



结合光电振荡器的高精度光纤轴向应变传感研究

杨帆*, 曾珍, 章令杰, 周晓军

(电子科技大学光电科学与工程学院 成都 610054)

【摘要】 该文提出了利用普通单模光纤作为传感头的结合光电振荡器 (OEO) 的高精度光纤轴向应变传感系统。通过放大自发辐射宽谱光源 (ASE)、双输出马赫曾德尔电光强度调制器 (DOMZM) 和两段长度不一致的光纤构成的马赫曾德尔 (M-Z) 干涉仪, 形成单通带微波光子滤波器, 实现 OEO 腔内的选模。对 M-Z 干涉仪任意一臂的光纤施加轴向应变, 改变干涉仪两臂的长度差, 从而改变 OEO 的输出微波信号频率, 达到轴向应变传感的目的。实验结果表明, 当轴向应变施加于较长的光纤上时, 该传感系统灵敏度为 $4.67121 \times 10^{-4} \text{ GHz}/\mu\epsilon$, 线性度为 0.99895; 当轴向应变施加于较短的光纤上时, 该传感系统灵敏度为 $-4.48388 \times 10^{-4} \text{ GHz}/\mu\epsilon$, 线性度为 0.99841。

关键词 轴向应变光纤传感; 双输出马赫曾德尔电光强度调制器; 微波光子滤波器; 光电振荡器
中图分类号 TN29; TP212.1 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2019292

Research on High-Precision Optical Fiber Axial Strain Sensor Combined with Optoelectronic Oscillator

YANG Fan*, ZENG Zhen, ZHANG Ling-jie, and ZHOU Xiao-jun

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A high-precision optical fiber axial strain sensing system combined with optoelectronic oscillator (OEO), using a section of standard single-mode fiber as the sensing head, is proposed and experimentally demonstrated. In the proposed scheme, the mode selection in the OEO cavity is achieved via a single-passband microwave photonic filter which is realized by an amplified spontaneous emission (ASE) light source, a dual-output Mach-Zehnder electro-optic intensity modulator (DOMZM), and a Mach-Zehnder interferometer (MZI) involving two sections of optical fiber with different length. Through applying axial strain to either arm of the MZI, the length difference between the two arms of the MZI varies. Hence, the frequency of the generated microwave signal in the OEO varies, which is used for axial strain sensing. In the experiment, when the axial strain is applied to the longer fiber, the sensitivity and the linearity are measured to be $4.67121 \times 10^{-4} \text{ GHz}/\mu\epsilon$ and 0.99895, respectively. When the axial strain is applied to the shorter fiber, the sensitivity and the linearity are measured to be $-4.48388 \times 10^{-4} \text{ GHz}/\mu\epsilon$ and 0.99841, respectively.

Key words axial strain optical fiber sensor; dual-output Mach-Zehnder electro-optic intensity modulator; microwave photonic filter; optoelectronic oscillator

应变传感在隧道、桥梁、大坝、滑坡、地面沉降等大型基础设施和特殊地貌区的结构健康监测和灾害预警中具有重要作用。传统的电域应变监测技术主要依靠应变片或振弦式应变传感实现, 其中应变片在潮湿、腐蚀环境下易使零点发生漂移, 并且易受电磁干扰的影响, 不适用于长期检测; 振弦式应变传感由于钢弦丝处于张紧状态易发生蠕变, 因此也不利于长期使用。

与传统的电域应变监测技术相比, 光纤传感技

术具有抗电磁干扰、传输传感一体化、耐高温、耐腐蚀、耐潮湿、灵敏度高及体积小等优点, 特别适用于易燃、易爆、易腐蚀、潮湿和强电磁干扰环境。近年来, 研究人员提出了大量用于应变传感的光纤传感方案, 如光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, FBG)^[1-2]、光纤长周期光栅^[3]、光学干涉法^[4]、光纤布里渊散射及光纤拉曼散射^[5]等。上述方案通常通过光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA) 来检测光功率变化或波长偏移, 实现应变传

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61575037)

作者简介: 杨帆 (1989-), 男, 博士生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: wawling@126.com

感, 但是由于 OSA 的扫描速率和波长分辨率有限, 因此其解调速度和分辨率相对较差。

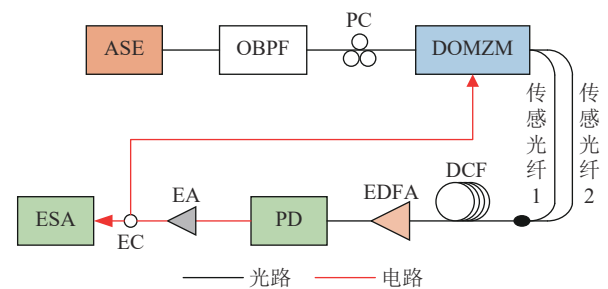
近年来, 光电振荡器 (optoelectronic oscillator, OEO) 在传感、测量和检测等领域获得了越来越多的关注^[6-8]。在这些应用中, 首先将传感参量的变化映射到 OEO 输出微波信号的频率变化, 再利用电频谱分析仪 (electronic spectrum analyzer, ESA) 对微波信号进行频率解调, 可以极大地提高传感系统的解调速度和分辨率。目前, 基于 OEO 的光纤应变传感系统通常利用 FBG 作为传感探头, 其基本原理为应变会导致 FBG 谐振波长的漂移, 从而引起 OEO 输出微波频率的变化^[9-11]。文献 [9] 提出了一种基于双频 OEO 的横向应变传感系统, 采用相移 FBG (phase-shifted FBG, PS-FBG) 作为传感探头, 在其上施加横向应变, 引入双折射效应, 光波的两个正交偏振分量形成两个具有不同中心频率的微波光子滤波器, 从而使得 OEO 产生两个不同频率的微波信号, 其频率差与施加在 PS-FBG 上的横向应变呈线性映射关系, 实验测得其灵敏度和最小可检测应力分别为 $\sim 9.73 \text{ GHz}/(\text{N}/\text{mm})$ 和 $2.06 \times 10^{-4} \text{ N}/\text{mm}$ 。文献 [10] 提出了一种基于保偏光纤布拉格光栅 Fabry Perot 滤波器的双频 OEO, 用于高灵敏度和高速轴向应变传感, 实验测得轴向应变灵敏度高达 $100.6 \text{ MHz}/\epsilon\mu$ 。文献 [11] 采用普通 FBG 作为应变传感探头, FBG 位于光源与 OEO 环路之间, 用于改变输入 OEO 环路的光波中心波长, 造成 OEO 环路总延时的改变, 从而改变 OEO 输出微波信号的频率, 实验测得其灵敏度为 $58 \text{ Hz}/\epsilon\mu$ 。

本文提出了一种利用普通单模光纤作为应变传感头的结合 OEO 高精度光纤轴向应变传感系统, 并对其进行了实验研究。

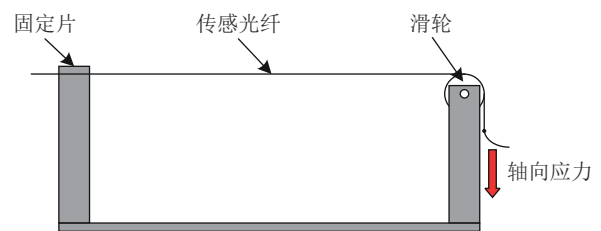
1 实验原理

图 1a 为本文提出的结合 OEO 的高精度光纤应变传感系统结构。放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源发出的宽谱光, 经过光学带通滤波器 (optical bandpass filter, OBPF) 和偏振控制器 (polarization controller, PC) 后, 在双输出马赫曾德尔电光强度调制器 (dual-output Mach-Zehnder electro-optic intensity modulator, DOMZM) 中被 OEO 环路反馈的微波信号所调制, 其中 DOMZM 工作在线性偏置点。DOMZM 的两路输出信号分别通过具有不同长度的传感光纤 1 和传感光纤 2, 在 50:50 光耦合器处合路, 构成 M-Z 干涉仪结构, 实现对宽谱光信号的分割。宽谱光信号经过色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber,

DCF) 传输, 不同波长的信号获得不同延时量, 再由掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 对光信号的功率进行补偿, 经过光电探测器 (photodetector, PD) 形成无限抽头延迟结构的带通微波光子滤波, 实现 OEO 的选模。产生的微波信号经过电放大器 (electrical amplifier, EA) 放大后, 经过 50:50 电耦合器 (electrical coupler, EC) 输出, 一路信号反馈输入至 DOMZM 中构成闭合振荡回路, 一路信号输入至 ESA 进行信号频率检测。轴向应变施加装置如图 1b 所示, 传感光纤 1 或传感光纤 2 的一端通过固定片进行固定, 另一端绕过滑轮通过悬吊砝码施加轴向应变。



a. 结合 OEO 的高精度光纤应变传感系统结构



b. 轴向应变施加装置

图 1 结合 OEO 高精度光纤应变传感系统

OEO 的开环频率响应表达式为^[12]:

$$F(\omega_e) \propto \text{sinc}\left(D_\omega\left(\omega_e - \frac{\Delta L}{vD_\omega}\right)\delta_\omega\right) + \text{sinc}\left(D_\omega\left(\omega_e + \frac{\Delta L}{vD_\omega}\right)\delta_\omega\right) \quad (1)$$

式中, D_ω 为 DCF 的总色散量 (单位为 ps^2); ω_e 为角频率; v 为光波在光纤中的传输速度; ΔL 为 M-Z 干涉仪两臂的长度差; δ_ω 为宽谱光的带宽。从式 (1) 可以看到, OEO 的开环频率响应是一个 sinc 函数, 具有带通特性。当 $\omega_e \pm \Delta L/vD_\omega = 0$ 时, $F(\omega_e)$ 达到最大值, 峰值角频率为:

$$\omega_{\text{osc}} = 2\pi f_{\text{osc}} = \frac{\Delta L}{vD_\omega} \quad (2)$$

当 OEO 环路的净增益大于 0 dB 时, 起振频率即为 f_{osc} 。从式 (2) 可以看到, f_{osc} 与 ΔL 呈线性对应

关系。因此,若在传感光纤 1 或传感光纤 2 上施加轴向应力改变 ΔL , 则 OEO 输出的微波信号频率发生变化,从而达到光纤轴向应变传感的目的。

2 实验结果及分析

实验中, ASE 光源 (Golight, ASE-C+L LIGHT SOURCE) 输出中心频率为 1 565 nm 的宽谱光, 3 dB 带宽为 90 nm。OBPF(Santec, OTF-970) 的中心频率和带宽分别设置为 1 550 nm 和 5 nm。DOMZM (EOSPACE, AX-1×2-0MVS-40-PFA-SFA) 的 3 dB 带宽为 20 GHz, 半波电压为 3.4 V。传感光纤 1 和传感光纤 2 为普通单模光纤, 无轴向应力时, 长度差 ΔL 为 2 cm。DCF 长度和总色散分别为 11.7 km 和 1936.6ps^2 。EA(Mini-Circuits, ZVA-213-S+) 的 3 dB 带宽为 18 GHz, 增益为 26 dB。PD(Agilent, 11982A) 的 3 dB 带宽为 13 GHz, 响应度为 300 V/W, 饱和输入光功率为 10 dBm。EDFA(Amonics, AEDFA-IL-23-B-FA) 用以补偿光链路中光功率损耗, 保证 OEO 腔内净增益能够达到 0 dB 以上实现起振。由式 (2) 计算得到 f_{osc} 理论值约为 8.086 8 GHz。

使用矢量网络分析仪 (VNA) 测得的 OEO 开环频率响应如图 2 所示, 其中中心滤波频率为 8.078 4 GHz, 频率响应曲线为 sinc 函数, 与理论分析一致。

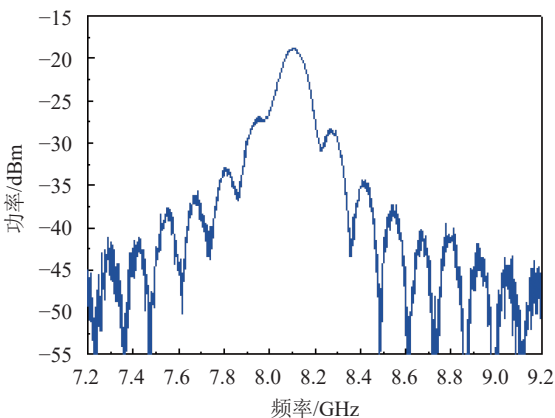


图 2 OEO 开环频率响应测试结果

闭合 OEO 回路, 调节 EDFA 增益使得腔内净增益大于 0 dB, OEO 开始振荡, 并输出微波信号。将较长的传感光纤安装于轴向应变施加装置上, 光纤的自由端悬挂不同重量的砝码用以施加轴向应力, 测量得到的 OEO 输出微波信号频率如图 3 所示。由于 ΔL 随着轴向应力的增大而增大, OEO 输出微波信号的频率也随之增大。图 4 为 OEO 输出微波信号频率与轴向应变变量 (将砝码重量换算成应变值) 的关系。由图 4 可知, 微波信号频率与应变

大小保持线性增长关系, 线性拟合曲线的斜率即传感系统的灵敏度, 其值为 $4.671\ 21 \times 10^{-1}\ \text{GHz}/\mu\epsilon$, 线性度为 0.998 95。将较短的传感光纤安装于应变施加装置上, 并施加不同的轴向拉力, 测量得到的 OEO 输出频谱如图 5 所示。由于 ΔL 随着轴向应变的增大而减小, OEO 输出微波信号的频率也随之减小。图 6 为 OEO 输出微波信号频率与轴向应变变量的关系, 灵敏度为 $-4.483\ 88 \times 10^{-4}\ \text{GHz}/\mu\epsilon$, 线性度为 0.998 41。

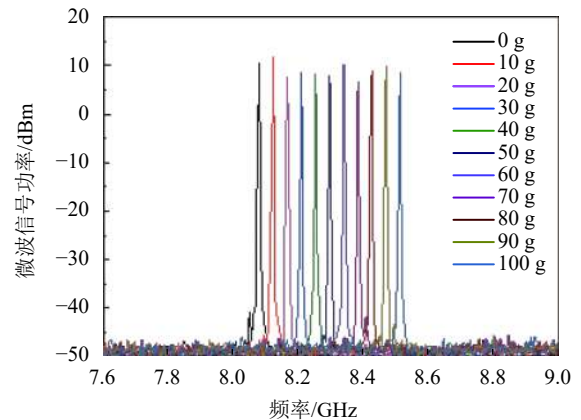


图 3 较长的传感光纤施加不同轴向应力时的 OEO 输出频谱

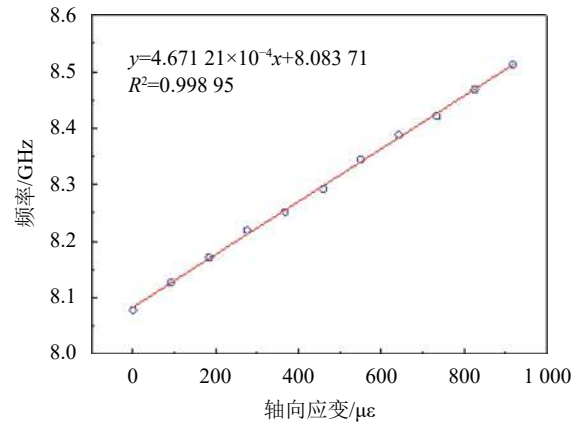


图 4 较长的传感光纤施加不同轴向应力时的 OEO 输出频率

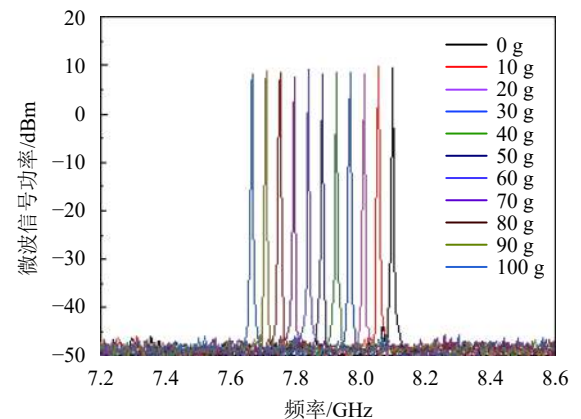


图 5 较短的传感光纤施加不同轴向应力时的 OEO 输出频谱

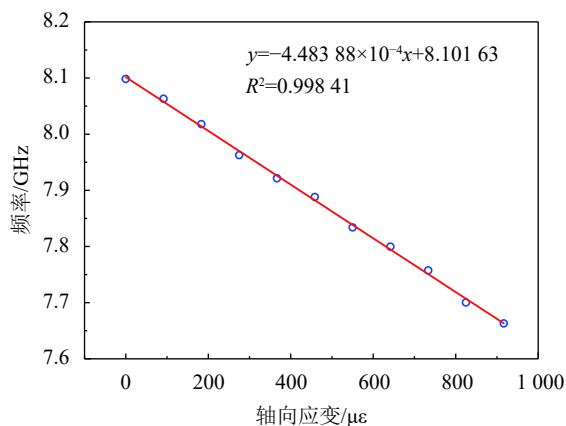


图6 较短的传感光纤施加不同轴向应力时的 OEO 输出频率

微波光子滤波器的通带覆盖多个模式, 因此光电振荡器工作在多模状态。但由于模式竞争, 功率最高的起振模式对应的频率为最靠近微波光子滤波器通带峰值增益的频率。因此, 只要保持 OEO 环路中除了传感光纤以外的光链路(包括: 延迟量和色散量等)以及环内增益的稳定, 功率最高的起振模式频率与轴向应变大小就能保持良好的线性对应关系。

3 结束语

本文提出了一种利用普通单模光纤作为传感头的结合 OEO 高精度光纤轴向应变传感系统, 并进行了实验研究。该传感系统利用 ASE 光源、DOMZM 和两段长度不一致的光纤构成的 M-Z 干涉仪, 在 OEO 腔内实现无限抽头延迟结构的微波光子单通带滤波进行选模。当 M-Z 干涉仪任意一臂的光纤施加轴向应变时, 干涉仪两臂的长度差发生变化, 从而改变 OEO 的输出微波信号频率, 实现轴向应变与 OEO 输出微波信号频率之间的线性映射, 达到轴向应变传感的目的。实验结果表明, 当较长的传感光纤安装于应变施加装置上时, 传感灵敏度为 $4.67121 \times 10^{-4} \text{ GHz}/\mu\epsilon$, 线性度为 0.99895; 当较短的传感光纤安装于应变装置上, 传感灵敏度为 $-4.48388 \times 10^{-4} \text{ GHz}/\mu\epsilon$, 线性度为 0.99841。该系统对轴向应变传感具有高灵敏度和高线性度, 可应用于建筑、边坡、堤坝等的应变检测。

参考文献

- [1] RAO Yun-jiang. In-fiber bragg grating sensors[J]. *Meas Sci Technol*, 1997, 8(4): 355-375.
- [2] CAMPANELLA C E, CUCCOVILLO A, CAMPANELLA C, et al. Fiber bragg grating based strain sensors: review of technology and application[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 3115.
- [3] FU Jin-bo, WANG Ji-cheng, LIU Di, et al. Recent progress in fabrications and applications of heating-induced long period fiber gratings[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4473.
- [4] 雷成秀. 基于全单模和全熊猫光纤马赫-增德尔干涉仪传感器研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
LEI Cheng-xiu. Research on Mach-Zehnder interferometer sensor based on all single mode and all panda fibers[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [5] BAO Xiao-yi, CHEN Liang. Recent progress in brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensor*, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [6] ZOU Xi-hua, LIU Xin-kai, LI Wang-zhe, et al. Optoelectronic oscillators (OEOs) to sensing, measurement, and detection[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2016, 52(1): 1-16.
- [7] FAN Zhi-qiang, SU Jun, ZHANG Tian-huang, et al. High-precision thermal-insensitive strain sensor based on optoelectronic oscillator[J]. *Opt Express*, 2017, 25(22): 27037-27050.
- [8] WANG Yi-ping, WANG Ming, XIA Wei. Optical fiber bragg grating pressure sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2017, 29(21): 1864-1867.
- [9] KONG Fan-qi, LI Wang-zhe, YAO Jian-ping. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(14): 2611-2613.
- [10] YIN Bin, WANG Mu-guang, WU Song-hua, et al. High sensitivity axial strain and temperature sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator using pmfbbg fabry-perot filter[J]. *Opt Express*, 2017, 25(13): 14106-14113.
- [11] XU Zuo-wei, SHU Xue-wen, FU Hong-yan. Fiber bragg grating sensor interrogation system based on an optoelectronic oscillator loop[J]. *Opt Express*, 2019, 27(16): 23274-23281.
- [12] LI Cheng-xin, WANG Ying, WANG Wei, et al. Widely tunable optoelectronic oscillator using a dispersion-induced single bandpass MPF[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2018, 30(1): 7-10.

编辑 税红