

空间电扫描型低相干干涉长距离光纤传感解调系统

石俊锋 刘铁根 王 双* 江俊峰 刘 琨 邹盛亮 肖梦楠

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, 天津大学光纤传感研究所, 天津 300072

摘要 基于双超辐射发光二极管(SLED)光源研究了空间电扫描型低相干干涉长距离光纤传感解调系统。通过负透镜扩束搭建了紧凑解调干涉光路,分析了双SLED光源功率比对低相干干涉条纹形态的影响并探讨了传输损耗的功率比补偿。针对双SLED光源干涉条纹的特点,提出了双阈值的任意极值解调算法,并进行了压力解调实验。结果表明,在50~180 kPa的压力范围内,利用不同峰值,可以实现0.24%~0.40% F.S.(F.S.为全量程)的解调精度,光纤传输距离达到1.76 km,与理论分析吻合。

关键词 测量;低相干干涉解调仪;双超辐射发光二极管光源;长距离传感;双阈值算法

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0406001

Spatial Electronic Scanned Low-Coherence Interference Long Distance Optical Fiber Sensing and Demodulation System

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

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

Abstract Spatial electronic scanned low-coherence interference long distance optical fiber sensing and demodulation system is investigated based the superluminescent light emitting diode (SLED). The compact beam path of demodulation interferometry is built by negative lens. The influence of the double SLED light sources power ratio on low-coherence interference fringe is analyzed and the power ratio compensation for transmission loss is discussed. According to the characteristics of double SLED light sources interference fringe, a double-threshold demodulation algorithm is proposed and a pressure demodulation experiment is conducted. Experimental results show that, in the pressure range from 50 kPa to 180 kPa, the demodulation precision of 0.24% to 0.40% F.S. is realized, where F.S. is full scale, and that the longest distance can reach 1.76 km. The results are in good agreement with the theoretical analysis.

Key words measurement; low-coherence interferometry; double superluminescent light emitting diode sources; long distance sensing; double-threshold algorithm

OCIS codes 120.3180; 060.2380; 010.0280; 150.1135

收稿日期: 2015-10-08; 收到修改稿日期: 2015-11-01

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基金(JCYJ20120831153904083)、中国空间技术研究院 CAST创新基金、新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室开放课题(201403)

作者简介: 石俊锋(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤法布里-珀罗压力传感器方面的研究。

E-mail: sjflxue@tju.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,博士,教授,博士生导师,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)传感技术在航空航天、民用基础设施等安全监测领域有很好的应用前景^[1-5], 光纤F-P腔长解调是其获得应用的关键环节之一。低相干干涉技术可以克服 2π , 模糊实现宽范围的绝对测量^[6], 因此成为光纤F-P腔长解调的主要方法之一。基于低相干干涉技术的空间电扫描型光纤F-P解调方法通过光楔实现光程差的空间扫描, 完成光纤F-P传感器的腔长查询。由于没有机械移动部件, 解调系统的稳定性好、可靠性高。Chen等^[7]通过迈克耳孙干涉仪倾斜2个反射镜构成虚拟光楔, Dändliker等^[8]利用Wollaston棱镜构成双折射光楔, Belleville等^[9]利用Fizeau干涉仪构成光楔, Marshall等^[10]利用马赫-曾德尔干涉仪构成虚拟光楔, 赵艳等^[11]研究了光楔的互相关数学模型。本课题组研究了双折射光楔光程差分布^[12]、电荷耦合器(CCD)光照度数学模型^[13], 分析了发光二极管(LED)光源功率对信噪比的影响^[14], 提出了恢复单色频率绝对相位算法^[15], 探究了热应力和残余气体对传感器温度特性的影响^[16]。受CCD响应光谱限制, 现有空间电扫描型光纤低相干干涉解调系统^[12-16]中的光源主要采用400~1000 nm波段的LED光源和卤素灯, 其相干长度较短, 可以达到 $3.7 \mu\text{m}$ ^[14], 从而能在CCD上采集到完整的低相干干涉条纹。但是, 这些低相干光源耦合到多模光纤后输出功率只有几十微瓦, 且光纤在该波段的损耗较大, 传感距离受到限制, 仅在百米量级。然而在海洋压力传感、油井探测等应用领域, 光纤传输距离要求达到1~2 km, 因此需要更高功率的宽带光源。400~1000 nm波段的超辐射发光二极管(SLED)光源具有毫瓦量级输出功率, 多模激光二极管(MLD)可提供更高的输出功率, 但是由于存在模式竞争, MLD光谱和模式的稳定性较差。相比LED, 上述2种光源的光谱宽度较窄, 使得相干长度较长, 导致干涉条纹包络变化平缓, 不易识别峰值。为克服这一问题, 目前通常采用2个或3个不同中心波长的光源进行条纹形态调制, 如Rao等^[17]采用2个MLD光源, Wang等^[18]采用3个MLD光源。

针对以往基于LED的空间电扫描型光纤低相干干涉解调系统的传感距离受限的问题, 本文基于双SLED光源研究了空间电扫描型低相干干涉长距离光纤传感解调系统。单模光纤干涉保证了干涉的稳定性, 增加负透镜扩束有效地提高了解调干涉光路的紧凑性。为克服单个SLED相干长度较长、不易解调的问题, 分析了双SLED光源功率比对低相干干涉条纹形态的影响, 并探讨了传输损耗的功率比的补偿, 计算出系统最大信号传输距离为1.76 km。针对双SLED光源干涉条纹的特点, 提出了基于双阈值的任意极值解调算法, 避免了条纹峰值的误判。采用光纤F-P压力传感器进行了实验研究, 结果表明, 在50~180 kPa的压力范围内, 利用不同的峰值, 解调精度可以达到0.24%~0.40% F.S.(F.S.为全量程)之间, 光纤传输距离达到1.76 km, 与理论分析吻合, 且比以往基于LED的系统传输距离提高了10倍以上。

2 理论仿真分析

2.1 双SLED光源的光纤F-P压力传感解调系统原理

图1为双SLED光源的光纤F-P压力传感解调系统。为实现长距离传感, 需要提高系统光源输出光功率。SLED光源输出光功率远高于LED, 同时SLED光源比MLD光源的光谱和模式稳定性要好。目前商用SLED的品种规格日趋成熟, 因此系统采用SLED光源。为克服SLED相干长度较长导致干涉条纹包络变化平缓不易识别峰值的影响, 采用双SLED光源实现干涉条纹叠加调制。

SLED1和SLED2发射的具有不同中心波长的宽带光经过3 dB光纤耦合器合束后, 经过第2个3 dB光纤

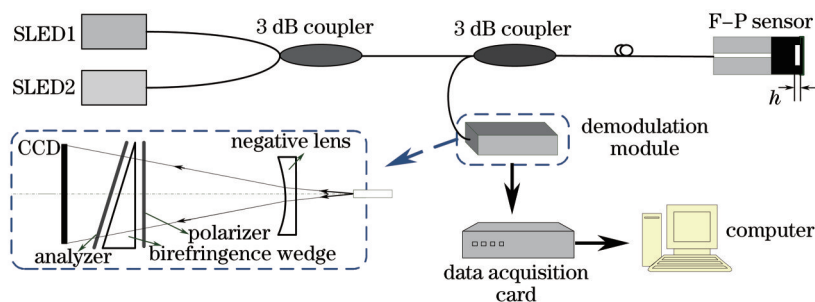


图1 双SLED光源的光纤F-P压力传感解调系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of optical fiber F-P pressure sensing and demodulation system with double SLED light sources

耦合器进入光纤 F-P 压力传感器中, 光纤 F-P 腔长 h 随外界压力线性变化。由于光纤 F-P 腔两表面的反射率很低, 因此经过光纤 F-P 腔的反射光可近似为双光束干涉, 2 束光的光程差为 $2h$ 。反射光经过 3 dB 光纤耦合器进入低相干干涉解调模块, 解调模块由负透镜、起偏器、双折射光楔以及检偏器 4 部分组成, 其中起偏器与检偏器的偏振方向相互垂直, 且均与双折射光楔的光轴成 45° 角。相比以往基于 LED 和多模光纤的光纤 F-P 压力传感解调系统, SLED 光源采用数值孔径较小的单模光纤输出, 光束发散角小, 如果和以往的基于单个 LED 的系统一样只是光束自然发散, 解调模块长度将非常长, 光路调节和结构紧凑性均变差。为克服这一问题, 解调模块的空间光路中增加负透镜实现光束快速发散, 减小解调模块长度。光进入双折射光楔中分成寻常光(o光)和非寻常光(e光), 2 束光到达检偏器时附加 1 个与光楔厚度成正比的光程差。当由光楔引起的光程差等于光纤 F-P 腔引起的光程差时, 会在对应的光楔位置产生低相干干涉条纹, 并由线阵 CCD 接收。CCD 接收到的数据经由数据采集卡采集后输入计算机进行处理。

2.2 紧凑解调干涉光路的设计分析

选取 2 种谱宽较宽的商用 SLED 用于传感解调。SLED1 中心波长为 750 nm, 带宽为 20 nm, 最大输出光功率 $I_{1\max} = 5 \text{ mW}$; SLED2 中心波长为 650 nm, 带宽为 6 nm, 最大输出光功率 $I_{2\max} = 2 \text{ mW}$ 。系统中所用光纤芯径为 $3.3 \mu\text{m}$, 以保证单模干涉提高信号稳定性。单模光纤数值孔径为 0.14, 因此, 出射后的光束发散角 $\theta = 0.09 \text{ rad}$ 。为覆盖整个 CCD 探测宽度 $2D = 21 \text{ mm}$, 光纤到 CCD 的距离须达到 $L = 233.3 \text{ mm}$, 尺寸较大。为缩小距离 L , 利用负透镜增大光束发散角, 如图 2 所示。

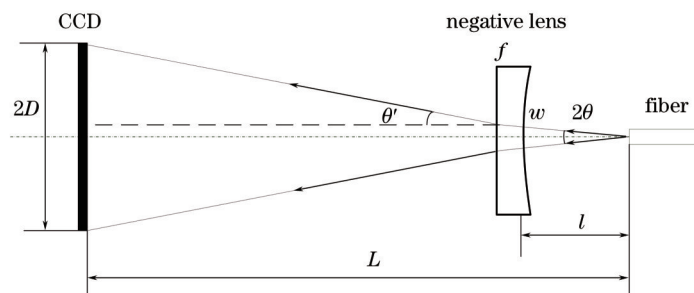


图 2 带有负透镜的解调模块内部光路图

Fig.2 Beam path in demodulation module with a negative lens

假设负透镜的像方焦距为 f' , 负透镜到光纤之间的距离为 l , 经负透镜发散以后发散角为 θ' , 光在负透镜前表面的光斑直径为 $2w$, 则 $2w = 2l \tan \theta$ 。由于光纤的发散角很小, 经过负透镜发散以后, 有

$$\tan \theta' = \left(1 + \frac{l}{f'}\right) \tan \theta. \quad (1)$$

忽略负透镜的厚度, 则有

$$\frac{D-w}{L-l} = \tan \theta'. \quad (2)$$

将 $2w = 2l \tan \theta$ 代入(1)和(2)式, 可得

$$L = l + \frac{f'(D - l \tan \theta)}{(l + f') \tan \theta}. \quad (3)$$

图 3(a)为 L 随 f' 和 l 的变化趋势, 图 3(b)为 $f' = 25 \text{ mm}$ 时, L 随 l 的变化曲线。当光纤至负透镜的距离为 30 mm 时, 光纤距 CCD 的最小距离 $L_{\min} \approx 70 \text{ mm}$ 。实际系统中, 由于需要考虑光楔、偏振片等器件的空间体积需求, L 取 85 mm, 此时 l 为 14 mm, θ' 为 0.14 rad。

2.3 SLED 光源功率比对低相干干涉条纹形态的影响及传输损耗功率比的补偿分析

与基于单个 LED 光源的解调系统不同, 双 SLED 光源系统中 2 个 SLED 光源各自独立地发生偏振低相干干涉, 形成干涉条纹, 最终的条纹形态是 2 条干涉条纹的叠加。因此, 需要考虑 2 个光源光功率的输出匹配问题。在光纤中传输时, 2 个波长的传输损耗不一样, 故需要对光源输出光功率进行预补偿。

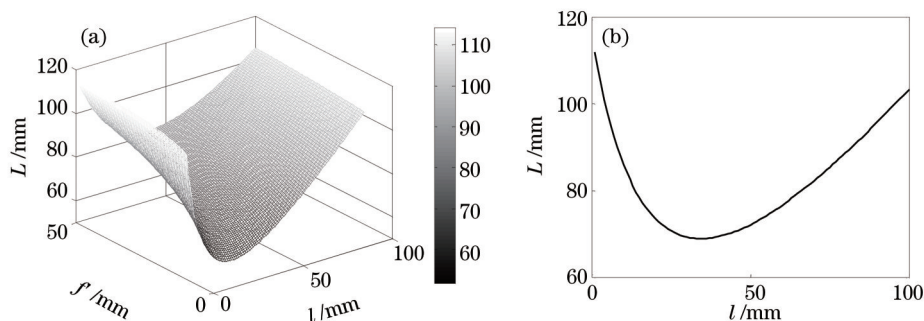


图3 (a) 解调模块长度 L 随 f' 和 l 的变化趋势; (b) $f' = 25$ mm 时, L 随 l 变化曲线

Fig.3 (a) Changing tendency of demodulation module length L with f' and l ; (b) relationship between L and l when $f' = 25$ mm

SLED 光源光谱可近似为呈高斯分布, 线阵 CCD 像元接收的双 SLED 光源形成的低相干干涉条纹信号表示为

$$A = A_{01} \exp\left\{-\left[\frac{(\Delta n \cdot x \cdot \tan \varphi - 2h)\Delta k_1}{4\sqrt{\ln 2}}\right]^2\right\} \cos[(\Delta n \cdot x \cdot \tan \varphi - 2h)k_{01}] + A_{02} \exp\left\{-\left[\frac{(\Delta n \cdot x \cdot \tan \varphi - 2h)\Delta k_2}{4\sqrt{\ln 2}}\right]^2\right\} \cos[(\Delta n \cdot x \cdot \tan \varphi - 2h)k_{02}] \quad (4)$$

式中 A_{01} 、 A_{02} 分别为 2 个光源的强度幅值, 与对应光源的光功率呈线性关系; x 为 CCD 接收干涉条纹的像元位置; $\Delta n = |n_o - n_e|$ 为光楔双折射率差, 其中 n_o 为 o 光折射率, n_e 为 e 光折射率; φ 为双折射光楔楔角; $k_{01} = 2\pi/\lambda_{01}$ 、 $k_{02} = 2\pi/\lambda_{02}$; λ_{01} 和 λ_{02} 分别为 2 个 SLED 中心波长; $\Delta k_1 = 2\pi\Delta\lambda_1/\lambda_{01}^2$, $\Delta k_2 = 2\pi\Delta\lambda_2/\lambda_{02}^2$, 其中 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为 2 个光源光谱半峰全宽, h 为光纤 F-P 腔腔长。

由(4)式可知, 进入干涉光路的 2 个光源功率比对叠加的低相干干涉条纹形态起着重要的作用。为了分析光源功率比 $R = A_{01}/A_{02}$ 的影响, 进行了仿真分析, 仿真参数为: $\Delta n \approx 0.0118$, $\varphi = 0.1745$ rad, $h = 27 \mu\text{m}$, $\lambda_{01} = 750$ nm, $\Delta\lambda_1 = 20$ nm, $\lambda_{02} = 650$ nm, $\Delta\lambda_2 = 6$ nm。干涉条纹信号质量利用 0 级包络的次极大峰与主极大峰之比 P_1 和 1 级包络与 0 级包络峰值之比 P_2 进行衡量。图 4(a) 为 P_1 、 P_2 随 R 的变化曲线, 当 $P_1 \leq 0.91$ 且 $P_2 \leq 0.92$ 时, 干涉条纹获得较好形态, 此时 R 满足 $1 \leq R \leq 2.1$ 。当 $R=1$ 时, P_1 达到最小值, 即 0 级包络的次极大峰与主极大峰差异较大, 容易区分。当 $R=1$ 时, $P_2 = 0.92$; 当 $R>1$ 时, 变化平缓并且幅度小于 0.01。图 4(b) 给出了 $R=1$ 时的双 SLED 光源干涉条纹, 条纹主极大和次极大值差异明显。图 4(c) 是 $R=9$ 时的双 SLED 光源干涉条纹, 干涉条纹极大值区分困难。因此要尽可能保证 $R=1$, 以获得最佳干涉条纹形态。

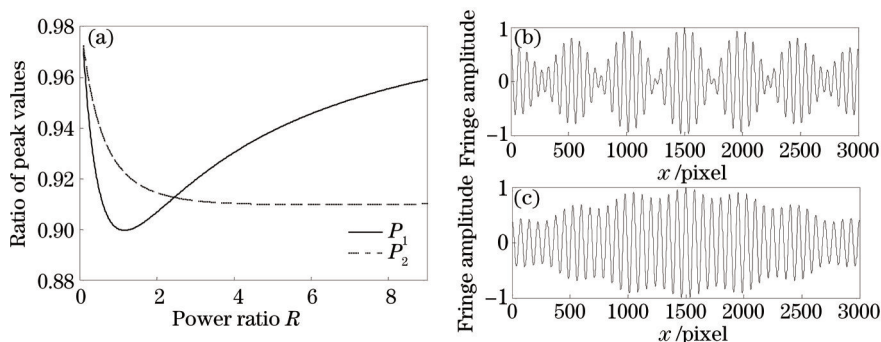


图4 (a) P_1 和 P_2 随光源功率比 R 的变化曲线; (b) $R=1$ 时双光源低相干干涉条纹形态; (c) $R=9$ 时双光源低相干干涉条纹形态

Fig.4 (a) Curves of P_1 and P_2 with power ratio R ; (b) low coherence interferogram with double light sources when $R=1$; (c) low coherence interferogram with double light sources when $R=9$

光纤信号长距离传输过程中 2 个光源的衰减差异会改变进入解调光路的光源功率比, 因此需要根据光纤传输长度进行光源功率的预调节。假设 SLED1 和 SLED2 的直接出射光功率分别为 I_1 和 I_2 , 耦合器对 SLED1 和 SLED2 的透射比分别为 α_1 和 α_2 , 单模光纤损耗分别为 η_1 (单位为 dB/km) 和 η_2 (单位为 dB/km), 光纤

传输距离为 L_T (单位为 km), 光纤 F-P 传感器对 2 种光波长的反射率分别为 R_1 和 R_2 , 则进入解调干涉光路部分的功率分别为

$$I'_1 = I_1 \alpha_1^3 R_1 \cdot 10^{-0.2L_T \eta_1}, \quad I'_2 = I_2 \alpha_2^3 R_2 \cdot 10^{-0.2L_T \eta_2}. \quad (5)$$

CCD 接收到的干涉条纹信号要保持较好的解调精度, 在 50 Hz 的帧扫描频率下, 要求 CCD 最大输出电压在 1.6 V 以上。CCD 各像素点最大输出电压可以表示为^[11]

$$U = \frac{K I' 683 \sigma t}{4d \sqrt{\sin \theta'} \sqrt{(L-l)^2 + u^2}}, \quad (6)$$

式中 K 为 CCD 的响应度, t 为 CCD 的曝光时间, σ 为解调干涉光路的损失参数, I' 为光纤出射光的光功率, d 为 CCD 感光区高度, u 为 CCD 像元的长度。由于 $L-l \gg u$, 因此 $U \approx 683 t \sigma K I' / [4d(L-l)\sqrt{\sin \theta'}] \geq 1.6 \text{ V}$ 。

为保持 $R=1$, 两光源引起的 CCD 电压输出 U_1 、 U_2 应满足 $U_1 = U_2 \geq 0.8 \text{ V}$ 。因此, SLED1 和 SLED2 进入解调模块的最低光功率分别应满足

$$I'_1 = \frac{3.2d(L-l)\sqrt{\sin \theta'}}{683 K_1 t \sigma}, \quad I'_2 = \frac{3.2d(L-l)\sqrt{\sin \theta'}}{683 K_2 t \sigma}, \quad (7)$$

式中 K_1 、 K_2 分别为 CCD 对 SLED1 和 SLED2 的响应度, 结合(5)式和(7)式, 可知两光源直接输出光功率为

$$I_1 = \frac{3.2d(L-l)\sqrt{\sin \theta'}}{683 K_1 t \sigma \alpha_1^3 R_1} \cdot 10^{0.2L_T \eta_1}, \quad I_2 = \frac{3.2d(L-l)\sqrt{\sin \theta'}}{683 K_2 t \sigma \alpha_2^3 R_2} \cdot 10^{0.2L_T \eta_2}. \quad (8)$$

因此随着光纤传输距离的增加, 两光源出射功率发生相应的变化。两光源的最大输出光功率对应其能够达到的最大传输距离, 分别表示为

$$L_{T1\max} = -\frac{5}{\eta_1} \lg \frac{3.2d(L-l)\sqrt{\sin \theta'}}{683 R_1 t \sigma I_{1\max} \alpha_1^3 K_1}, \quad L_{T2\max} = -\frac{5}{\eta_2} \lg \frac{3.2d(L-l)\sqrt{\sin \theta'}}{683 R_2 t \sigma I_{2\max} \alpha_2^3 K_2}. \quad (9)$$

本系统中, $\sigma \approx 0.5$, $t = 20 \text{ ms}$, $d = 1 \text{ mm}$, $L = 85 \text{ mm}$, $l = 14 \text{ mm}$, $\theta' = 0.14 \text{ rad}$, $u = 7 \mu\text{m}$ 。耦合器对两光源的透射比分别为 $\alpha_1 = 0.37$, $\alpha_2 = 0.5$; 传感器对 2 个光源的反射比分别为 $R_1 = 0.034$, $R_2 = 0.074$; $\eta_1 = 5.3 \text{ dB/km}$, $\eta_2 = 7 \text{ dB/km}$, $K_1 = 107 \text{ V/(lx}\cdot\text{s)}$, $K_2 = 210 \text{ V/(lx}\cdot\text{s)}$ 。计算可知, SLED1 传输的最大距离为 1.76 km, SLED2 传输的最大距离为 1.78 km。因此本系统光纤传输最大距离为 1.76 km, 此时 SLED1 的光功率为 5 mW, SLED2 光功率为 1.91 mW。图 5 为保持 CCD 接收最佳条纹形态时, 2 个光源输出光功率随传输距离的变化曲线。

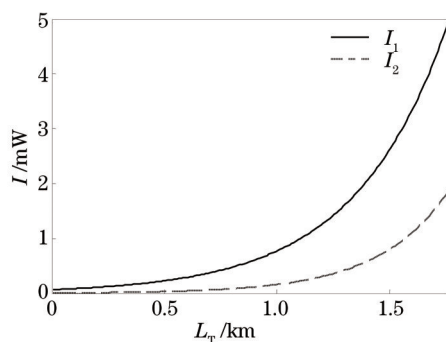


图 5 I_1 和 I_2 随传输距离 L_T 变化曲线

Fig.5 Curves of I_1 and I_2 changing with transmission distance L_T

2.4 基于双阈值的任意极值低相干干涉解调算法

根据仿真分析可知, 双光源干涉条纹中 $P_2 > 0.9$, 与基于单个 LED 光源干涉条纹相比, 产生了干涉条纹拍频调制, 并且各级次条纹包络幅度相差不大, 直接采用任意极值法^[19]很容易受到噪声的影响, 产生条纹峰值的误判, 同时使得阈值的选定变得困难。为解决这一问题, 结合包络峰值法和任意极值法, 采用双阈值进行峰值判定。如图 6 所示, 具体步骤为: 1) 提取干涉条纹包络并通过寻峰算法获得所有的包络峰值, 通过设定的阈值 C 获取所有峰值幅度大于 C 的包络峰; 2) 选定指定序号的包络, 截取其对应的条纹并选定合适的阈值 C' 提取该包络下的条纹峰值, 通过追踪其中任意的峰值都可以进行解调。值得注意的是, 在这 2 个步

骤中, C 和 C' 的设定应保证包络峰和条纹峰值对应的序号在测量范围内始终不变。

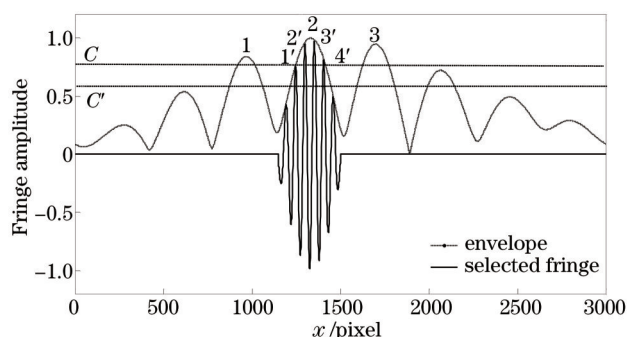


图 6 双阈值法追踪条纹峰值示意图

Fig.6 Schematic diagram for tracing fringe peaks with double thresholds

3 实验与分析

将光纤 F-P 压力传感器置于压力舱中,压力舱置于恒温箱中,保持温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过压力控制设备控制压力舱内压力以 10 kPa 为步长从 50 kPa 增加到 180 kPa ,控制精度为 0.02 kPa ,传输光纤约 100 m 。每个压力点下连续采集 200 帧低相干干涉条纹信号,对低相干干涉条纹归一化后采用双阈值的任意极值法进行解调,其中阈值 $C=0.92$, $C'=0.6$,提取序号分别为 $1'$ 、 $2'$ 、 $3'$ 、 $4'$ 四个条纹峰值,分别追踪这四个峰值进行解调。

图 7(a) 为双 SLED 光源的光纤 F-P 压力传感解调系统原始信号图和归一化后的滤波图,其中,为了避免和滤波图重叠,原始信号图上移了 0.5 V ,图 7(b) 和图 7(c) 分别为仅用 SLED1 和仅用 SLED2 作为光源的低相干干涉原始信号图,双光源的引入可以有效改善条纹形态,压缩条纹包络。

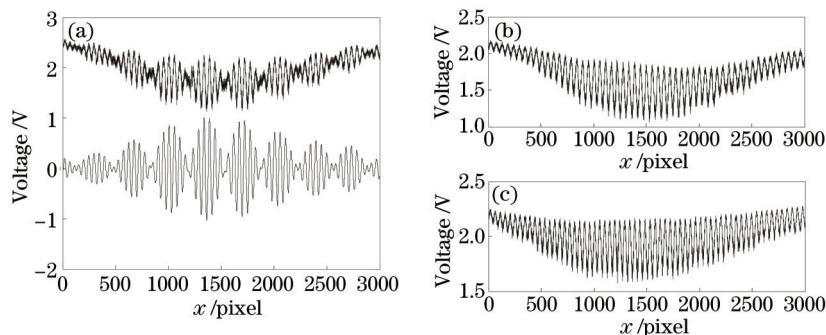


图 7 (a) 双 SLED 光源低相干干涉条纹原始信号及其归一化滤波信号; (b) 仅采用 SLED1 光源的低相干干涉条纹原始信号; (c) 仅采用 SLED2 光源的低相干干涉条纹原始信号

Fig.7 (a) Low-coherence interferogram signal and its normalized filtering signal with two SLEDs; (b) low-coherence interferogram signal with SLED1; (c) low-coherence interferogram signal with SLED2

采用双阈值的任意极值法分别追踪 4 个峰值的解调(见图 8),在 $50\sim 180\text{ kPa}$ 的压力范围内取得了较好的

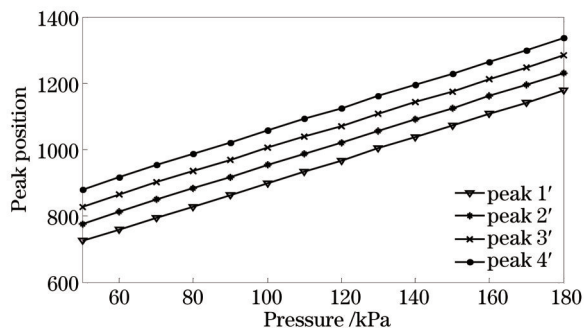


图 8 分别追踪 4 个峰值的解调结果

Fig.8 Demodulation results for tracing four fringe peaks

解调结果。表 1 为追踪不同条纹峰值的压力解调误差,可知双光源低相干干涉系统满量程解调精度在 0.241%~0.317% F.S.之间。

表 1 追踪不同条纹峰值的压力解调误差

Table 1 Pressure demodulation errors for searching different fringe peaks

Peak number	Measure precision /(F.S.)	Maximum error /kPa		Standard deviation /kPa
		Plus	Minus	
1'	0.272%	0.252	-0.351	0.140
2'	0.241%	0.312	-0.279	0.123
3'	0.317%	0.412	-0.376	0.217
4'	0.301%	0.352	-0.342	0.235

在 50~180 kPa 的压力范围内,分别探测各个不同传输距离下的传感器解调精度,光纤长度分别为 0.1、0.5、1、1.5、1.76、2 m。图 9 为在不同的传输距离下分别追踪不同条纹峰值的解调结果,当传输距离小于 1.76 km 时,解调精度随传输距离的变化较小,保持在 0.24%~0.40% F.S.之间;当传输距离达到 2 km 时,解调精度在 1.0%~1.5% F.S.之间。因此,在 1.76 km 的传输距离内,本系统可以取得较好的解调效果。

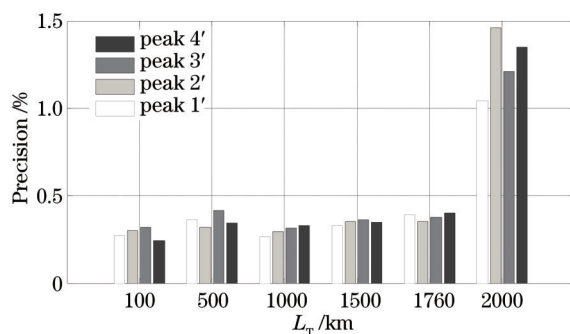


图 9 不同传输距离下的解调精度

Fig.9 Demodulation precision under different distances L_t

4 结 论

基于双 SLED 光源研究了空间电扫描型低相干干涉长距离光纤传感解调系统。引入负透镜,对紧凑解调干涉光路进行设计分析,将解调模块的长度压缩为 85 mm。分析了双 SLED 光源功率比对低相干干涉条纹形态的影响并探讨了传输损耗的功率比补偿,计算结果表明,本系统最大传输距离为 1.76 km,比以往基于 LED 的系统传输距离提高了 10 倍以上。针对双光源低相干干涉条纹的特点,提出了双阈值的任意极值解调算法,避免了条纹峰值的误判。实验结果表明,在 1.76 km 的传输距离内本系统在 50~180 kPa 的压力范围内可保持解调精度在 0.24%~0.40% F.S.之间。

参 考 文 献

- 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.
- Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang, et al.. All-fiber Fabry-Perot interferometer refractive index sensor formed by ring reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1608-1612.
柯涛, 朱涛, 饶云江, 等. 基于环形反射面的全光纤法珀干涉式折射率传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1608-1612.
- Jiang J F, Liu T G, Zhang Y M, 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.
- Li Chuncheng, Wang Ming, Xia Wei, et al.. A novel Fabry-Perot micro-displacement sensor based on intensity demodulation method [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0628001.
李春成, 王鸣, 夏巍, 等. 基于 F-P 腔强度解调的微位移传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628001.
- Zhang Kaiyu, Zhao Hong, Yang Yuqiang, et al.. High voltage electrostatic sensor based on Fabry-Perot interferometer[J]. Acta Optica

- Sinica, 2014, 34(11): 1106002.
张开玉, 赵 洪, 杨玉强, 等. 基于光纤法布里-珀罗干涉仪的高压静电传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106002.
- 6 Larkin K G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white-light interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(4): 832-843.
- 7 Chen S, Rogers A J, Meggit B T. Electronical scanned optical-fiber Young's white-light interferometer[J]. Optics Letters, 1991, 16(10): 761-763.
- 8 Dändliker R, Zimmermann E, Frosio G. Electrically scanned white-light interferometry: A novel noise-resistant signal processing[J]. Optics Letters, 1992, 17(9): 679-681.
- 9 Belleville C, Dulplain G. White-light interferometric multimode fiber optic strain sensor[J]. Optics Letters, 1993, 18(1): 78-80.
- 10 Marshall R H, Ning Y N, Qiang 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.
- 11 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.
- 12 Li Lei, Liu Tiegen, 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 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.
- 13 Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegen, *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.
- 14 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.
- 15 Jiang J F, Wang S H, Liu T G, *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.
- 16 Wu Zhenhai, Liu Tiegen, Jiang Junfeng, *et al.* The effect of thermal stress and residual gas pressure on the thermal response of optical fiber F-P pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0328005.
吴振海, 刘铁根, 江俊峰, 等. 热应力和残余气压对光纤法布里-珀罗压力传感器温度性能的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0328005.
- 17 Rao Y, Ning Y, Jackson D A. Synthesized source for white light sensing system[J]. Optics Letters, 1993, 18(6): 462-464.
- 18 Wang D N, Ning Y, Grattan K, *et al.* Three-wavelength combination source for white light interferometry[J]. Photonics Technology Letters, 1993, 12(5): 1350-1352.
- 19 Wang S H, Jiang J F, Liu T G, *et al.* A simple and effective demodulation method in polarized low-coherence interferometry[J]. Photonics Technology Letters, 2012, 24(16): 1390-1392.

栏目编辑: 王晓琰