

空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调中 信噪比的影响研究

江俊峰 邹盛亮 王 双* 刘铁根 刘 琨 石俊锋

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

摘要 结合单色频率绝对相位算法仿真分析了空间低相干干涉条纹信噪比对解调中干涉级次和绝对相位的影响, 仿真结果显示, 当条纹信噪比大于 18 dB 时, 可避免干涉级次跳变问题, 此时解调得到的绝对相位标准差随信噪比的增加呈线性减小趋势, 在 25 dB 信噪比下其值可达到 0.023 rad。通过改变光源强度进行了不同信噪比对解调影响的实验研究, 实验结果与仿真分析结果基本一致。另外, 压力解调实验结果显示, 解调误差随信噪比增加而降低, 在 24.79 dB 信噪比下压力解调误差为 0.044 kPa, 相比 18.10 dB 信噪比降低了 2.84 倍。实验结果表明, 在 5~150 kPa 压力范围内, 为保证 0.05% F.S. (F.S. 表示全量程) 的解调精度, 则信噪比应大于 22 dB。

关键词 光纤光学; 光纤法布里-珀罗传感器; 信噪比; 干涉级次跳变; 相位

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1106003

Research on Signal-to-Noise Ratio Effect in Spatial Scanning Optical Fiber Fabry-Perot Sensing Demodulation System

Jiang Junfeng Zou Shengliang Wang Shuang Liu Tiegeng Liu Kun Shi Junfeng

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

Abstract The influence of signal-to-noise ratio (SNR) of spatial low-coherence interference on demodulated interference order jump and absolute phase, combining with monochromatic frequency absolute phase demodulation algorithm, is simulated and analyzed. The simulation result shows that it can avoid interference order jump when SNR exceeds 18 dB. In this case, standard deviation of demodulated absolute phase decreases linearly with the increase of SNR, and the value of standard deviation with SNR of 25 dB drops to 0.023 rad. The experiment about the influence of SNR on pressure demodulation is investigated through changing optical source intensity, and the experiment result is consisted with the simulation analysis. Pressure demodulation experiment shows that demodulation error decreases with the increase of SNR. Pressure demodulation error is 0.044 kPa when SNR reaches up to 24.79 dB, reduced 2.84 times compared to that with SNR of 18.10 dB. Experiment results indicate that when the pressure is in the range from 5 to 150 kPa, only the value of SNR is greater than 22 dB, and the demodulation accuracy can meet 0.05% F.S., where F.S. is full scale.

Key words fiber optics; fiber Fabry-Perot sensor; signal-to-noise ratio; interference order jump; phase

OCIS codes 060.2370; 070.2025; 040.1520; 260.3160

1 引 言

光纤传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰和可远距离测量等优点^[1-3], 光纤法布

收稿日期: 2015-06-09; 收到修改稿日期: 2015-06-25

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)、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)、中国空间技术研究院 CAST 创新基金项目

作者简介: 江俊峰(1977—), 男, 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: jiangjfjxu@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: sarahwang@tju.edu.cn

里-珀罗(F-P)传感器作为最早、最具应用前景的光纤传感器之一,在结构安全监测、石油化工和航空航天等领域有广泛的应用前景^[4-7]。要实现光纤 F-P 传感器腔长的准确提取,高精度、高稳定的光纤 F-P 传感解调至关重要。低相干干涉技术能够有效实现绝对距离的高精度测量,基于低相干干涉的空间扫描型光纤 F-P 解调方法采用光楔和线阵 CCD 进行光程差空间扫描实现 F-P 腔长的提取,避免了机械运动部件的不利影响,具有结构紧凑、稳定可靠的优点。近年来,研究人员针对低相干干涉空间扫描型解调方法在系统结构方案、复用和解调算法等方面进行了探索,如 Dändliker 等^[8]采用 Wollaston 棱镜实现双折射光楔光程差扫描, Belleville 等^[9]利用 Fizeau 干涉仪形成光楔, Marshall 等^[10]利用 Mach-Zehnder 干涉仪构成虚拟光楔, Yin 等^[11]采用波分复用技术实现多个光纤 F-P 压力传感器复用解调,赵艳等^[12]建立了光楔互相关解调模型。本课题组研究了双折射光楔对光程差的影响,建立了 CCD 信号光照度模型并讨论了 LED 光源功率及光谱变化的影响^[13-15],提出了恢复单色频率绝对相位算法和双折射色散补偿算法^[16-17]。由于低相干干涉空间域相位信息比位置信息具有更高的灵敏度^[18],因此基于相位信息的解调方法往往能够获得更高的解调精度,但同时需要解决干涉级次误判的难题。单色频率绝对相位算法利用低相干干涉条纹在空间频域中的相位信息,进行基准频率干涉级次判定和绝对相位恢复,可以有效避免传统相移法中干涉级次模糊的问题,从而实现低相干干涉信号的高精度解调。但在上述研究中,对空间低相干干涉条纹信噪比的影响分析较少,干涉条纹信噪比是系统解调性能的重要影响因素之一,在系统长期使用中,传感器、光源、探测电路等的老化均会使空间低相干干涉条纹信噪比下降,从而降低解调精度。因此本文将结合单色频率绝对相位算法,研究空间低相干干涉条纹信噪比对解调精度的影响,以更好地满足长期工程应用对信号质量的要求。

2 理论仿真分析

2.1 空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统

空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统结构如图 1 所示,由光纤 F-P 传感器和解调模块两部分组成。光纤 F-P 传感器将待测物理量转变成 F-P 腔长变化,解调模块实现低相干干涉条纹的提取,并通过解调计算腔长信息,进而实现外界待测物理量的测量。

解调模块由 LED 光源、耦合器、柱面镜、起偏器、双折射光楔、检偏器、线阵 CCD 和数据采集处理模块构成。LED 光源输出的光通过 3 dB 耦合器入射到光纤 F-P 传感器,光束经光纤 F-P 传感器的两个反射端面反射,再次耦合进光纤并经 3 dB 耦合器进入解调模块的空间光路,依次经过柱面镜、起偏器、双折射光楔和检偏器。当经起偏器后的线偏振光入射到双折射光楔时,产生偏振方向互相垂直的 o 光和 e 光,经检偏器后 o 光和 e 光产生干涉,从而沿着光楔长度方向形成空间分布的光程差,入射到线阵 CCD 并转化为电信号后完成空间扫描,电信号通过数据采集卡输入处理单元进行解调。

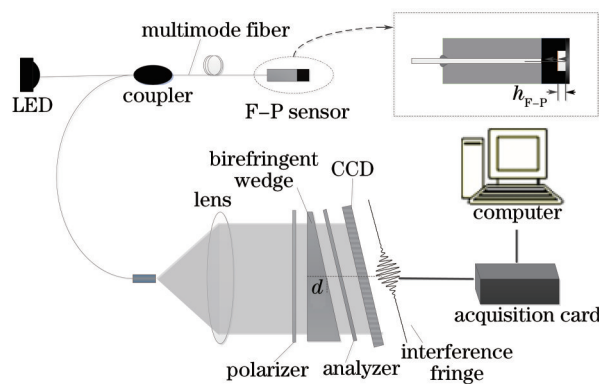


图 1 空间扫描型光纤 F-P 传感解调系统

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

2.2 信噪比对解调中的干涉级次确定及绝对相位的影响

当光纤 F-P 传感器腔长引起的光程差与双折射光楔的空间扫描光程差匹配时,将产生空间低相干干涉

条纹。空间低相干干涉条纹信号质量通过信噪比(SNR, R_{SN})进行评价^[14], $R_{SN} = 20 \lg(V_{p-p}/V_{RMS})$, 式中 V_{p-p} 为原始空间低相干干涉条纹的峰峰值, V_{RMS} 为干涉信号背景噪声的均方根值。

光纤 F-P 传感解调系统中主要噪声来源是线阵 CCD 的随机噪声, 其中影响相对较大的 3 种噪声是光子散粒噪声、暗电流噪声和读出噪声^[19-20]。在一定的积分时间内, 光子散粒噪声和暗电流噪声相比接收到的空间低相干干涉信号峰峰值变化不明显, 而读出噪声可以采用降低 CCD 的帧扫描频率来减小其影响^[14]。当 CCD 帧扫描频率确定时, V_{p-p} 随光源强度增加而显著增强, 但噪声强度变化不明显, 在 CCD 接收信号未饱和失真的前提下, 空间低相干干涉条纹的信噪比随之增加。

假定 LED 光源光谱呈高斯分布, 则线阵 CCD 像素接收的空间低相干干涉条纹可表示为

$$I = I_0 \cdot \exp\left\{-\left[\frac{\pi(\Delta n \cdot x \tan \theta - 2h)}{2\sqrt{\ln 2} \cdot c}\right]^2\right\} \cdot \cos\left[\frac{2\pi \cdot v_0}{c}(\Delta n \cdot x \tan \theta - 2h)\right], \quad (1)$$

式中 I_0 为干涉信号峰峰值, x 为 CCD 接收干涉条纹的像素位置, $\Delta n = |n_o - n_c|$ 为光楔双折射率差, θ 为双折射光楔楔角, v_0 为 LED 光源中心频率, Δv 为光源频谱范围, h 为光纤 F-P 腔腔长, c 为光速。

采用单色频率绝对相位解调算法时, 选取 Ω_r 作为基准频率, 因此基准频率下的绝对相位 Φ_a 与相对相位 $\phi(\Omega_r)$ 的关系^[16]为

$$\Phi_a = \phi(\Omega_r) - 2\pi \cdot f_{\text{loor}}(T/2\pi), \quad (2)$$

式中 T 为相位展开后拟合直线的截距, $f_{\text{loor}}(\cdot)$ 表示取整函数, $n = f_{\text{loor}}(T/2\pi)$, n 为该基准频率下的干涉级次。

从(2)式中可知基准频率的绝对相位与其相对相位及干涉级次有关, 当空间低相干干涉条纹受到背景噪声干扰时, 这会造成相对相位偏差, 并改变相位展开后拟合直线的截距 T , 甚至发生干涉级次跳变现象, 引起解调绝对相位发生 2π 整数倍的偏差。

通过在理想空间低相干干涉条纹信号加入高斯白噪声的方法, 仿真分析信噪比对解调中干涉级次确定和绝对相位解调结果的影响。图 2(a)和(b)分别为 15 dB 和 25 dB 两倍信噪比下仿真得到的空间低相干干涉条纹与理想干涉条纹对比图, 其中所用参数: F-P 腔长为 20.7 μm ; LED 光源为高斯光谱, 中心波长为 580 nm, 光谱半峰全宽为 90 nm; CCD 像素数为 3000, 像素宽度为 7 μm 。

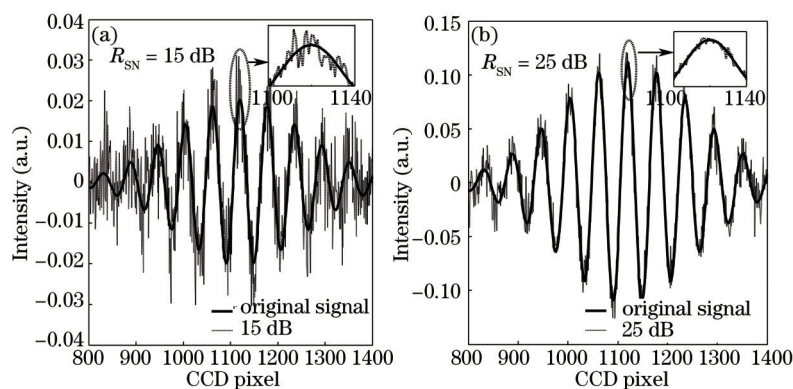


图 2 空间低相干干涉条纹图, (a) 15 dB 信噪比; (b) 25 dB 信噪比

Fig.2 Schematic diagram of spatial low-coherence interference fringe. (a) $R_{SN} = 15 \text{ dB}$, (b) $R_{SN} = 25 \text{ dB}$

在 15 dB 和 25 dB 信噪比下进行了 100 次的截距 T 和干涉级次 n 仿真计算, 结果如图 3 所示。图 3(a)显示 15 dB 信噪比下截距计算结果的标准差为 1.792 rad, 25 dB 信噪比下截距计算结果的标准差为 0.453 rad, 减小了 3.96 倍。图 3(b)中 25 dB 信噪比下未出现干涉级次跳变, 而 15 dB 信噪比下计算的干涉级次发生 10 次跳变。从上述仿真结果中可以看出, 单色频率绝对相位解调过程中干涉级次判定的准确性与空间低相干干涉条纹的信噪比密切相关。

为进一步细化分析空间低相干干涉条纹信噪比对解调结果的影响, 将信噪比从 15 dB 以步长 0.5 dB 增至 25 dB 进行仿真分析, 每个信噪比下计算 100 次, 并记录干涉级次跳变的次数, 如图 4(a)所示。由图 4(a)可知, 随着信噪比的增加, 干涉级次跳变次数先迅速减小, 但在信噪比达到 18 dB 后不再发生干涉级次跳变。随后在 18 dB 和 25 dB 信噪比下对空间低相干干涉条纹通过(2)式求取绝对相位, 仿真计算次数为 100 次, 取

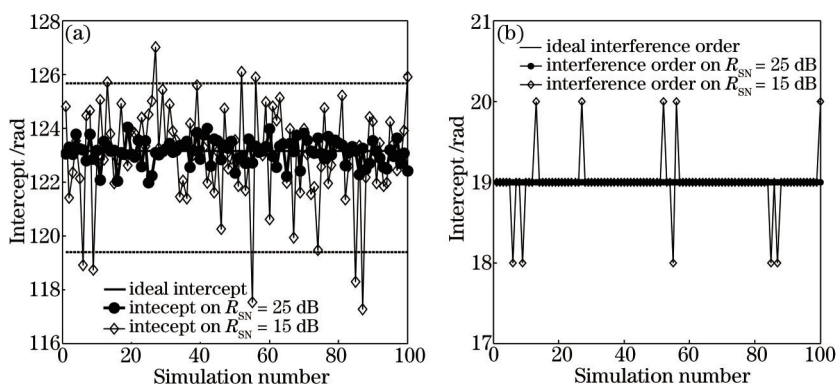


图 3 (a)截距和(b)干涉级次的仿真计算结果

Fig.3 Simulation results of (a) intercept and (b) interference order

100次解调的绝对相位的平均值,结果如图4(b)所示。图4(c)显示,解调得到的绝对相位标准差随着信噪比增加呈线性减小的趋势,18 dB信噪比下解调得到的绝对相位标准差为0.054 rad,25 dB信噪比下解调得到的绝对相位标准差为0.023 rad,降低了2.35倍。

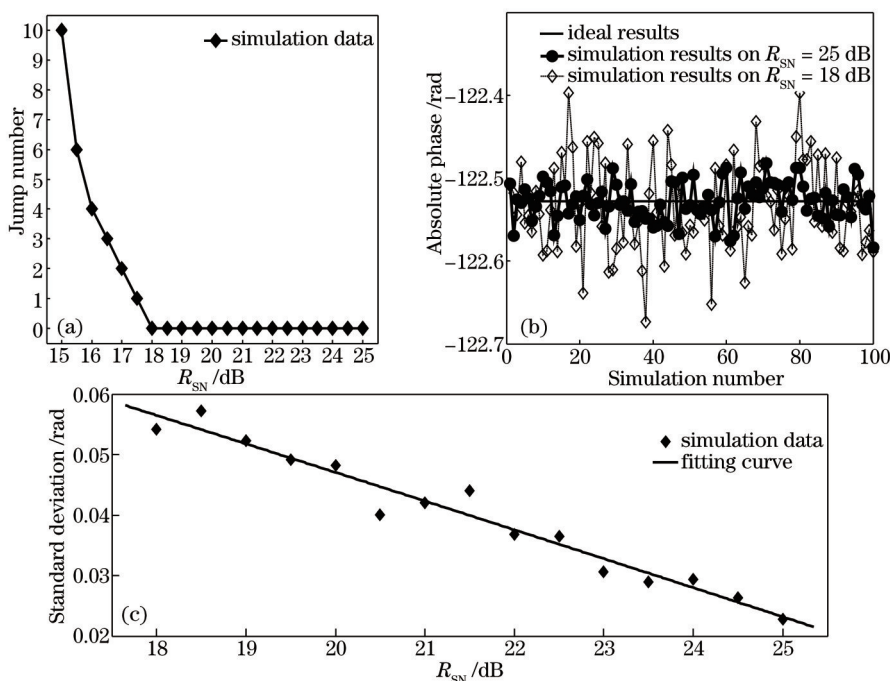


图 4 (a) 干涉级次跳变次数随信噪比的变化;(b) 18 dB和25 dB信噪比解调绝对相位的均值计算结果;

(c) 解调绝对相位标准差随信噪比的变化

Fig.4 (a) Jump number of interference order versus SNR;(b) average results of demodulation absolute phase under 18 dB and 25 dB of SNR;(c) standard deviation of demodulation absolute versus SNR

3 实验与分析

通过控制LED光源输出强度来实现不同的信噪比,实验验证信噪比对空间低相干干涉条纹级次跳变和解调绝对相位的影响。实验中白光LED光源光谱近似为高斯分布,中心波长为580 nm,半峰全宽为90 nm,LED光源强度通过改变驱动电流进行控制。光纤F-P压力传感器置于25℃的恒温箱中,通过高精度压力源施加压力,压力源控制精度为0.02 kPa,接收信号的CCD帧扫描频率为50 Hz。

3.1 干涉级次和解调绝对相位随信噪比的变化研究

实验中固定压力为100 kPa,调整光源功率改变信噪比,在每一个光源功率下采集100帧空间低相干干涉条纹数据,计算每帧数据的信噪比,并以100帧的平均值代表信噪比真值,实验中在不同光源功率下测得信噪

比真值在 14.99 dB 和 24.79 dB 间分布。对每一个信噪比下的各帧数据进行离散傅里叶变换(DFT),以频率序号 58 对应的频率 Ω_{58} 作为解调的基准频率,计算得到的空间频率域的归一化幅值和相位的 100 帧结果如图 5 所示。图 5(a)为基准频率下幅值取均值并进行归一化处理结果,可知其值先随信噪比缓慢增加,信噪比从 14.99 dB 增加到 18.10 dB 时,归一化后的幅值从 0 增至 0.087,信噪比大于 18.10 dB 时,随信噪比变化速度加快,24.79 dB 信噪比下的归一化后的幅值比 18.10 dB 信噪比增大了 0.913。图 5(b)表示基准频率的相对相位与信噪比的关系,可以看出随着信噪比的增加,其标准差越来越小,这表明信噪比的增加使相对相位波动减小。

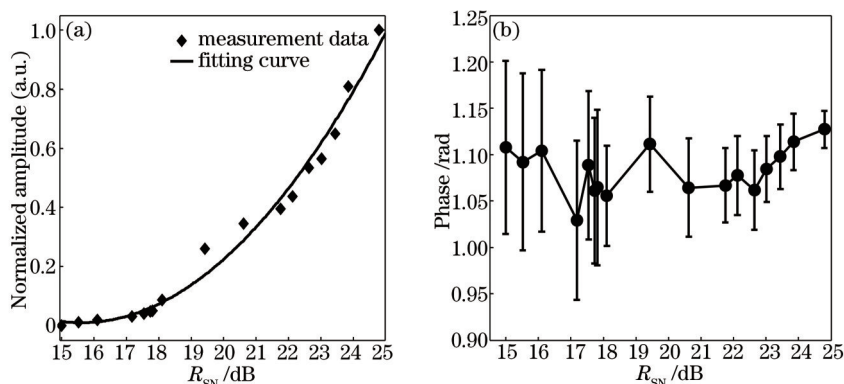


图 5 (a) 基准频率的归一化幅值随信噪比的变化; (b) 基准频率的相对相位与信噪比的变化

Fig.5 (a) Normalized amplitude of the fundamental frequency as a function of SNR;
(b) relative phase of the fundamental frequency versus SNR

进一步分析了 14.99 dB、18.10 dB、24.79 dB 三个信噪比下的 100 帧数据的截距和干涉级次,计算结果如图 6 所示。图 6(a)~6(c)所示, 14.99 dB、18.10 dB、24.79 dB 信噪比下的截距标准差依次减小,分别为 2.109 rad、0.531 rad、0.208 rad,且 18.10 dB 和 24.79 dB 信噪比下干涉级次不发生跳变,与理论仿真分析结果基本一致。

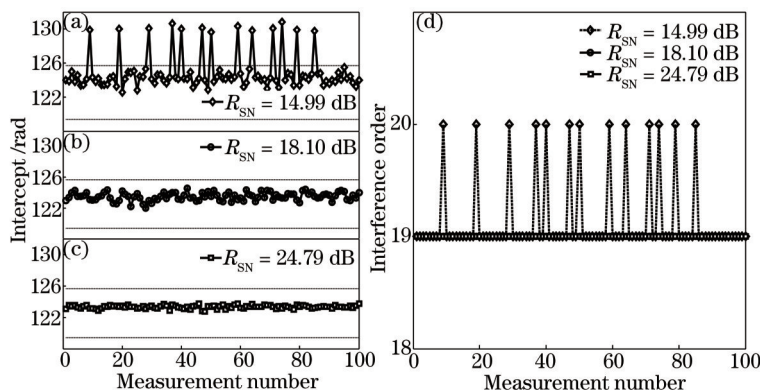


图 6 (a) 14.99 dB 信噪比下的截距实验结果; (b) 18.10 dB 信噪比下的截距实验结果;

(c) 24.79 dB 信噪比下的截距实验结果; (d) 干涉级次与信噪比的关系

Fig.6 (a) Measurement results of intercept with $R_{SN}=14.99$ dB; (b) measurement results of intercept with $R_{SN}=18.10$ dB;
(c) measurement results of intercept with $R_{SN}=24.79$ dB; (d) relationship between interference order and SNR

图 7(a) 为不同信噪比下 100 帧数据的干涉级次跳变次数,从图中可以看出 100 帧实验数据干涉级次跳变次数与仿真曲线趋势一致,实验中信噪比大于 18 dB 时干涉条纹不再发生级次跳变,符合理论预期结果。图 7(b) 为解调绝对相位标准差的实验与仿真曲线,图中随着信噪比的增加,解调绝对相位的标准差呈线性减小的趋势,在 18.10 dB 信噪比下,解调绝对相位的标准差实验结果为 0.067 rad,在 24.79 dB 信噪比下的解调绝对相位的标准差实验结果为 0.02 rad,实验和仿真数据基本吻合,其差异可能由于实验中噪声来源更为复杂导致的。

3.2 压力解调误差随信噪比的变化研究

实验中施加压力范围为 5~150 kPa,步长为 5 kPa,压力源控制精度为 0.02 kPa,每个压力点下采集 100 帧数据,采用单色频率绝对相位算法分析不同信噪比下的压力解调误差。图 8(a)为 4 个信噪比下绝对相位-压力曲线图,其中每个压力点为 100 帧数据解调绝对相位的平均值,图 8(b)~8(e)分别为 4 个信噪比下各压力点

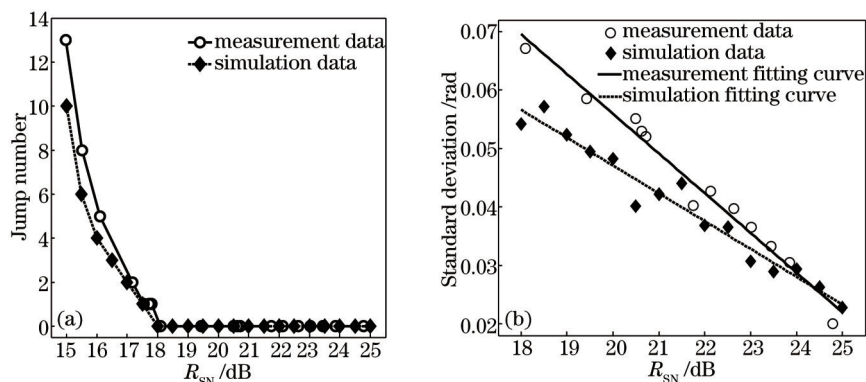


图 7 (a)干涉级次跳变次数随信噪比的变化;(b)解调绝对相位标准差随信噪比的变化

Fig.7 (a)Jump number of fringe order versus SNR; (b) standard deviation of demodulation absolute phase as a function of SNR

对应的解调误差,18.10 dB信噪比的压力解调误差为0.125 kPa,标准差为0.054 kPa,而24.79 dB信噪比的压力解调误差为0.044 kPa,标准差为0.022 kPa,压力解调误差降低了2.84倍。

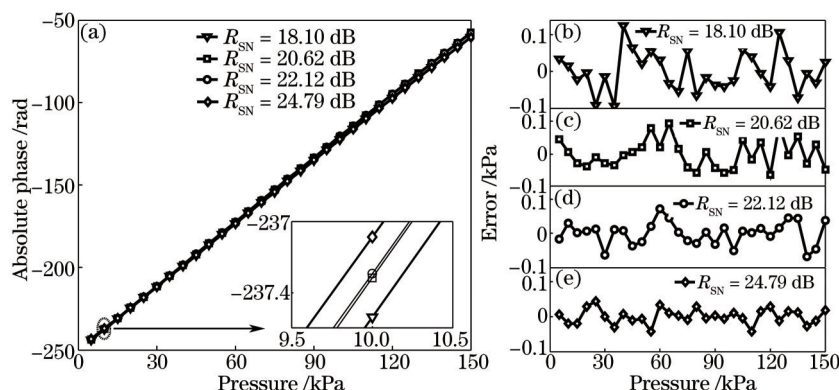


图 8 (a) 解调绝对相位与压力的关系; (b) 18.10 dB 信噪比下解调误差; (c) 20.62 dB 信噪比下解调误差; (d) 22.12 dB 信噪比下解调误差; (e) 24.79 dB 信噪比下解调误差

Fig.8 (a) Relationship between demodulated absolute phase and pressure; (b) demodulation errors with $R_{SN}=18.10$ dB;

(c) demodulation errors with $R_{SN}=20.62$ dB; (d) demodulation errors with $R_{SN}=22.12$ dB; (e) demodulation errors with $R_{SN}=24.79$ dB

表 1 为 18.10 dB~24.79 dB 的 10 个信噪比下得到的压力解调误差及其标准差,从表中数据可以看出,压力解调误差随信噪比的增加而减小,当信噪比高于 22.12 dB 时,压力解调误差范围控制在 ± 72 Pa。因此,在 5~150 kPa 压力范围内为保证 0.05% F.S.(F.S.表示全量程)的解调精度,需控制解调误差小于 72.5 Pa,空间低相干干涉条纹的信噪比应不小于 22 dB。

表 1 各信噪比下压力解调误差

Table 1 Pressure demodulation errors under different values of SNR

SNR /dB	Measure precision /(%F.S.)	Maximum error /kPa		Standard deviation /kPa
		Plus	Minus	
18.10	0.086	0.125	-0.096	0.054
19.43	0.074	0.108	-0.106	0.048
20.62	0.065	0.094	-0.063	0.045
21.75	0.053	0.073	-0.077	0.037
22.12	0.050	0.072	-0.068	0.034
22.64	0.046	0.066	-0.054	0.032
23.02	0.043	0.063	-0.050	0.029
23.44	0.040	0.048	-0.058	0.029
23.85	0.037	0.053	-0.043	0.026
24.79	0.030	0.043	-0.044	0.022

在实际应用中,为保证上述解调精度要求,主要从改进信号干涉对比度、增加信号强度和降低噪声等方面来实现。1) 要对光纤传感器和解调系统的光学参数进行优化,以增强低相干干涉信号对比度;2) 通过精确控制光源强度,确保在 CCD 非饱和状态下增加低相干干涉条纹信号强度;3) 通过优化电路设计降低电路以及线阵 CCD 带来的噪声干扰。通过上述技术改进,能够保证工程应用在一定精度范围对信噪比的要求,实现高精度、高稳定的光纤 F-P 压力传感解调。

4 结 论

结合单色频率绝对相位算法,仿真分析了空间低相干干涉条纹信噪比对解调中的干涉级次跳变以及绝对相位的影响。阐述了单色频率绝对相位算法的思路,并采用单色频率绝对相位算法实现不同空间低相干干涉条纹信噪比的仿真分析,结果表明随着信噪比的增加,空间低相干干涉条纹信号质量越来越好,当信噪比小于 18 dB 时,将出现干涉级次跳变问题,导致解调失效;当信噪比大于 18 dB 时,避免了干涉级次跳变问题,解调得到的绝对相位标准差随着信噪比的增加呈线性减小的趋势,在 25 dB 信噪比下其值为 0.023 rad。通过改变光源强度进行了实验验证,实验结果与理论仿真分析基本一致。在 18.10 dB~24.79 dB 信噪比之间进行了压力解调实验,结果显示了解调误差随信噪比的增加而降低,在 24.79 dB 信噪比下解调误差为 0.044 kPa,解调精度达到 0.030%F.S.,相比 18.10 dB 信噪比解调精度提高了 2.84 倍。采用单色频率绝对相位算法实现压力解调,为保证长期工程对解调精度以及系统稳定的要求,在 5~150 kPa 压力范围内保证 0.05%F.S. 的解调精度,需控制空间低相干干涉条纹的信噪比在 22 dB 以上。

参 考 文 献

- 1 B Lee. Review of the present status of optical fiber sensor[J]. Opt Fiber Technol, 2003, 9(2): 57-59.
- 2 Li Jinming, Ma Youchun, Yan Shubin, *et al.*. High precision and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system based on tunable filter[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905002.
李锦明, 马游春, 闫树斌, 等. 基于可调谐滤波器的高精度宽量程光栅传感解调系统[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905002.
- 3 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.
王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 4 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.
- 5 Schroeder R J, Ramos R T, Yamate T. Fiber optic sensors for oil field services[C]. SPIE, 1999: 12-23.
- 6 Shu Zhuo, Tong Bin, Xu Chunhui, *et al.*. Dual-fiber Fabry-Perot displacement sensor based on ratio method fringe counting demodulation [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1005003.
舒 卓, 童 斌, 徐春晖, 等. 基于双路比值条纹计数法的法布里-珀罗腔位移传感器[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1005003.
- 7 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.
- 8 Dändliker R, Zimmermann E, Frosio G. Electronically scanned white-light interferometry: A novel noise-resistant signal processing[J]. Opt Lett, 1992, 17(9): 679-681.
- 9 Belleville C, Duplain G. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. Opt Lett, 1993, 18(1): 78-80.
- 10 Marshall R H, Ning Y N, Jiang X Q, *et al.*. A novel electronically scanned white-light interferometer using a Mach-Zehnder approach [J]. J Lightwave Technol, 1996, 14(3): 397-402.
- 11 Yin J, Liu T, Jiang J, *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.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 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]. 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.
- 15 Jiang Junfeng, Wu Fan, Liu Tiegeng, *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.
- 16 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.
- 17 Wang S, Liu T, Jiang J, *et al.*. Birefringence dispersion compensation demodulation algorithm for polarized low-coherence interferometry [J]. Opt Lett, 2013, 38(16): 3169-3172.
- 18 Akiko Harasaki, Joanna Schmit, James C Wyant. Improved vertical-scanning interferometry[J]. Appl Opt, 2000, 39(13): 2107-2115.
- 19 Dussault D, Hoess P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras[C]. SPIE, 2004, 5563: 195-204.
- 20 Howell S B. Handbook of CCD Astronomy[M]. Cambridge University Press, 2006.

栏目编辑: 王晓琰