

基于光电振荡器和高双折射光纤的应变测量

邴帆^{1,2}, 孙春然³, 王目光^{1,2*}, 张静^{1,2}, 唐宇^{1,2}

(1. 北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044;

2. 北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; 3. 中国北方工业有限公司, 北京 100053)

摘要: 为了改善在复杂电磁环境下应变测量的性能, 提出了一种基于光电振荡器(OEO)和高双折射(Hi-Bi)光纤的新型应变测量方案。应变会引起 Hi-Bi 光纤中快慢轴上传输的 2 个正交偏振光之间的相位差改变, 通过合理控制输入到马赫-曾德尔调制器的光信号的偏振态, 将该相位差变化映射至 OEO 振荡微波信号的频率变化, 进而通过监测频率变化实现应变的解调。理论分析和实验结果表明, OEO 产生的振荡微波信号频率与应变呈线性关系, 所提应变测量方案的灵敏度为 $-369.3 \text{ Hz}/\mu\epsilon$ 。

关键词: 光电振荡器; 高双折射光纤; 应变测量; 光纤传感; 灵敏度

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)03-0043-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Strain measurement based on optoelectronic oscillator and high-birefringence fiber

BING Fan^{1,2}, SUN Chunran³, WANG Muguang^{1,2*}, ZHANG Jing^{1,2}, TANG Yu^{1,2}

(1. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. China North Industries Corp., Beijing 100053, China)

Abstract: In order to improve the performance of strain measurement in complex electromagnetic environment, a novel strain measurement method is proposed based on optoelectronic oscillator (OEO) and high-birefringence (Hi-Bi) fiber. The strain will cause the change of phase difference between the two orthogonal polarized lights transmitted on the fast and slow axes of the Hi-Bi fiber. By properly controlling the polarization state of the light wave sent into the Mach-Zehnder modulator, the phase change is mapped to the frequency change of the OEO oscillating microwave signal. Therefore, the demodulation of strain is achieved by monitoring the frequency change. Theoretical analysis and experiment results show that the frequency of the oscillating microwave signal generated by OEO has a linear relationship with strain, and sensitivity of the proposed measurement method is $-369.3 \text{ Hz}/\mu\epsilon$.

Key words: optoelectronic oscillator, high-birefringence fiber, strain measurement, optical fiber sensing, sensitivity

0 引言

近年来, 光纤传感器因其抗电磁干扰、体积小、损耗低、耐高温、耐腐蚀和工艺简单等优点而受到广泛关注。目前, 已经有多种光纤传感器被先后提出。其中, 基于高双折射(Hi-Bi)光纤的传感器是利用偏振模

干涉原理进行传感, 由于 2 种偏振模式之间存在折射率差, 光经过该光纤时会分离成 2 束具有一定相位差的正交偏振光, 且波长不同相位差不同。当传感量作用于 Hi-Bi 光纤时会导致光谱偏移, 通过监测光谱频率变化实现传感量的解调。基于 Hi-Bi 光纤的传感器已经被应用于应力、温度、扭力和折射率等物理量的测量上^[1-6], 其中最典型的结构主要由 1 段 Hi-Bi 光纤、1 个偏振控制器和 1 个 50/50 (2×2) 光纤耦合器构成 1 个环路, 调整偏振控制器, 使来自 2 种偏振模式的光相互干涉, 通过分析透射光谱变化测量物理参数。例如: SUN G 等人^[2]将 2 种不同类型的 Hi-Bi 光纤熔接, 同时对应变和温度进行了测量; KANG J 等人^[6]利用该结构进行了应变的测量, 灵敏度达到 $1.09 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。但

收稿日期: 2021-03-15。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2006217、61775015)资助。

作者简介: 邴帆(1995—), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 毕业于北京交通大学电子信息工程学院电子科学与技术专业, 主要从事微波光子传感方面的研究工作。

* 通信作者: 王目光(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为光纤传感、微波光子学和光纤通信。



是,这些方案都是通过监测光谱频率变化来解调的,灵敏度不高,且分辨率和检测速度也会受到光谱分析仪的限制。

光电振荡器(OEO)在1996年首次被YAO X S等人^[7]提出,它是由光路和电路组成的高质量谐振器,且已经被广泛应用于产生高频率、高稳定性和低相位噪声的微波信号^[8-10]。除此之外,OEO能将由某一参数引起的光波长或相位变化转换成高品质振荡微波信号的频移。因此,基于OEO的传感器可以通过使用数字信号处理器或光谱分析仪来监控产生的微波信号,并且已经用于实现折射率、温度、应变、磁场和角速度等参数的测量^[11-16]。基于此,本文提出将OEO与Hi-Bi光纤相结合进行应变测量。

1 系统结构和基本原理

基于OEO和Hi-Bi光纤的应变测量方案的系统结构图如图1所示。为了实现应变传感,将1段Hi-Bi光纤与普通的单模光纤熔接,选取其中一定长度的Hi-Bi光纤固定在应力架上。

首先,LD产生连续的线偏振光,通过控制PC1使线偏振光的偏振方向与Hi-Bi光纤的快轴之间的夹角为 α ,假设Hi-Bi光纤的快慢轴分别是 x 和 y 方向,无应变情况下,经过该光纤的 x,y 偏振光之间的相位差 Φ 为

$$\Phi = \Phi_y - \Phi_x = 2\pi \frac{BL}{\lambda} \quad (1)$$

其中, Φ_x, Φ_y 分别为 x,y 偏振光经过Hi-Bi光纤后产生的相位, B 为Hi-Bi光纤的双折射, L 为Hi-Bi光纤传感部分长度, λ 为入射光波长。当Hi-Bi光纤受到轴向应力时,其长度和双折射都会发生改变,由式(1)可知导致相位差的改变量 $\Delta\Phi$ 为

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (B\Delta L + L\Delta B) \quad (2)$$

其中, ΔL 为Hi-Bi光纤轴向长度的改变量, $\Delta L = L\varepsilon$, ε 为Hi-Bi光纤的轴向应变; ΔB 为双折射的改变量。

根据文献[17]可知,当Hi-Bi光纤受到轴向应变的影响时,其双折射会改变,且改变量与应变成正比,即

$$\Delta B = k\varepsilon \quad (3)$$

其中, k 为常数,由Hi-Bi光纤的几何特性和材料所决定。将式(3)代入式(2), $\Delta\Phi$ 表示为

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi L}{\lambda} (B+k)\varepsilon \quad (4)$$

然后,通过控制PC2使 x 偏振光对准MZM的主轴,而 y 偏振光垂直于主轴,MZM具有偏振特性,微波信号对 x 偏振光的调制效率远大于 y 偏振光的调制效率^[18]。当调节MZM的偏置电压,使其工作在最小工作电压时, x 偏振光被MZM载波抑制调制,而 y 偏振光几乎未被调制,直接通过MZM。仅考虑正负一阶边带,输出的光可表示为

$$E_{out}(t) = \begin{bmatrix} 2j\cos\alpha\cos\omega_m t E_0 J_1(\beta) \exp[j(\omega_s t + \Phi_x)] \\ \sin\alpha E_0 \exp[j(\omega_s t + \Phi_y)] \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, E_0, ω_s 分别为LD发出线偏振光的振幅和角频率, $J_1(\beta)$ 是第一类一阶贝塞尔函数, β 为调制指数, t 为时间, ω_m 为OEO产生的振荡微波信号的角频率。

调制后的 x 偏振光被OBPF滤除一个边带,2束正交光被EDFA放大,通过PC3控制2束光的偏振方向使 y 偏振光与Pol主轴的夹角为 θ ,经过Pol后2束光将产生干涉,然后在PD处拍频产生微波信号。根据OEO谐振腔中的相位匹配关系,振荡微波信号的频率 f_m 与2束正交光之间的相位差 Φ 满足以下关系

$$2\pi f_m t_0 + \Phi = 2\pi n \quad (6)$$

其中, n 为正整数; t_0 为OEO环路延时,可表示为

$$t_0 = \frac{n_{eff} L_{OEO}}{c} \quad (7)$$

其中, n_{eff} 为光纤的有效折射率, L_{OEO} 为OEO环路的长度, c 为真空中光速。由式(6)可知,当Hi-Bi光纤产生应变时,会导致振荡微波信号的频率发生改变,如式(8)所示。

$$2\pi(f_m + \Delta f_m)t_0 + (\Phi + \Delta\Phi) = 2\pi n \quad (8)$$

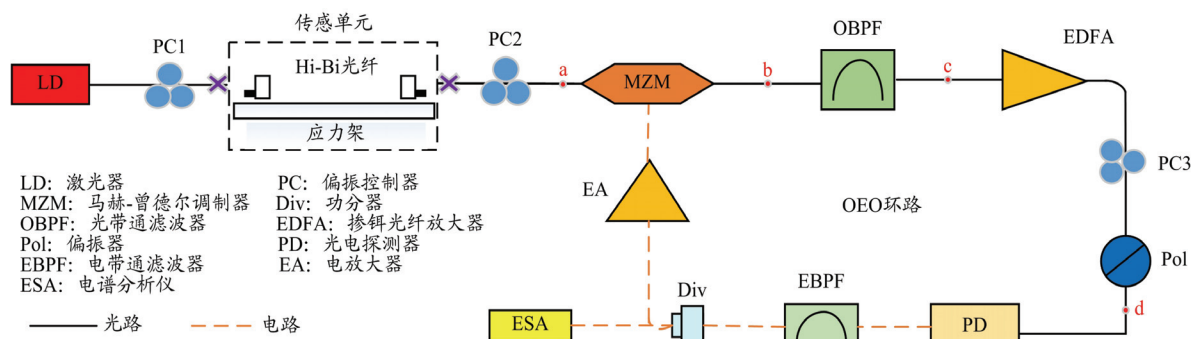


图1 基于OEO和Hi-Bi光纤的应变测量方案系统结构图

其中, Δf_m 为振荡微波信号的频率改变量。结合式(4)和式(6)可以得到应变与振荡微波信号的频率改变量的关系为

$$\Delta f_m = \frac{cL(B+k)}{\lambda n_{\text{eff}} L_{\text{OEO}}} \varepsilon \quad (9)$$

由式(9)可知,OEO输出的振荡微波信号的频率变化与应变呈线性关系。

最后,微波信号经过 Div 被分成 2 路:一路通过 EA 被放大后注入 MZM,另一路连接 ESA 进行频谱测量。光在 OEO 传输过程中光谱的演变情况如图 2 所示,图 2(a)~图 2(d)分别表示图 1 中 a~d 点处的光谱,红色和蓝色的箭头分别表示光信号的 x 偏振态和 y 偏振态,两者相互正交。

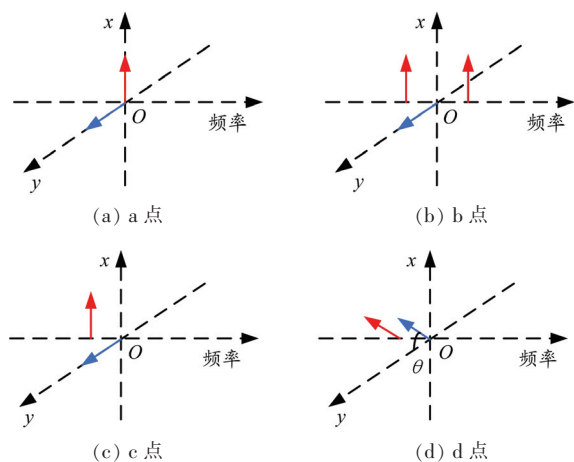


图 2 OEO 各处的光谱演变

本文根据 Hi-Bi 光纤的偏振特性,结合 OEO 采用微波信号进行解调和信号处理时具有高速、高灵敏度、应力检测灵敏度与 OEO 的振荡模式无关的特性,在实际应用中采用低频 OEO 即可实现传感,降低了 OEO 本身以及频率检测部分的成本,而且传感单元位于 OEO 环路外,可实现超远距离测量。

2 实验结果和分析

为验证基于 OEO 和 Hi-Bi 光纤的应变测量方案的可行性,本文按照图 1 搭建了实验系统,具体参数设置如下:LD 输出波长为 1550.001 nm、功率为 7 dBm 的光信号;MZM(JDS Uniphase)的 3 dB 带宽为 10 GHz,半波电压 V_π 为 6.8 V,偏振依赖损耗大约为 8 dB;可编程光滤波器(Finisar,1000S)用作 OBPF,其中心波长和 3 dB 带宽分别设置为 1550.038 nm 和 0.08 nm,用于滤除+1 阶边带;PD(Multiplex, MTRX192L)的 3 dB 带宽为 10 GHz,响应度为 0.8 A/W;EBPF (Sample, BP6200-10-3A1)的中心频率为 6.2 GHz,1 dB 带宽为

10 MHz;EA(JDS Uniphase)的 3 dB 带宽为 10 GHz,饱和输出功率为 24 dBm,可变增益为 14~26 dB;采用 ESA(Agilent,N9010A)对 OEO 的振荡频率进行监测;Hi-Bi 光纤(长飞,PM1550_125-18/250)在 1550 nm 处的拍长不大于 3.5 mm,经计算其双折射 $B \geq 4.429 \times 10^{-4}$ 。

将一段长约 30 cm 的 Hi-Bi 光纤与普通单模光纤熔接,选取其中的 10 cm 作为应变传感元件,通过应力架上的 2 个光纤夹固定。无应变情况下,经过起偏器后的光谱图由光谱分析仪(YOKOGAWA,AQ6370D)监测,如图 3 所示。可以看出,+1 阶边带被 OBPF 滤除,-1 阶边带与+1 阶边带的功率相差大约 13.9 dB。图 4 为无应变时 OEO 输出的振荡微波信号的电谱图,可以看出,输出是一个边模抑制比(SMSR)约为 48 dB、频率为 6.20219 GHz 的振荡微波信号,该信号在频率为 6.19791 GHz 处存在边模,对应的自由光谱范围(FSR)为 4.28 MHz,由 $FSR=c/(n_{\text{eff}}L_{\text{OEO}})$ 可计算出 OEO 环路长度大约为 48 m。

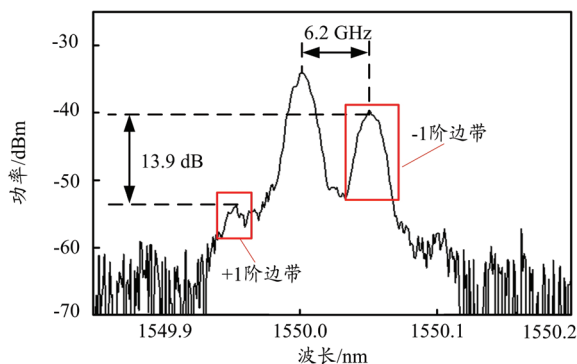


图 3 起偏器输出光谱

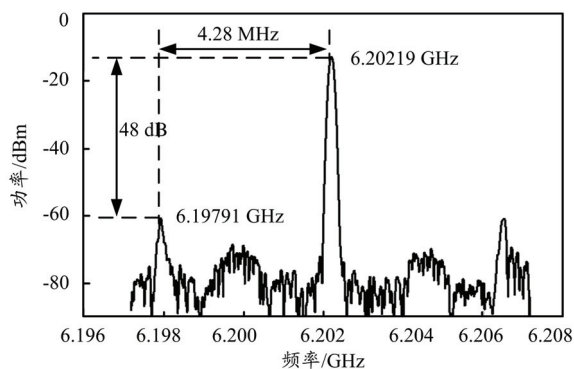


图 4 6.2 GHz 振荡微波信号频谱

从 Hi-Bi 光纤刚好拉直的初始状态开始,扭转应力架上的旋钮,对 Hi-Bi 光纤施加应变 s ,每次增加 $100 \mu\varepsilon$ 直到 $700 \mu\varepsilon$ 为止,并记录对应的 OEO 振荡频率。当应变增加时,Hi-Bi 光纤的应变与振荡微波信号的频率关系如图 5 所示。可以看出,随着光纤应变从 0 增

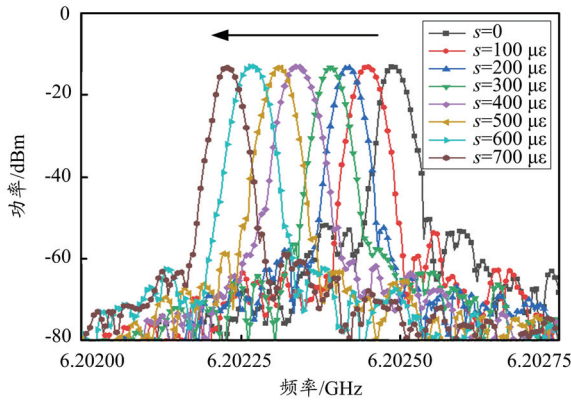


图5 不同应变情况下振荡微波信号的频谱图

加到 $700 \mu\epsilon$, OEO 振荡频率相应减小, 从 6.202489 GHz 变化至低频 6.202228 GHz 。应变与频率的线性回归拟合曲线如图 6 所示。可以看出, 平均线性灵敏度为 $-369.3 \text{ Hz}/\mu\epsilon$, 拟合度 $R^2=0.99664$, 线性拟合度高。实验中的测量误差可能是温度扰动影响了 Hi-Bi 光纤和 OEO 的稳定性以及未能准确地扭转应力架旋钮等原因造成的。

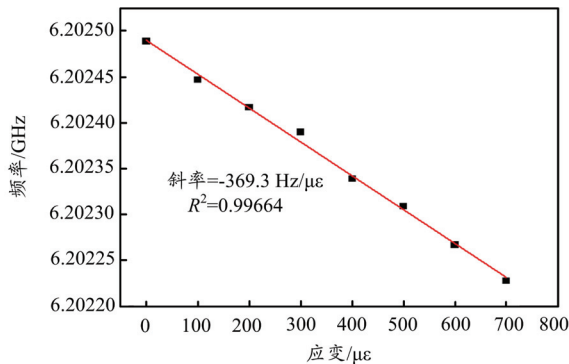


图6 振荡频率与应变的关系曲线

3 结束语

本文提出了一种高灵敏度、高分辨率的应变测量方案, 从理论上推导了 OEO 的振荡频率与 Hi-Bi 光纤轴向应变的灵敏度公式, 理论研究和实验表明: OEO 振荡频率的变化与轴向应变呈线性关系, 实验测量得到所提的应变测量方案的灵敏度为 $-369.3 \text{ Hz}/\mu\epsilon$ 。该测量方案的传感部分位于 OEO 的环路之外, 因此可以进行远距离传感。基于上述优点, 本文提出的应变测量方案可以应用于结构健康监测、管道安全检测和海底地震系统领域。

参考文献:

[1] KIM B H, LEE S H, LIN A, et al. Large temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on the birefringent holey fiber filled with metal indium[J]. Optics Express, 2009, 17(3): 1789–1794.

[2] SUN G, MOON D S, CHUNG Y. Simultaneous temperature and strain measurement using two types of high-birefringence fibers in Sagnac loop mirror[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(24): 2027–2029.

[3] DONG B, ZHOU D P, WEI L. Temperature insensitive all-fiber compact polarization-maintaining photonic crystal fiber based interferometer and its applications in fiber sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 28(7): 1011–1015.

[4] KIM H M, KIM T H, KIM B, et al. Temperature-insensitive torsion sensor with enhanced sensitivity by use of a highly birefringent photonic crystal fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(20): 1539–1541.

[5] FRAZAO O, SILVA R M, SANTOS J L. High-birefringent fiber loop mirror sensors with an output port probe [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 23(2): 103–105.

[6] KANG J, DONG X, ZHU Y, et al. A fiber strain and vibration sensor based on high birefringence polarization maintaining fibers[J]. Optics Communications, 2014(2): 105–108.

[7] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1996, 13(8): 1725–1735.

[8] BLUESTONE A, SPENCER D T, SRINIVASAN S, et al. An ultra-low phase-noise 20-GHz PLL utilizing an optoelectronic voltage-controlled oscillator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(3): 1046–1052.

[9] ZHENG J, SUN W, WANG W, et al. Frequency-doubling OEO using the polarization property of LiNbO₃ modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1864–1867.

[10] WU B, WANG M, SUN J, et al. Frequency- and phase-tunable optoelectronic oscillator based on a DPMZM and SBS effect[J]. Optics Communications, 2016(10): 123–127.

[11] NGUYEN L D, NAKATANI K, JOURNET B. Refractive index measurement by using an optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(12): 857–859.

[12] WANG Y, ZHANG J, YAO J. An optoelectronic oscillator for high sensitivity temperature sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(13): 1458–1461.

[13] YIN B, WANG M, WU S, et al. High sensitivity axial strain and temperature sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator using PMFBG Fabry-Perot filter[J]. Optics express, 2017, 25(13): 14106–14113.

[14] LIU J, WANG M, TANG Y, et al. Switchable optoelectronic oscillator using an FM-PS-FBG for strain and temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(23): 2008–2011.

[15] WU B, WANG M, DONG Y, et al. Magnetic field sensor based on a dual-frequency optoelectronic oscillator using cascaded magnetostrictive alloy-fiber Bragg grating-Fabry Perot and fiber Bragg grating-Fabry Perot filters[J]. Optics express, 2018, 26(21): 27628–27638.

[16] ZHANG J, WANG M, TANG Y, et al. High-sensitivity measurement of angular velocity based on an optoelectronic oscillator with an intra-loop Sagnac interferometer[J]. Optics letters, 2018, 43(12): 2799–2802.

[17] VARNHAM M P, BARLOW A J, PAYNE D N, et al. Polarimetric strain gauges using high birefringence fiber[J]. Electronics Letters, 1983, 19(17): 699–700.

[18] LAWRENCE M. Lithium niobate integrated optics [J]. Reports on Progress in Physics, 1993, 56(3): 363–429.