optical fiber Fabry-Perot sensor; nonlinear distortion; demodulation accuracy

OCIS codes 040.1520; 060.2370; 120.2230; 260.3160

收稿日期: 2015-11-06; 收到修改稿日期: 2015-11-12; 网络出版日期: 2016-03-29

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(61227011, 61378043, 61475114, 61505139)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200)、深圳市科技创新委员会(JCYJ20120831153904083)、光电信息技术教育部重点实验室开放基金(2014KFKT021)

作者简介: 曹潇(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤 F-P 传感解调方面的研究。E-mail: caoxiao69@126.com

导师简介: 刘铁根(1955—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: tgliu@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)传感器是研究最早并获得广泛应用的光纤传感器之一,具有体积小、重量轻、动态范围大和抗电磁干扰能力强等优点,在航空航天等领域有很好的应用前景^[1-6]。光纤F-P传感解调质量是光纤F-P传感应用的关键环节,研究人员提出了傅里叶变换法^[7]、双波长法^[8]和低相干干涉法^[9]等多种解调方法,其中低相干干涉法通过光程差扫描匹配能实现对光纤F-P腔长的绝对测量,因此受到广泛关注。基于低相干干涉的空间扫描型光纤F-P解调方法通过光楔实现光程差的空间扫描,并采用线阵CCD接收相应的低相干干涉信号,由于没有机械运动部件,所以具有稳定性好和可靠性高的优点,非常适合于恶劣环境下的现场应用。针对该类解调系统研究人员提出了多种方案,如Dändliker等^[10]利用Wollaston棱镜构成双折射光楔并研究了信号处理算法,Belleville等^[11]利用Fizeau干涉仪构成光楔,Marshall等^[12]利用马赫-曾德尔干涉仪构成虚拟光楔。在计算模型研究方面,赵艳等^[13]研究了光楔的互相关数学模型;本课题组前期研究了双折射光楔对光程差分布的影响^[14],CCD的光照度的数学模型^[15],LED光源输入光功率对信噪比(SNR)的影响^[16]和基于LED调制和光纤阵列的多通道解调系统^[17],并提出了恢复单色频率绝对相位算法^[18]。但在上述研究中,对CCD趋近于饱和后的非线性失真现象以及信号失真对解调结果的影响研究甚少。从建立的CCD光照度模型可知,系统光场强度分布的不均匀,将导致两边信号相对于中间信号过低,从而使CCD不同位置处信号信噪比不同。因此当面临较宽的光程差变化范围时,往往无法进行有效解调,不能充分利用系统的光程差分布范围,使测量范围受限。提高光功率可以使CCD两边的信号增强,但CCD中心光照度同样增加,当趋近饱和时,输出信号会出现非线性失真,反而会使解调精度降低,甚至失效。本文首先测取了CCD非线性响应特性,仿真研究了CCD非线性响应对解调的影响,然后利用搭建的光纤F-P压力传感系统实验研究了非线性失真对解调绝对相位的影响,研究结果显示在固定压力下非线性失真率大于26.3%后会出现解调干涉级次跳变,在满量程压力范围内非线性失真率大于6.7%之后会使压力解调误差显著增大,无法满足满量程解调精度优于0.04%的需求,研究对提高光纤F-P传感系统的测量范围,保证解调精度与稳定性具有重要意义。

2 理论分析

2.1 空间扫描型光纤F-P传感解调系统

光纤F-P传感解调系统通过光纤F-P传感器将待测物理量转变成F-P腔长,再利用解调模块提取低相干干涉信号并求取腔长信息,最终实现对外界参量的解调。其系统结构图如图1所示,主要包括LED光源、光纤F-P传感器、解调光路和数据采集处理模块4部分。LED光源输出的光通过耦合器入射到F-P传感器,经F-P腔2个端面反射后产生2束光且光程差为2倍F-P腔长。被F-P腔调制后的光信号再次经耦合器进入到解调光路,依次通过解调光路的起偏器、双折射晶体光楔和检偏器。当光楔产生的光程差与光纤F-P传感器腔长引起的光程差相匹配时,将产生低相干干涉条纹并被线阵CCD接收,然后经数据采集卡采集进入到处理单元中进行解调。

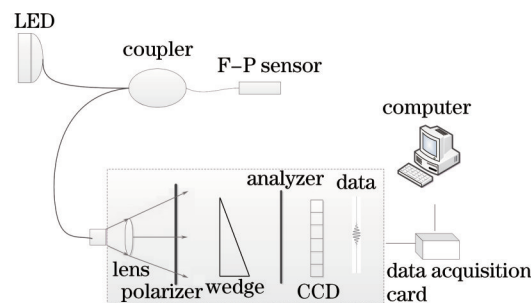


图1 空间扫描型光纤F-P传感解调系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of spatial scanning fiber F-P sensor demodulation system

2.2 CCD非线性响应特性及其对解调的影响

当设置曝光时间和光照射功率使CCD电荷在一定范围内时,CCD工作于线性区,其输出与光照度呈线性关系,但随着产生电荷增加,CCD将呈现出非线性^[19-22]。按照文献[19]的方法,测试了CCD的实际响应特

性。实验中 CCD 积分时间为 20 ms, 输出电压采用反向工作方式, 因此随光照度增大, CCD 输出电压会降低。图 2(a) 是 CCD 各像素点随光照度变化的输出电压值, 图 2(b) 分别为像素序列号 $n=1000$ 和 $n=2000$ 对应的响应特性曲线。以像素序列号 $n=1$ 的输出曲线作为参考, 在每个光照度下, CCD 其他各像素点输出电压相对像素序列号 $n=1$ 输出电压的差值均方差均小于 0.01 V, 像素点间一致性较好。

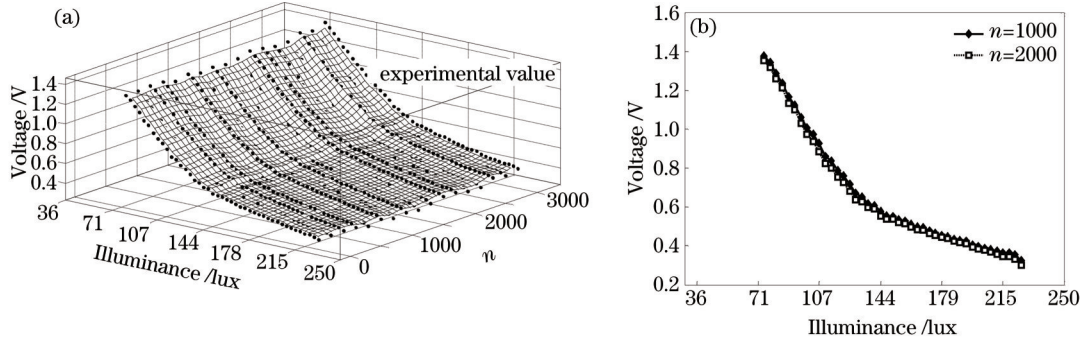


图 2 CCD 像素输出电压随光照度变化。(a) CCD 各像素点的测量结果; (b) CCD 像素序列号为 $n=1000$ 和 $n=2000$ 的测量结果

Fig.2 Dependence of output voltage of CCD pixel on illuminance. (a) Measurement results of each CCD pixel; (b) experimental results of CCD at pixel number $n=1000$ and $n=2000$

考虑到空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统的起偏器、检偏器以及光学器件表面反射等引起的光路损耗, 实验中通过测试直接建立 CCD 输出电压与输入光功率的关系, 测试结果如图 3 所示。可以看出, LED 光功率小于 $35 \mu\text{W}$ 时, CCD 响应的线性度较好。当光功率继续增大时, CCD 输出电压与 LED 光功率开始呈现明显的非线性关系。光功率小于 $35 \mu\text{W}$ 时, 对 CCD 响应特性曲线进行线性拟合, 在光功率大于 $35 \mu\text{W}$ 的区域内采用二次多项式拟合, CCD 的响应特性曲线可以表示为

$$\begin{cases} V_{\text{linear}} = C_1(I) = a_1 I + a_0, & I < 35 \mu\text{W} \\ V_{\text{nonlinear}} = C_2(I) = b_2 I^2 + b_1 I + b_0, & I \geq 35 \mu\text{W} \end{cases} \quad (1)$$

式中 V_{linear} 为线性区内实际输出电压值, $V_{\text{nonlinear}}$ 为非线性区内实际输出电压值(单位为 V), I 为入射光功率(单位为 μW), a_1 和 a_0 为线性拟合系数, b_2 、 b_1 、 b_0 为二次拟合系数。图 3 中各拟合系数 $a_0 = 2.3075$, $a_1 = -0.0443$, $b_0 = 2.4739$, $b_1 = -0.0658$, $b_2 = 0.0005$ 。因此在光功率大于 $35 \mu\text{W}$ 时, 理想情况下 CCD 不产生非线性失真的输出电压 V_i 为

$$V_i = a_1 I + a_0 = \frac{a_1 b_1 + a_1 \sqrt{b_1^2 - 4b_2(V_{\text{nonlinear}} - b_0)}}{2b_2} + a_0 \quad (2)$$

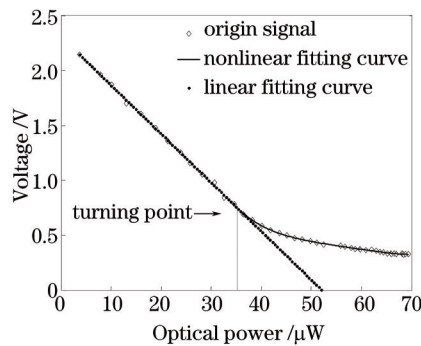


图 3 CCD 输出电压随 LED 光功率变化

Fig.3 Dependence of CCD output voltage on optical power

解调系统中所用 LED 光源可近似为高斯光谱, 干涉条纹信号 $I(x-x_0)$ 表示为^[18]

$$I(x-x_0) = \gamma \exp[-\alpha(x-x_0)^2] \cos[\beta(x-x_0)] \quad (3)$$

式中 α 、 β 和 γ 是与光路系统有关的常数, x 是干涉条纹在 CCD 上的位置, x_0 是零光程差位置对应的光楔中的坐标。经 CCD 转换后电压信号为 $V(x-x_0) = C(I)$, 其中 $I = I(x-x_0)$, $C(I)$ 是 CCD 的响应函数。在线性区时, $C(I) = C_1(I)$; 在非线性区时, $C(I) = C_2(I)$ 。采用恢复单色频率绝对相位法进行解调时, 首先需要对采集到的低相

于干涉信号进行傅里叶变换得到相位-频率曲线,选取 Ω 作为基准频率后对干涉条纹信号对应频段的相位进行相位展开和拟合,求得拟合直线的截距 T ;然后计算干涉级次 $n = \text{floor}(T/2\pi)$,其中 $\text{floor}()$ 为向下取整函数。将相对相位 $\phi(\Omega)$ 通过关系式 $\Phi = \phi(\Omega) - 2\pi n$ 转换成绝对相位 Φ ,即可实现对信号的解调。

然而,CCD非线性失真产生的信号畸变会影响干涉信号质量,进而影响解调精度。非线性畸变失真会造成干涉信号幅值降低且产生上下不对称现象,定义非线性失真率为

$$D = \frac{(V_h - V_b) - (V_b - V_l)}{V_{p-p}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 V_b 为干涉信号的中心基线电压值, V_h 和 V_l 分别为波峰电压和波谷电压值, V_{p-p} 为干涉信号峰峰值。根据前文构建的 CCD 响应特性曲线,对干涉信号在不同光功率下的非线性失真率进行仿真分析,功率范围为 30~65 μW ,步长为 5 μW 。图 4(a)为非线性失真率 D 随光功率的变化曲线,从图中可以看出,随着光功率的增加,干涉信号非线性失真率逐渐增大。光功率为 30 μW 时, $D=0.1\%$,光功率为 65 μW 时, $D=30.8\%$ 。对具有不同非线性失真率的干涉信号进行绝对相位解调,解调结果如图 4(b)所示,可以看出,当只有畸变时,解调得到的绝对相位变化极其微小,因此非线性失真导致的信号畸变对解调结果影响可以忽略。

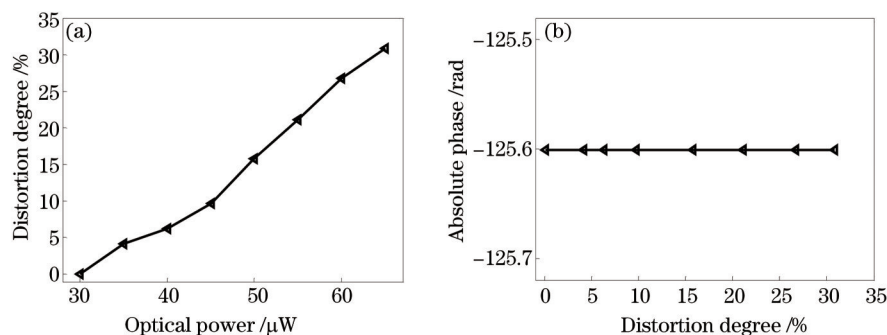


图 4 (a) 非线性失真率随光功率的变化; (b) 解调绝对相位随非线性失真率的变化

Fig.4 (a) Distortion degree variation with optical power; (b) absolute phase variation with distortion degree

CCD 主要噪声来源是散粒噪声、暗电流噪声和读出噪声,当 CCD 积分时间为 20 ms,即 50 Hz 扫描频率时,扫描频率较低,读出噪声可忽略,而光子散粒噪声和暗电流噪声相比低相干干涉信号峰峰值变化小。在 CCD 非线性区内,随光功率增大, V_{p-p} 减小,因此非线性失真导致的信号幅值压缩将影响到信噪比,通过 $R_{SN} = 20 \lg(V_{p-p}/V_n)$ 计算信噪比^[15], V_n 为信号噪声的标准差。为进一步研究非线性失真对解调结果的影响,向理想信号中分别加入标准差为 0.015、0.025、0.035 V 的高斯白噪声,并进行 100 次绝对相位仿真计算。图 5 是不同非线性失真率下解调得到的绝对相位标准差。图中显示,随着非线性失真率增加,解调得到的绝对相位标准差逐渐增加,当失真率较大时,解调时出现干涉级次跳变,使解调结果严重偏离真值,导致系统解调失效。在噪声标准差 $V_n=0.015$ V 的情况下, $D=0.1\%$ 时,绝对相位标准差为 0.0089 rad, $D=21.1\%$ 时,绝对相位标准差为 0.0217 rad,误差增大了 1.4 倍;当 D 大于 21.1% 后,开始出现干涉级次跳变;在噪声标准差 $V_n=0.025$ V 的情况下, $D=0.1\%$ 时,绝对相位标准差为 0.0217 rad, $D=21.1\%$ 时绝对相位标准差为 0.0499 rad,误差

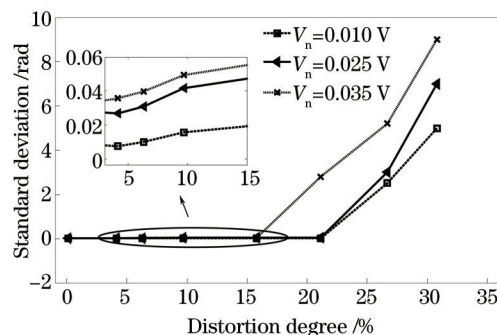


图 5 解调绝对相位的标准差随非线性失真率的变化

Fig.5 Standard deviation of demodulated absolute phase varies with distortion degree

增大了1.3倍;在噪声标准差 $V_n=0.035$ V的情况下, $D=0.1\%$ 时,绝对相位标准差为 0.0305 rad, $D=15.78\%$ 时,绝对相位标准差为 0.0563 rad,误差增大了0.85倍;当 D 大于 15.78% 后,开始出现干涉级次跳变。

3 实验结果与分析

为验证非线性失真对解调结果的影响,对F-P传感解调系统中信号非线性失真进行实验研究。按照图1搭建了实验系统,实验中白光LED光源中心波长为 580 nm,LED光源输出光功率通过改变驱动电流进行控制。光纤F-P压力传感器置于 25 °C的恒温箱中,通过高精度压力源施加压力,压力控制精度为 0.02 kPa,设置线阵CCD帧扫描频率为 50 Hz。

3.1 固定压力下非线性失真对解调绝对相位的影响研究

设置压力容器中的气压为 105 kPa,LED输出光功率调节范围是 $30\sim 65$ μ W,步长为 5 μ W,在每个光功率下连续采集 100 frame低相干干涉信号。图6为光功率分别为 30 、 40 、 50 、 60 μ W时采集到的原始信号,从图中可以看出,随着光功率的增加,信号出现非线性失真,条纹对称性被破坏,随着失真程度的加重,峰峰值逐渐减小,最后逐渐趋平。光功率为 30 μ W时,峰峰值为 0.475 V, $D=0.3\%$;光功率为 40 μ W时,峰峰值为 0.407 V, $D=6.7\%$;光功率为 50 μ W时,峰峰值为 0.275 V, $D=16.8\%$;光功率为 60 μ W时,峰峰值为 0.197 V, $D=26.3\%$ 。

图7是实验计算得到的非线性失真率随光功率的变化曲线,实验数据与理论仿真结果基本吻合。

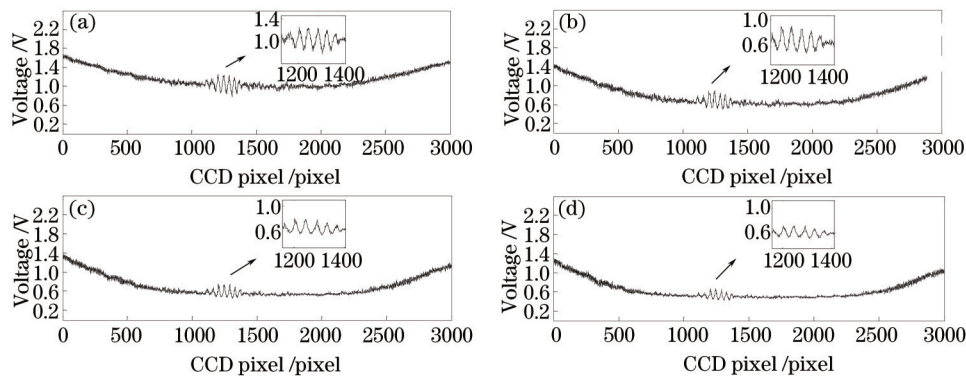


图6 (a) 光功率为 30 μ W时的原始干涉信号;(b) 光功率为 40 μ W时的原始干涉信号;

(c) 光功率为 50 μ W时的原始干涉信号;(d) 光功率为 60 μ W的原始干涉信号

Fig.6 (a) Original interference signal with 30 μ W optical power;(b) original interference signal with 40 μ W optical power;

(c) original interference signal with 50 μ W optical power;(d) original interference signal with 60 μ W optical power

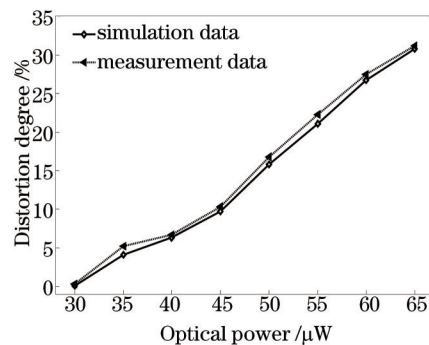


图7 非线性失真率随光功率的变化

Fig.7 Distortion degree variation with optical power

实验中不同光功率下原始信号的噪声标准差范围约为 $0.02\sim 0.03$ V。图8为实验测得的不同非线性失真率下的解调绝对相位的标准差变化曲线,随着非线性失真率的增大,信号解调的绝对相位标准差逐渐增大, $D=0.3\%$ 时绝对相位标准差为 0.0282 rad; $D=22.3\%$ 时绝对相位标准差为 0.0584 rad,增大了1.1倍。当 D 大于 26.3% 之后,解调计算中开始出现干涉级次跳变,实验与仿真结果吻合较好。

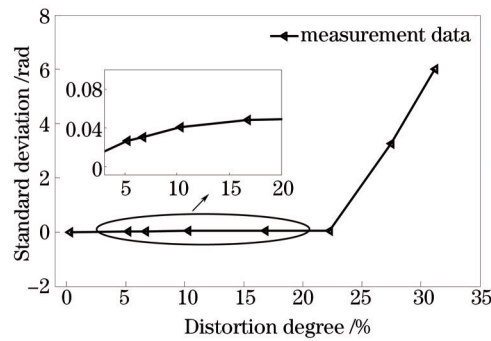


图8 解调绝对相位的标准差随光功率的变化

Fig.8 Variation in standard deviation of demodulated absolute phase with optical power

3.2 非线性失真对压力解调结果的影响实验

在30~55 μW 范围内,以5 μW 的步长改变光功率,对应非线性失真率范围为0.3%~22.3%。每一光功率下,压力改变范围为5~260 kPa,变化间隔为5 kPa,每一压力下采集100 frame数据。图9所示为不同非线性失真率下全压范围内的光纤压力解调误差,可以看出,非线性失真率小于6.7%时,虽然低相干干涉信号已经出现了非线性失真,但是对压力满量程解调精度影响较小;当非线性失真率大于6.7%后,各个压力下的压力解调误差波动加大,对压力满量程解调精度的影响逐渐增大。

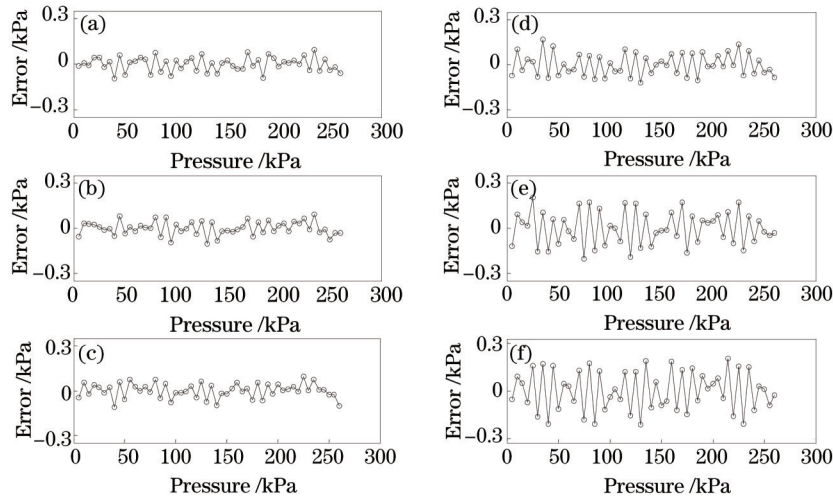


图9 不同非线性失真率下的光纤压力解调误差。(a) $D=0.3\%$; (b) $D=5.2\%$; (c) $D=6.7\%$; (d) $D=10.3\%$;
(e) $D=16.8\%$; (f) $D=22.3\%$

Fig.9 Demodulation error curves at different nonlinear distortion rates. (a) $D=0.3\%$; (b) $D=5.2\%$; (c) $D=6.7\%$;
(d) $D=10.3\%$; (e) $D=16.8\%$; (f) $D=22.3\%$

表1为不同非线性失真率的满量程压力解调误差以及标准差,可以看出在5~260 kPa 范围内,满量程精度随着非线性失真率增大而下降,非线性失真率为0.3%时,解调最大误差为0.096 kPa,满量程精度为0.038%,当非线性失真率为22.3%时,解调最大误差为0.215 kPa,精度为0.084%,压力解调误差增大了1.24倍。因此要保证解调精度在0.040%以下,系统中需要控制光源光功率小于40 μW ,即非线性失真率小于6.7%。

表1 不同非线性失真率下的原始信号与补偿后信号解调结果对比

Table 1 Comparison of demodulation results of original signal and compensated signal at different distortion degrees

Nonlinear distortion rate /%	Maximum error /kPa	Measurement precision /%	Standard deviation /kPa
0.3	0.096	0.038	0.046
5.2	0.097	0.038	0.041
6.7	0.101	0.040	0.045
10.3	0.167	0.065	0.073
16.8	0.205	0.080	0.111
22.3	0.215	0.084	0.127

4 结 论

分析了 CCD 趋近于饱和时的信号非线性失真现象,通过测试得到了空间扫描型光纤 F-P 解调系统中 CCD 的响应特性曲线,并利用非线性失真率评价信号失真程度。根据建立的 CCD 响应特性曲线,结合恢复单色频率绝对相位解调算法,仿真分析了不同噪声下非线性失真对系统解调结果的影响。结果表明,解调出的绝对相位标准差随着非线性失真率的增大而逐渐增大,且随着噪声增加,产生解调干涉级次跳变,导致大解调误差的非线性失真率减小。利用搭建的光纤 F-P 压力传感系统实验研究了信号非线性失真影响。固定压力下的实验结果表明非线性失真率随着光功率的增加而增加,解调计算在非线性失真率大于 26.3% 后出现干涉级次跳变,实验与仿真结果吻合。非线性失真率在 0.3%~22.3% 范围内的满量程压力解调实验结果表明,随着非线性失真率的增大,解调精度逐渐降低。当非线性失真率为 0.3% 时,解调最大误差为 0.096 kPa,当非线性失真率为 22.3% 时,解调最大误差为 0.215 kPa,增大了 1.24 倍。要使系统在 5~260 kPa 范围内保证 0.04% 的解调精度,需要控制光源光功率小于 40 μW ,使信号非线性失真率小于 6.7%。该研究对有效利用光纤 F-P 传感系统的测量范围,保证解调精度与稳定性具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 Lee C E, Alcoz J J, Yeh Y, *et al.* Optical fiber Fabry-Perot sensors for smart structures[J]. *Smart Materials & Structures*, 1998, 1(2): 123-127.
- 2 Leng J S, Asundi A. Non-destructive evaluation of smart materials by using extrinsic Fabry-Perot interferometric and fiber Bragg grating sensors[J]. *Ndt & E International*, 2002, 35(4): 273-276.
- 3 Xu Fuguo, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Optical fiber Fabry-Pérot 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. 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.
- 4 Elster J L, Trego A, Catterall C, *et al.* Flight demonstration of fiber optic sensors[C]. *SPIE*, 2003, 5050: 34-42.
- 5 Richards W L, Dong G L, Piazza A, *et al.* Characterization of embedded fiber optic sensors in advanced composite materials for structural health monitoring[C]. *SPIE*, 2004, 5390: 505-512.
- 6 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.
- 7 Jiang J, Liu T, Zhang Y, *et al.* Parallel demodulation system and signal-processing method for extrinsic Fabry-Perot interferometer and fiber Bragg grating sensors[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(6): 604-606.
- 8 Wang Tingting, Wang Ming, Li Ming, *et al.* Dual-wavelength demodulation and wavelength optimization for optical fiber Fabry-Pérot sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(10): 1297-1301.
王婷婷, 王 鸣, 李 明, 等. 光纤法布里-珀罗腔传感器双波长解调法及波长优化设计[J]. *光学学报*, 2005, 25(10): 1297-1301.
- 9 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Ran Zengling, *et al.* A novel extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensing system based on optical amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 183-186.
江 建, 饶云江, 冉曾令, 等. 放大外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统[J]. *光学学报*, 2004, 24(2): 183-186.
- 10 Dändliker R, Zimmermann E, Frosio G. Electronically scanned white-light interferometry: A novel noise-resistant signal processing[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(9): 679-681.
- 11 Belleville C, Duplain G. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(1): 78-80.
- 12 Marshall R H, Ning Y N, Jiang X, *et al.* A novel electronically scanned white-light interferometer using a Mach-Zehnder approach[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(3): 397-402.
- 13 Zhao Yan, Wang Daihua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Pérot 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.
- 14 Li Lei, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.* Birefringent wedges effects on cross-correlation polarization demodulation in optical fiber Fabry-Pérot 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.
- 15 Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, *et al.* Mathematical model of illumination of CCD in the space scanning optical

- fiber Fabry-Pérot 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.
- 16 Jiang Junfeng, Wu Fan, Liu Tiegen, *et al.*. Research on LED effect in spatial scanning optical fiber Fabry-Perot sensing demodulation system[J]. *Acta 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.
- 17 Jiang Junfeng, Qin Zunqi, Wang Shuang, *et al.*. Research on multi-channel optical fiber Fabry-Perot sensing demodulation system based on LED modulation and optical fiber array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0606001.
江俊峰, 秦尊琪, 王双, 等. 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[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0606001.
- 18 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]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 18117-18126.
- 19 Cheng Shubo, Zhang Huige, Wang Zhebin, *et al.*. Nonlinearity property testing of the scientific grade optical CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0404001.
程书博, 张惠鸽, 王哲斌, 等. 科学级光学 CCD 非线性特性测试[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0404001.
- 20 Dussault D, Hoess P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras[C]. *SPIE*, 2004, 5563: 195-204.
- 21 Wang Y, Kan H. Influences of CCD nonlinear response on measurement of propagation factor M^2 of a laser beam[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(1): 015708.
- 22 Hanaoka Y, Suzuki I, Sakurai T. Practical method to derive nonlinear response functions of cameras for scientific imaging [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(16): 2401-2407.

栏目编辑: 张雁