

光楔式光纤法布里-珀罗传感器相关干涉信号特性分析

陈青青¹, 唐瑛¹, 王可宁¹, 陈海滨^{1*}, 马志波²¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;²西北工业大学陕西省微/纳米系统重点实验室, 陕西 西安 710072

摘要 为了精确提取相关干涉信号的峰值位置,为光楔式光纤法布里-珀罗传感器的相关干涉解调机制提供理论借鉴,数值模拟了3种典型的光源光谱分布的相关干涉信号,并对所获得的相关干涉信号进行了详细的对比分析,综合讨论了不同光源光谱分布条件下,光谱带宽对相关干涉信号宽度、幅值以及对比度的影响。分析结果表明,当光源在光谱上具有高斯分布且带宽较大时,得到的相关干涉信号噪声较小、条纹更稀疏、信号对比度更高,更便于准确寻峰和实现高精度的解调。

关键词 光纤光学; 光纤法布里-珀罗传感器; 相关干涉信号; 峰值位置; 光谱分布; 信号对比度

中图分类号 TP212.6

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.110603

Characteristic Analysis of Correlation Interference Signals in Optical Wedge Type Fiber Fabry-Perot Sensors

Chen Qingqing¹, Tang Ying¹, Wang Kening¹, Chen Haibin^{1*}, Ma Zhibo²¹ School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;² Shaanxi Provincial of Key Laboratory of Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

Abstract In order to accurately extract the peak positions of correlation interference signals and provide a theoretical reference for the demodulation mechanism of the correlation interference of an optical wedge type fiber Fabry-Perot sensor, the correlation interference signals of three typical spectral distributions of light source are numerically simulated and the obtained correlation interference signals are analyzed in detail. Moreover, the influence of spectral bandwidth on the width, amplitude and contrast ratio of the correlation interference signals is discussed under the condition of different spectral distributions. The analysis results show that the correlation interference signals have relatively small noises, sparse stripes and high signal contrasts when the light source has a Gaussian spectral distribution and a relatively large bandwidth. It is beneficial to search peaks accurately and realize a high precision demodulation.

Key words fiber optics; fiber Fabry-Perot sensor; correlation interference signal; peak position; optical spectral distribution; signal contrast ratio

OCIS codes 060.2330; 060.2370; 060.5060; 060.4510

1 引言

近几十年来,光纤传感伴随光纤通信得到了快速发展,并且已有多种光纤传感技术逐步走出实验室获得实用化,如光纤布拉格光栅(FBG)^[1]、光纤陀螺^[2]、分布式光纤传感^[3]等。光纤传感技术通过使用外界待测量对光纤内传输光进行调制,使传输光

的相位、强度、频率等发生变化,再对调制光信号进行解调,从而实现对待测量的精准测量。

光纤法布里-珀罗传感器,具有质量小、体积小、灵敏度高、动态响应范围大和抗电磁干扰能力强等特点^[4],已被应用于各个领域以对某些物理量进行测量,尤其在桥梁表面应力监测、涡轮发动机压力监测^[5]等领域,有着无可比拟的优势。目前,针对光纤

收稿日期: 2018-04-09; 修回日期: 2018-05-14; 录用日期: 2018-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(31671002)、陕西省光电测试与仪器技术重点实验室开放基金(2015SZSJ-60-3)

* E-mail: chenhaibin@xatu.edu.cn

法布里-珀罗传感器的解调方法主要有强度解调法^[6]和相位解调法^[7]。强度解调法在探测方法和信号处理上更为简单,但解调精度依赖于光强测试精度,光路系统的稳定性、光源的扰动、光路的损耗等均会引起光强的波动,因此具有解调精度低、稳定性差的缺点。弗吉尼亚理工的 Wang 等最早提出了自补偿干涉强度解调的非本征型法布里-珀罗温度传感器,系统通过一个窄带滤波器将反射光分为两束,利用补偿光路的光信号抵消测量光路中的干扰^[8]。而相位解调法分为光谱法和相关法^[9],光谱法又称谱峰跟踪法,是利用法布里-珀罗腔反射光谱中的波峰位置进行解调,分为单峰法、双峰法以及多峰法,解调精度受限于光源的光谱范围以及光谱仪的波长分辨率^[10]。2000年,龚天诚等^[11]成功研制出国内第一台基于傅里叶变换法的相位调制型光纤法布里-珀罗应变仪,但该设备需要用到光谱仪,成本较高。相关法是利用腔长匹配的原理进行解调,在解调光路中使用腔长可变的参考光纤法布里-珀罗腔,该腔的输出与光纤法布里-珀罗传感器的输出在光路中发生相关干涉,尤其是与采用光楔对的光纤法布里-珀罗传感器的输出进行互相关运算完成解调。该解调方法不需要昂贵的光谱仪,同时又没有机械扫描,因此结构紧凑、可靠性高,并且可实现光纤法布里-珀罗传感器复用信号的解调^[12-13]。

光纤法布里-珀罗传感器非扫描相关解调法的关键在于相关干涉信号峰值位置的提取,现多采用卤钨灯、发光二极管(LED)、超辐射发光二极管(SLED)等宽带光源作为光源输入^[14]。不同的光源具有不同的光谱分布,不同的光谱分布相互作用可获得不同的相关干涉信号。但到目前为止,尚未有研究者对光谱分布对相关解调机制中相关干涉信号的影响进行理论分析。为了精确获得峰值位置,解算出腔长,为对光纤法布里-珀罗传感器相关解调机制提供理论借鉴,本文数值模拟分析了3种典型的光谱分布:高斯形、三角形和矩形光谱分布^[15],并对比讨论了不同光谱分布条件下,相关干涉信号的宽度、幅值以及条纹对比度。

2 光纤法布里-珀罗传感器非扫描相关解调原理

典型的光纤法布里-珀罗传感器非扫描相关解调装置主要由宽带光源、 2×1 光纤耦合器、光纤法布里-珀罗传感器、准直器、光楔以及光电荷耦合器(CCD)线阵构成^[16],光纤法布里-珀罗传感器非扫

描相关解调原理如图1所示。宽带光源输出宽带复色光,进入 2×1 光纤耦合器的一个输入端口,由 2×1 光纤耦合器的输出端口进入光纤法布里-珀罗传感器,发生双光束干涉,携带腔长信息的部分宽带光被反射并沿原光路返回,经过 2×1 光纤耦合器后,部分光耦合至准直器,由准直器准直之后转换为一定宽度的大尺寸平行光束,该平行光束由柱透镜聚焦,转换为线状光斑,该线状光斑穿过光楔,被光楔前后两个反射面反射而再次发生多光束干涉,经过光楔后,线状光斑的光强受到调制,调制后的光由 CCD 线阵探测接收。

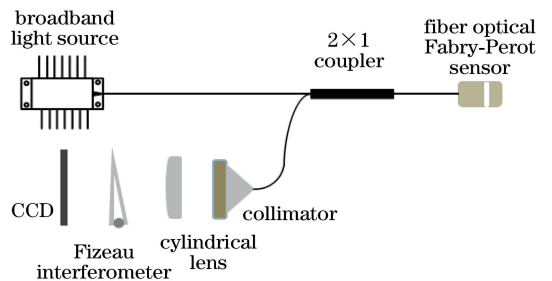


图1 光纤法布里-珀罗传感器非扫描相关解调原理图
Fig. 1 Schematic of non-scan correlation demodulation of fiber Fabry-Perot sensor

光纤法布里-珀罗传感器是由两个相互平行的平面玻璃板或石英板组成,假设单色光从单模光纤入射,当光传输到空气腔的近端面时部分反射,透射部分继续传播,当光传播到空气腔的远端面时,部分被反射的光发生透射,此时前后两束反射光发生干涉。输出光强可根据多光束干涉原理计算得到

$$I_r = \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \delta} \cdot I_i, \quad (1)$$

$$\Delta = 2nL, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot nL, \quad (3)$$

式中: I_i 、 I_r 分别为入射光和反射光的光强; R_1 、 R_2 分别为空气腔近端面、远端面的端面反射率; L 为法布里-珀罗腔的腔长; Δ 为相邻两束反射光之间的光程差; n 为空气折射率; δ 为相应光程差引起的相位差; λ 为光波的波长。

同理,法布里-珀罗传感器输出的干涉光束经过光楔之后的透射光强为

$$I_t = \frac{(1 - R_3)^2}{1 + R_3^2 - 2R_3 \cos [(4\pi \cdot x \tan \theta) / \lambda]} \cdot I_r, \quad (4)$$

式中: I_t 为干涉光束经过光楔之后的透射光强; R_3 为光楔内表面的反射率; x 为光楔短边上的任意位

置; θ 为光楔两面的夹角,则 $x \tan \theta$ 表示 x 位置处的光楔厚度。

由于构成的法布里-珀罗腔周围介质的折射率不一致,两个表面的反射光中有一束反射光发生“半波损失”,因此需考虑由反射引起的附加相位差 π ;此外,系统中采用宽带光源,而不同的光源具有不同的光谱分布,若假设光源在空间上具有高斯分布特性,则在 CCD 线阵上探测到的光信号数学模型可表达为

$$I_{\text{OUT}}(x) = \exp\left[-\frac{(x-x_p)^2}{B_x}\right] I_0 \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi L/\lambda)}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi L/\lambda)} \cdot \frac{(1-R_3)^2}{1 + R_3^2 - 2R_3 \cos[(4\pi \cdot x \tan \theta)/\lambda]} \cdot f(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

式中: I_{OUT} 为线阵 CCD 探测到的光信号输出光强;积分号外第一项为光源在空间上的高斯分布;第二项 I_0 为光源光强随 λ 分布的常量;积分号内第一项为光纤法布里-珀罗传感器的反射光输出项;第二项为光楔的透射输出项;第三项为光源在光谱上的分布,不同的光谱分布具有不同的数学表达式,用 $f(\lambda)$ 表示; x_p 为光源的中心位置; B_x 为光源空间带宽所决定的高斯函数的半峰全宽(FWHM)^[17]; λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别为宽带光源光谱范围的上限和下限。

当外界物理量作用于光纤法布里-珀罗传感器时,法布里-珀罗腔的腔长发生改变,引起两束光的光程差发生改变。根据腔长匹配原理,采用互相关元件光楔实现光纤法布里-珀罗传感器光程差的空间扫描,当光楔厚度与光纤法布里-珀罗传感器的腔长相同时,相关干涉信号输出光强最大。因此,只需确定相关干涉信号输出光强的最大点,则该点对应的光楔厚度即为此刻的腔长值,从而实现非扫描相关解调。

3 不同光谱分布对解调信号的影响

为了分析不同光谱分布对解调信号的影响,选择了3种不同形状的光谱分布曲线,分别为高斯形、三角形以及矩形,3种光谱的分布曲线如图2所示。其中,高斯形与三角形光谱用于模拟 SLED 光源的光谱,矩形光谱用于模拟平坦化的掺铒光纤光源光谱^[18-19]。保证光源发射3 dB 光谱的带宽均相同,各光谱曲线的中心波长、光谱带宽、光谱形状等可通过程序进行设定。从图2中可以看出,3种宽带光源

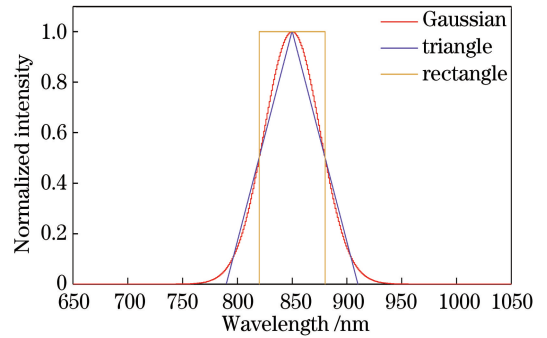


图2 3种光谱分布曲线

Fig. 2 Spectral distribution curves of three kinds of light sources

光谱曲线具有相同的3 dB 带宽时,高斯形光谱曲线的有效谱宽大于三角形光谱曲线的有效谱宽,三角形光谱曲线的有效谱宽大于矩形光谱曲线的有效谱宽。

针对上述3种光源的光谱分布,在不同 $f(\lambda)$ 条件下对(5)式的数学模型进行仿真,得到不同光谱分布下输出光强分布曲线,如图3(a)~(c)所示。其中,3种形状的光谱分布曲线中心波长均为850 nm,光谱覆盖范围为650~1050 nm,3 dB 带宽为60 nm;光纤法布里-珀罗传感器由两块平面玻璃构成,其折射率设为1.5,因此光通过平面玻璃进入空气腔时的端面反射系数 $r = 0.2$,法布里-珀罗腔的端面反射率 $R_1 = R_2 = 0.04$,腔长 $L = 80 \mu\text{m}$;当光楔长度为30 mm,一端厚度为0,另一端为125 μm 时,采用 Matlab 进行仿真得到不同形状光谱分布下光楔上不同位置所对应的输出信号的光强分布曲线。如图3所示,基底信号上叠加了多个相关干涉信号。由于光纤法布里-珀罗传感器端面反射率只有4%,因此,光束在法布里-珀罗腔内的干涉可近似为双光束干涉,且腔长为80 μm 。光楔作为互相关元件,相当于一个腔长可变的法布里-珀罗腔的集合。光楔外表面镀增透膜,内表面镀50%宽带反射膜,因此光束在光楔内发生多光束干涉,当两路光束的光程差相等时,输出相关干涉信号最强,但随着在光楔中反射次数增多,光强逐渐减弱,图中相关干涉信号最强位置(主峰)对应光楔短边 $x = 0.0192 \text{ m}$,从该位置依次向左,各个次峰所对应的光楔短边位置分别为0.0096,0.0064,0.0048 mm,这4个峰值分别对应光楔厚度为80,40,80/3 μm 以及20 μm ,因此主峰对应一倍光程差,该位置依次向左的各个次峰分别对应光楔上两倍光程差、3倍光程差以及4倍光程差。因此,解调时只需确定相关干涉信号最大光强的位置,对应位置的楔厚即为此刻的腔长值。

图 3(d)为 3 种光谱作用下的相关干涉信号最大光强位置附近的局部放大图,对比可以看出,在保证各光谱 3 dB 带宽且光谱范围一致的情况下,相对于三角形光谱、矩形光谱,高斯形光谱作用下输出的光强分布曲线,基底信号噪声小,输出信号条纹稀疏。由图 2 可见,当各个光谱分布的 3 dB 带宽一致时,由于高斯光谱自身的特性,其积分光谱范围大于三角光谱以及矩形光谱。根据(5)式,叠加在相关干

涉信号上的结果可类比于白光干涉现象,各个波长的光形成各自的相关干涉条纹,各组相关干涉条纹相互叠加,光谱范围越大,叠加后的相关干涉信号条纹越稀疏,条纹对比度越高,光强越大。此外,由于宽光谱光源具有较小的相干性,这种弱相干性抑制了噪声的相干,从而对噪声有抑制作用,减小了噪声引入的相干误差^[20]。因此,高斯分布下得到的基底信号噪声较小,仿真结果与理论分析一致。

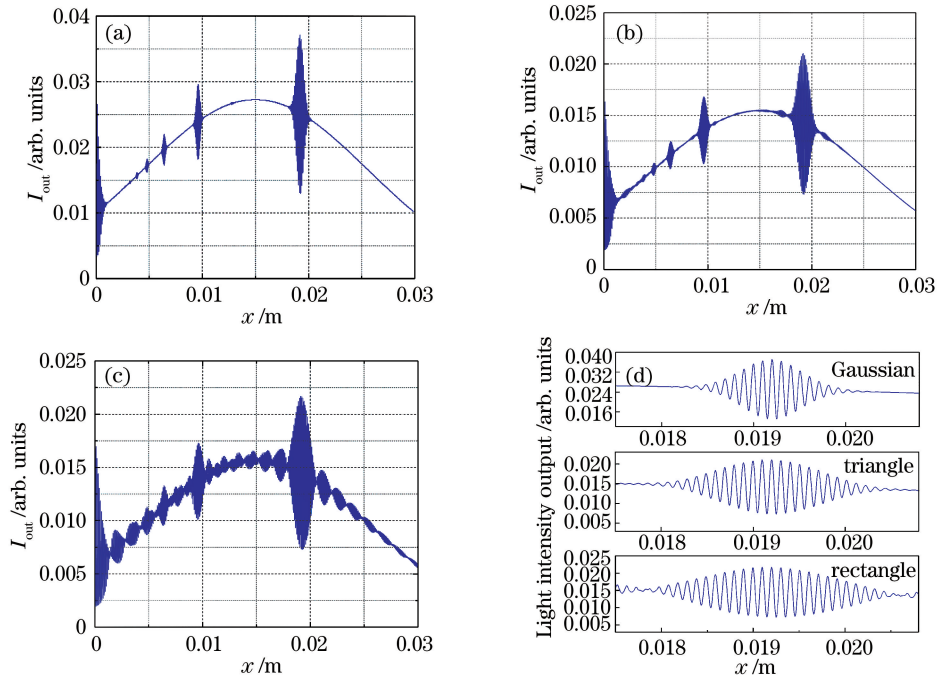


图 3 不同光谱分布下输出光强分布曲线。(a)高斯形;(b)三角形;(c)矩形;(d)(a)~(c) 3 种光谱作用下的相关干涉信号最大光强位置附近的局部放大图

Fig. 3 Curves of output light intensity distributions under different spectral distributions. (a) Gaussian type; (b) triangle type; (c) rectangle type; (d) locally enlarged drawings at maximum intensity of correlation interference signals under three spectra of (a)-(c)

4 光源光谱宽度对相关干涉信号的影响

4.1 光源光谱带宽与信号宽度、幅值的关系

为了分析光源光谱带宽对相关干涉信号的影响,在图 3 的基础上,以高斯形光谱曲线作用下得到的相关干涉信号为例,确定相关干涉条纹的各个极大值点,并对其进行高斯拟合得到信号的近似包络曲线。相关干涉信号的高斯拟合如图 4 所示。以拟合后高斯曲线的幅值 A 以及半峰全宽表征 3 种光谱曲线作用下的相关干涉信号的特征,其结果如图 5 所示。

从仿真结果可看出,当光源光谱带宽增大时,相关干涉信号的半峰全宽呈下降趋势,而其幅值呈上

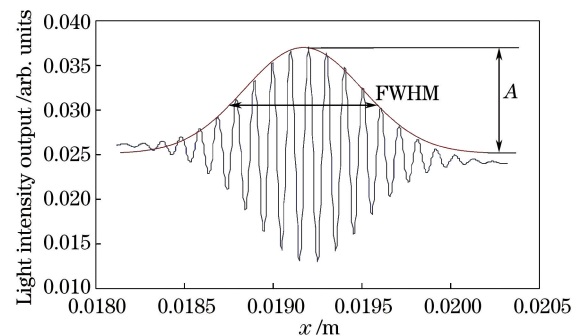


图 4 相关干涉信号的高斯拟合

Fig. 4 Gaussian fitting of correlation interference signal
升趋势。而当 3 种光谱曲线具有相同带宽时,相比三角形光谱、矩形光谱,高斯形光谱作用下得到的相关干涉信号半峰全宽较窄,而信号幅值较高。因此,

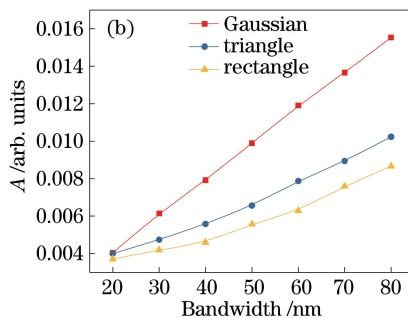
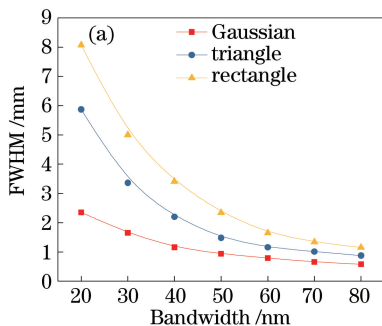


图5 3种光源光谱分布下的相关干涉信号参数的变化曲线。(a)半峰全宽与光谱带宽的关系;(b)幅值与光谱带宽的关系

Fig. 5 Evolution of correlation interference signal parameters under three spectral distributions.

(a) Full width at half maximum versus spectral bandwidth; (b) amplitude versus spectral bandwidth

高斯光谱作用下得到的相关干涉信号条纹稀疏,信号光强大,便于准确寻峰,从而实现高精度解调。这与上述理论分析一致。

4.2 光源光谱带宽与信号对比度的关系

光纤法布里-珀罗传感器非扫描相关解调法的关键在于对经过互相关元件光楔调制后的相关干涉信号进行峰值检测。信号对比度越大,越容易确定峰值位置,精确解算腔长。相关干涉信号的对比度 K 可表示为

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (6)$$

式中: I_{\max} 和 I_{\min} 分别为相关干涉信号输出的最大光强以及最小光强。

根据(6)式计算不同带宽时3种光谱作用下得到的相关干涉信号的对比度 K , 得到3种光源光谱分布下的相关干涉信号对比度与光谱带宽的关系曲线,如图6所示。从图中可以看出,光源光谱带宽越大,相关干涉信号的对比度越高,且同等带宽下,高斯光谱作用下得到的相关干涉信号对比度优于三角光谱和矩形光谱。因采用高斯光谱模拟 SLED 光源的光谱,而目前市场上 SLED 带宽均以 20~60 nm 为主,70 nm 乃至百纳米以上的通常代价极为昂贵,故3种光谱曲线的3 dB带宽均选用60 nm。

5 结论

基于光楔式光纤法布里-珀罗传感器解调方法,利用互相关元件光楔输出的光强与光纤法布里-珀罗传感器的输出光强进行互相关运算,使经过光楔调制后的光强呈现空间分布,当调制后的相关干涉信号输出光强最大时,该位置对应的光楔厚度即为此刻的腔长值。文中数值模拟了3种不同的光源光谱分布曲线,并对获得的干涉信号进行了对比,分析

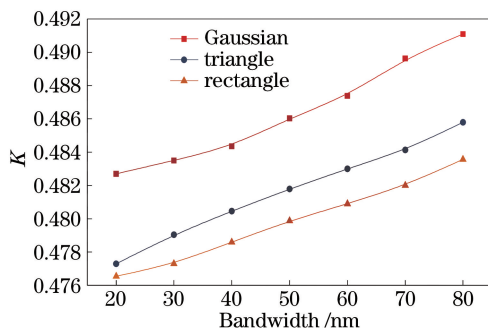


图6 3种光源光谱分布下的相关干涉信号对比度与光谱带宽的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of contrasts versus and spectral bandwidth for correlation interference signals under three spectral distributions

了光源光谱带宽对相关干涉信号宽度、幅值、对比度的影响,相比于三角形分布、矩形分布,光源在光谱上具有高斯分布且较大带宽时得到的相关干涉信号噪声较小,条纹稀疏,信号对比度更高,便于准确寻峰,从而实现高精度解调,该结果为光纤法布里-珀罗传感器的相关干涉解调机制提供了理论借鉴。

参 考 文 献

- [1] Wang Y H, Zhang M Y, Zhang C W, *et al.* Application of enhancement micro FBG strain sensor in model experiment of static pressure precast pile [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050606.
王永洪, 张明义, 张春巍, 等. 增敏微型FBG应变传感器在预制桩模型实验中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050606.
- [2] Xie Z, Yang Y H, Yan H, *et al.* Estimation of distributed polarization coupling error in optical fiber coil of fiber optic gyroscope [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1006004.

- 谢泽, 杨远洪, 闫晗, 等. 光纤陀螺光纤环分布偏振耦合误差预估 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1006004.
- [3] Han L J, Wang Q, Fan X W, *et al.* Underwater gas pipeline leakage diagnostic method by distributed optical fiber sensor based on SPE [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 052801.
- 韩玲娟, 王强, 范昕炜, 等. 分布式光纤传感水下天然气管道泄漏的 SPE 诊断法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 052801.
- [4] Jiang X F, Lin C, Xie H H, *et al.* Optic fiber MEMS pressure sensor based on white light interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 1006003.
- 江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. 白光干涉解调光纤 MEMS 压力传感器 [J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1006003.
- [5] Krisch H, Fernandes N, Gossner K, *et al.* High-temperature fiber-optic sensor for low-power measurement of wide dynamic strain using interferometric techniques and analog/DSP methods [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 33-38.
- [6] Song N F, Cui R Q, Yang Y J, *et al.* Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer sensors with multi-wavelength intensity demodulation [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 470: 630-635.
- [7] Liao H, Lu P, Liu L, *et al.* Phase demodulation of short-cavity Fabry-Perot interferometric acoustic sensor with two wavelengths [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-9.
- [8] Ye C. Research on demodulation method of optical fiber MEMS Fabry-Perot sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- 叶晨. 光纤 MEMS 法布里-珀罗传感器解调方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [9] Chen W M, Lei X H, Zhang W, *et al.* Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328010.
- 陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328010.
- [10] Jang L J. The study on the demodulation methods of optical fiber Fabry-Perot pressure sensor based on spectrum demodulation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- 姜丽娟. 基于光谱的光纤法珀压力传感解调方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [11] Gong T C, Zhu Y, Wang N, *et al.* Analysis and design of non-scanning optical fiber Fabry-Perot demodulator [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2013, 35(6): 801-805.
- 龚天诚, 朱永, 王宁, 等. 非扫描式光纤法-珀解调仪分析与设计 [J]. 压电与声光, 2013, 35(6): 801-805.
- [12] Li L H, Zhu Y, Wang N, *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.
- [13] Wang N, Zhu Y, Gong T C, *et al.* Multichannel fiber Fabry-Perot non-scanning correlation demodulator [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 7(1): 070601.
- [14] Li L H, Zhu Y, Wang N, *et al.* Analysis of the optical fiber Fabry-Perot demodulation system with non-scanning correlation [J]. *Laser Journal*, 2014, 35(4): 26-28.
- 李丽慧, 朱永, 王宁, 等. 光纤法-珀非扫描式相关解调系统分析 [J]. 激光杂志, 2014, 35(4): 26-28.
- [15] Wang F, Zhang Y A, Yang S, *et al.* Research on spatial coherence of light source based on matlab simulation algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092601.
- 王帆, 张永安, 阳胜, 等. 基于 Matlab 仿真算法的光源空间相干性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 092601.
- [16] Li J L, Wang N, Li J S, *et al.* The optical characterization and experiments of fiber Fabry-Perot non-scanning coherent demodulation system based on SLED [J]. *Laser Journal*, 2014, 35(7): 43-45.
- 李金兰, 王宁, 李钧寿, 等. 基于 SLED 的光纤-珀非扫描相关解调系统光学特性分析与实验 [J]. 激光杂志, 2014, 35(7): 43-45.
- [17] Li J S, Zhu Y, Wang N, *et al.* An algorithm for improving the signal stability of the fast fiber optic Fabry-Perot non-scanning correlation demodulation system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0106005.
- 李钧寿, 朱永, 王宁, 等. 一种提高快速光纤法-珀非扫描式相关解调系统信号稳定性的算法 [J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0106005.
- [18] Cao Y. Study on the effect of broad-band source's spectrum characteristic to the fiber optic gyroscope [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.

曹毓. 宽带光源光谱特性对光纤陀螺性能影响的分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.

- [19] Dai Y. Synthesis and fabrication of triangular spectrum fiber Bragg gratings [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- 戴毅. 三角形光谱光纤光栅的设计与制作 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.

- [20] Hu B, Zhang L Z, Xiang Q, *et al.* Analysis of fiber optic gyro performance affected by source spectrum [J]. Control Technology of Tactical Missile, 2009, 26(3): 28-31.

胡斌, 张丽哲, 向强, 等. 光源光谱对光纤陀螺的性能影响分析 [J]. 战术导弹控制技术, 2009, 26(3): 28-31.