

DOI:10.16136/j.joel.2023.02.0192

基于可调谐激光器的光纤光栅高速解调的时延误差补偿方法

唐才杰^{1,2*}, 王学锋^{1,2}, 卞贺明^{1,2}, 王 甫^{1,2}, 阚宝玺^{1,2}, 杨 颀³

(1. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100854; 2. 北京光纤传感系统工程技术研究中心, 北京 100094; 3. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 基于可调谐激光器的光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 解调仪用于 FBG 传感器的远距离、高速测量时, 光传输时延会导致显著的波长解调误差。本文设计了一种补偿光传输时延导致的 FBG 解调误差的方法, 可调谐激光器在工作光频率范围内进行高线性度的正向、反向扫描, 利用正向、反向扫描过程中的光电探测信号的 FBG 反射峰差异, 对光传输时延导致的波长解调误差进行补偿。试验结果表明, 在 50 kHz 解调频率和 100 m 连接光纤长度条件下, 将光传输时延导致的波长解调误差由 2 nm 降低到小于 10 pm。

关键词: 可调谐激光器; 光纤光栅 (FBG); 波长解调; 误差补偿; 光传输时延

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)02-0174-06

Optical delay error compensation method for FBG high-speed interrogator based on tunable laser

TANG Caijie^{1,2*}, WANG Xuefeng^{1,2*}, BIAN Heming^{1,2}, WANG Fu^{1,2}, KAN Baoxi^{1,2}, YANG Sa³

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Optical Fiber Sensing System, Beijing 100094, China; 3. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: Optical transmission delay could induce significant wavelength demodulation error to the fiber Bragg grating (FBG) interrogators based on tunable laser, especially when they are applied for remote and high-speed measurement of FBG sensors. A method for compensating the wavelength demodulation error of FBG induced by optical transmission delay is proposed. The optical frequency of tunable laser scans in up and down two directions with high linearity in its spectrum range. The wavelength demodulation error is compensated by the detected FBG reflection peak difference between up and down-scan spectrums. Experimental results show that, the wavelength demodulation error induced by optical transmission delay can be reduced from 2 nm to less than 10 pm after compensation, with measurement frequency of 50 kHz and optical fiber length of 100 m.

Key words: tunable laser; fiber Bragg grating (FBG); wavelength demodulation; error compensation; optical transmission delay

0 引 言

光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 传感器具有本质安全、抗电磁干扰、体积小、质量轻、易于实现多点准分布式测量等优点, 在航天器、飞机、基

础设施等的试验测试和状态监测中具有广泛的应用^[1-8]。在航天器、发动机等的动应变、振动 FBG 测量或监测应用中, 需要对 FBG 传感器中心波长的高速变化进行测量。基于可调谐激光器的 FBG 解调方法^[9-16], 具有解调频率高、光信号功率大、

* E-mail: tangcaijie@126.com

收稿日期: 2022-03-24 修订日期: 2022-06-08

可测传感器通道数目多、成本相对较低等优势,是光纤光栅传感器中心波长高速变化的重要测量方法。

基于可调谐激光器的 FBG 解调仪,激光器发出的激光经过光器件和连接光纤输入到 FBG 传感器,FBG 传感器的反射光信号再经过光纤和光器件到达 FBG 解调仪的光电探测器。FBG 解调仪和 FBG 传感器之间的连接光纤的传输时延会导致波长测量误差,且该误差随解调频率的增加以及连接光纤长度的增加而增大。当基于可调谐激光器的 FBG 解调仪用于 FBG 传感器的远距离、高速测量时,光传输时延会导致显著的波长解调误差,需要进行补偿^[14,15]。

LI 等^[14]利用光传输时延导致的波长测量误差和激光器扫描频率之间的关系,通过使激光器处于不同的扫描速度实现了光传输时延导致的波长测量误差的补偿,在激光器扫描频率 4 kHz 时,将波长解调误差减小至 10 pm。这种方法需要 FBG 解调仪的激光器至少可以工作在两种不同的扫描频率,对激光器设计和控制的要求高,不适用于频域锁模激光器等具有固定扫描速度的激光器。MEI 等^[15]利用激光器波长从小到大扫描和从大到小扫描时,光传输时延导致的波长测量误差的差异,实现光传输时延导致的波长测量误差的补偿。在激光器扫描频率 25.5157 kHz 时将波长解调误差减小至 50 pm。系统采用压电陶瓷 (PZT) 驱动可调谐滤波器实现激光器波长扫描,受波长扫描非线性的影响,补偿后的波长解调误差仍然较大。

本文采用 DBR (distributed Bragg reflector) 可调谐激光器作为 FBG 解调仪的光源,激光器在工作光频率范围内进行正向、反向扫描;利用光纤干涉仪监测激光器光频率变化,调整控制参数使激光器随时间进行等光频率间隔扫描,降低光频率扫描非线性的影响;根据光传输时延导致的解调误差和激光器光频率扫描方向的关系,对解调结果进行补偿,有效地提高了 FBG 高速测量的准确性。

1 基本原理

1.1 基于 DBR 可调谐激光器的 FBG 解调方案

基于 DBR 可调谐激光器的 FBG 解调系统方案如图 1 所示:包括信号采集处理电路、激光器控制电路、DBR 可调谐激光器、光分路器、光纤耦合器、FBG 传感器、光电探测器及放大电路。在信号采集处理电路的指令下,激光器控制电路控制 DBR 可调谐激光器输出光频率变化的激光;光分路器将激光器输

出光分成多路激光,每一路激光通过光纤耦合器输入一路 FBG 传感器;FBG 传感器的反射光经过光纤耦合器输入光电探测器;信号采集处理电路采集光电探测器及放大电路输出的电信号,完成 FBG 传感器中心波长的解调。

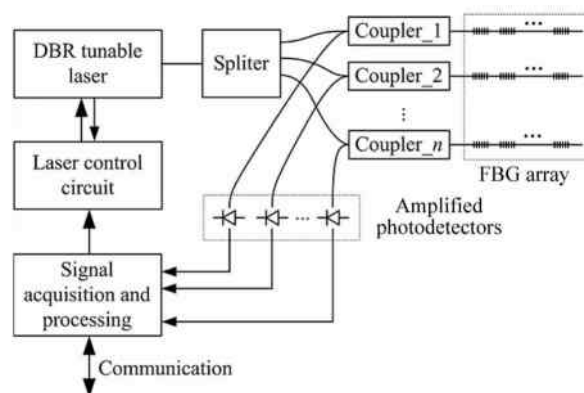


图 1 基于 DBR 可调谐激光器的光纤光栅解调系统

Fig. 1 FBG demodulation system based on DBR tunable laser

1.2 光传输时延导致的解调误差的补偿原理

通过光纤干涉仪监测 DBR 可调谐激光器的输出光频率,调整激光器控制参数使激光器输出光频率锁定在光纤干涉仪输出光谱的半峰值点,从而实现激光器随时间进行等光频率间隔扫描^[11,16]。激光器光频率扫描的光频率间隔为 $\Delta\nu$,时间间隔为 Δt ,激光器光频率随时间变化具有良好的线性,光频率扫描速度为 $S = \Delta\nu/\Delta t$ 。

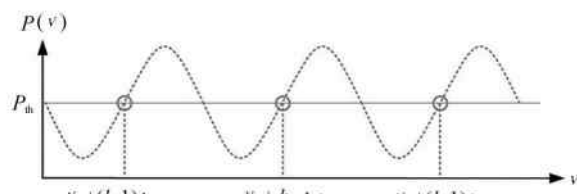


图 2 激光器光频率扫描控制示意图

Fig. 2 Illustration of laser optical frequency control method

以时间间隔 Δt 对光电探测信号进行采样,采样起始时刻和激光器光频率扫描起始时刻相同。在无光传输时延的情况下,DBR 可调谐激光器光频率由小到大扫描(以下简称正向扫描)过程中,不同采样点对应的光频率为:

$$\nu_u(k) = \nu_{0,u} + k \cdot (\Delta\nu), \quad (1)$$

式中, $\nu_{0,u}$ 为 DBR 可调谐激光器正向扫描的起始光频率, k 为采样点序号, $\nu_u(k)$ 为激光器正向扫描过程中第 k 个采样点对应的激光器光频率。

在无光传输时延的情况下, DBR 可调谐激光器频率由大到小扫描(以下简称反向扫描)过程中,不同采样点对应的光频率为:

$$\nu_d(k) = \nu_{0,d} - k \cdot (\Delta\nu), \quad (2)$$

式中, $\nu_{0,d}$ 为 DBR 可调谐激光器反向扫描的起始光频率, $\nu_d(k)$ 为激光器反向扫描过程中第 k 个采样点对应的激光器频率。

在正向扫描或反向扫描过程中, 分别有 N 个采样点, N 为:

$$N = \frac{\nu_{0,d} - \nu_{0,u}}{\Delta\nu}. \quad (3)$$

对采样的光电探测信号进行寻峰值和曲线拟合, 根据激光器正向扫描过程中的光电探测信号计算出 FBG 反射峰对应的采样点序号 $k'_{p,u}$, 根据激光器反向扫描过程中的光电探测信号计算出 FBG 反射峰对应的采样点序号 $k'_{p,d}$ 。 $k'_{p,u}$ 、 $k'_{p,d}$ 包括了 FBG 反射峰真实光频率对应的采样点序号 $k_{p,u}$ 、 $k_{p,d}$, 以及光传输时延导致的采样点序号变化 k_{delay} , 如式(4)、(5)和图 3 所示。

$$k'_{p,u} = k_{\text{delay}} + k_{p,u}, \quad (4)$$

$$k'_{p,d} = k_{\text{delay}} + k_{p,d}, \quad (5)$$

式中, k_{delay} 由 FBG 解调仪与 FBG 之间的连接光纤长度 L 、激光器光频率扫描速度 S 决定, 对于正向扫描和方向扫描是相等的。光传输时延导致的光频率测量误差 $\delta\nu_{\text{delay}}$ 为:

$$\delta\nu_{\text{delay}} = \frac{2nL}{c}S, \quad (6)$$

式中, c 为真空中的光速, n 为光纤的折射率。

对于静态的 FBG, 补偿光传输时延导致的误差后, 激光器正向扫描和反向扫描过程中测量的 FBG 反射峰对应的光频率相等, 如图 3 所示, 即 $\nu_{0,u} + (k'_{p,u} - k_{\text{delay}}) \cdot (\Delta\nu) = \nu_{0,d} - (k'_{p,d} - k_{\text{delay}}) \cdot (\Delta\nu)$, 代入式(3)可得光传输时延导致的采样点序号变化:

$$k_{\text{delay}} = \frac{k'_{p,u} + k'_{p,d} - N}{2}. \quad (7)$$

在 FBG 处于静态时, 多次测量取平均值, 计算出光传输时延导致的采样点序号变化的平均值 $\bar{k}_{\text{delay}}$:

$$\bar{k}_{\text{delay}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} k_{\text{delay},i}. \quad (8)$$

根据 $\bar{k}_{\text{delay}}$ 补偿光传输时延导致的 FBG 解调误差, 得到补偿后激光器正向扫描过程中的 FBG 中心波长测量结果 $\lambda_{\text{FBG},u}$ 和激光器反向扫描过程中的 FBG 中心波长测量结果 $\lambda_{\text{FBG},d}$:

$$\lambda_{\text{FBG},u} = \frac{c}{\nu_{0,u} + (k'_{p,u} - \bar{k}_{\text{delay}}) \cdot (\Delta\nu)}, \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{FBG},d} = \frac{c}{\nu_{0,d} - (k'_{p,d} - \bar{k}_{\text{delay}}) \cdot (\Delta\nu)}. \quad (10)$$

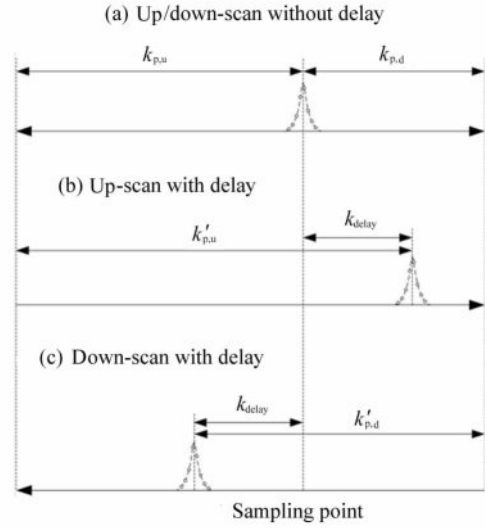


图 3 光传输时延导致的光纤光栅波长解调误差示意图:

(a) 无光传输延时的正/反向扫描探测信号;

(b) 有光传输时延的正向扫描探测信号;

(c) 有光传输时延的反向扫描探测信号

Fig. 3 Illustration of FBG wavelength demodulation error induced by optical transmission delay:

(a) Detected up/down-scan spectrum without delay;

(b) Detected up-scan spectrum with delay;

(c) Detected down-scan spectrum with delay

2 试验与分析

研制的 FBG 解调仪如图 4 所示, DBR 可调谐激光器设计在 191.15—196.15 THz 光频率范围(约 1568.4—1528.4 nm 波长范围)以 50 kHz 频率进行单向扫描或者以 25 kHz 频率进行双向扫描, 光频率扫描平均速度约为 0.25 GHz/ns, 波长扫描平均速度约为 2 pm/ns, 可以实现 FBG 50 kHz 的解调频率。

FBG 施加预应变后粘接在 PZT 两端, 通过任意波形发生器和放大电路对 PZT 施加频率为 f_m 的正弦调制信号, 如图 4 所示, PZT 拉伸 FBG 使 FBG 的中心波长产生频率 f_m 的周期性变化。采用 FBG 解调仪测量 FBG 的波长变化, 记录解调的 FBG 波长变化曲线。通过测量的 FBG 波长变化曲线每个周期的数据点数 M , 可以获得光纤光栅解调频率为 $M \times f_m$ 。

当正弦调制信号频率为 1 kHz 时, 测量的 FBG 波长变化曲线每个周期内的采样点数为 50, 如图 5 (a) 所示; 当正弦调制信号频率为 2.5 kHz 时, 测量

的 FBG 波长变化曲线每个周期内的采样点数为 20, 如图 5(b) 所示; 当正弦调制信号频率为 5 kHz 时, 测量的 FBG 波长变化曲线每个周期内的采样点数为 10, 如图 5(c) 所示; 当正弦调制信号频率为 10 kHz 时, 测量的 FBG 波长变化曲线每个周期内的采样点数为 5, 如图 5(d) 所示。试验结果表明 FBG 解调仪解调频率达到了 50 kHz。

对于航天器、发动机等的试验测试或在线监测, FBG 解调仪和 FBG 传感器之间的连接光纤长度一般不大于 100 m。FBG 解调仪的 DBR 可调谐激光器的光频率平均扫描速度约为 0.25 GHz/ns, 根据式(6)计算出 100 m 连接光纤导致的光频率解调误差可达 245 GHz, 在 1550 nm 波段对应的波长解调误差约为 2 nm。

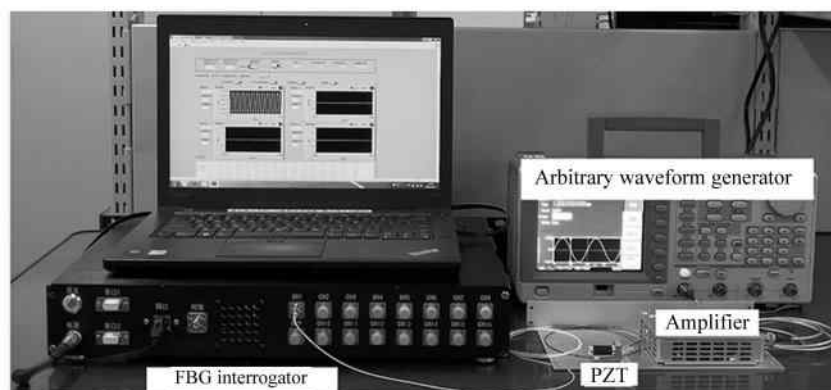


图 4 解调频率测试试验照片

Fig. 4 Experimental setup photo of demodulation frequency characterization

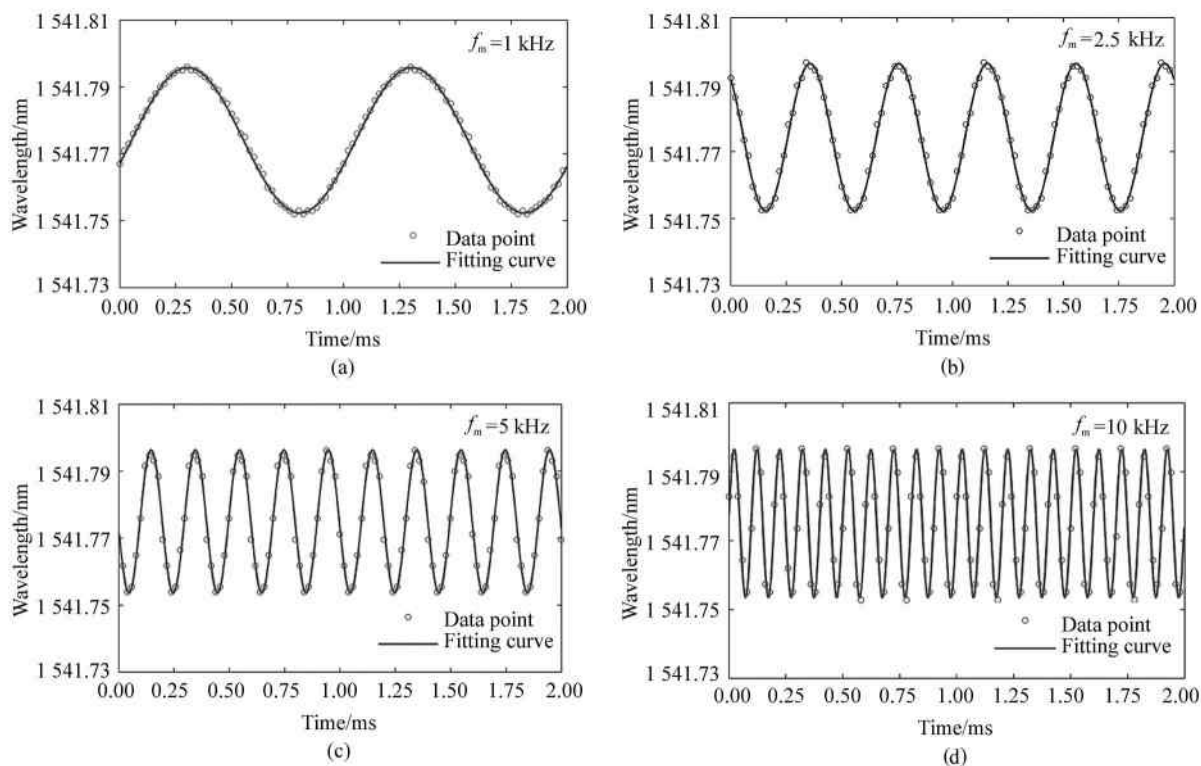


图 5 测量的光纤光栅波长变化曲线: (a) 1 kHz 调制频率; (b) 2.5 kHz 调制频率; (c) 5 kHz 调制频率; (d) 10 kHz 调制频率

Fig. 5 Measured FBG wavelength curves at: (a) 1 kHz modulation frequency; (b) 2.5 kHz modulation frequency;

(c) 5 kHz modulation frequency, (d) 10 kHz modulation frequency

采用 FBG 解调仪测量 3 只恒温控制的 FBG, 在 FBG 解调仪和 FBG 之间接入长度分别为 0 m、

10 m、20 m、30 m、40 m、50 m、60 m、70 m、80 m、90 m、100 m 的连接光纤, 对比测试了补偿前后的

FBG 解调波长,如表 1 所示。将不同连接光纤长度时的波长测试值,减去恒温控制 FBG 直接接入 FBG 解调仪时的波长测量值,获得光传输时延导致的波长解调误差,如图 6(a)、(b)所示,光传输时延导致的波长解调误差随光纤长度的增加而线性增大。如果不进行补偿,当连接光纤长度 100 m 时,光传输时延导致的波长测量误差达到约 2 nm。采用本文提出的方法进行补偿后,连接光纤长度 0—100 m 范围内,

光传输时延导致的波长测量误差为 $-1\sim 7$ pm,如图 6(c)所示。图 6(a)、(b)中光传输时延导致的不同 FBG 波长解调误差随连接光纤长度变化的斜率存在差异,是因为本文中 DBR 可调谐激光器采用的是等光频率扫描速度模式,对应的波长扫描速度在不同波段存在一定的差异。但是对于相同的波长,正向扫描和反向扫描的波长扫描速度是相等的,不影响光传输时延导致的波长解调误差的补偿。

表 1 补偿前后的光纤光栅解调波长

Tab. 1 FBG wavelength demodulation result with and without compensation

Optical fiber length/m	Measured wavelength when laser scans in up direction without compensation/nm			Measured wavelength when laser scans in down direction without compensation/nm			Measured wavelength when laser scans in both directions with compensation/nm		
	FBG1	FBG2	FBG3	FBG1	FBG2	FBG3	FBG1	FBG2	FBG3
0	1534.236	1550.38	1566.403	1533.915	1550.047	1566.073	1534.076	1550.213	1566.238
10	1534.04	1550.18	1566.198	1534.112	1550.247	1566.276	1534.076	1550.214	1566.237
20	1533.84	1549.976	1565.99	1534.311	1550.451	1566.486	1534.075	1550.213	1566.238
30	1533.644	1549.776	1565.785	1534.509	1550.652	1566.689	1534.076	1550.214	1566.237
40	1533.449	1549.577	1565.582	1534.705	1550.852	1566.893	1534.077	1550.215	1566.237
50	1533.26	1549.384	1565.384	1534.898	1551.048	1567.089	1534.079	1550.216	1566.236
60	1533.066	1549.186	1565.183	1535.093	1551.245	1567.292	1534.08	1550.216	1566.238
70	1532.865	1548.98	1564.972	1535.295	1551.452	1567.502	1534.08	1550.216	1566.237
80	1532.671	1548.782	1564.77	1535.491	1551.651	1567.706	1534.081	1550.217	1566.238
90	1532.477	1548.583	1564.57	1535.685	1551.848	1567.91	1534.081	1550.216	1566.24
100	1532.291	1548.391	1564.382	1535.869	1552.035	1568.107	1534.08	1550.213	1566.244

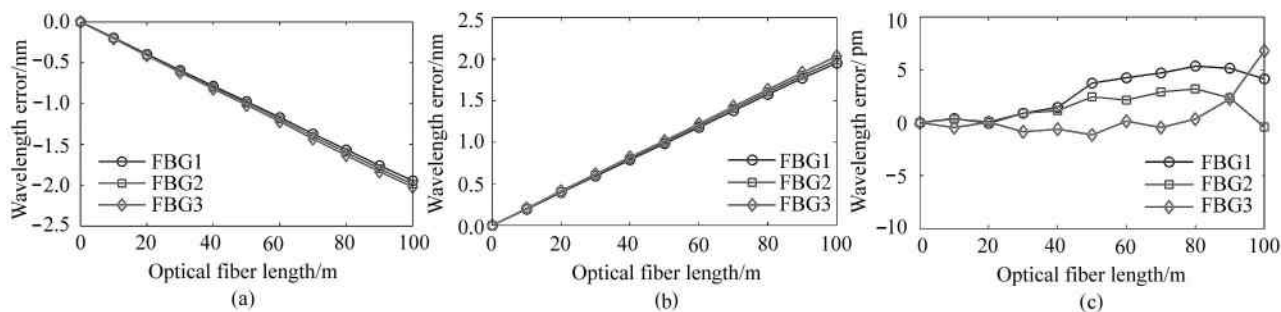


图 6 光纤光栅波长解调误差:(a) 激光器正向扫描不作补偿;(b) 激光器反向扫描不作补偿;(c) 激光器双向扫描并进行补偿

Fig. 6 FBG wavelength demodulation error (a) when laser scans in up direction without compensation,

(b) when laser scans in down direction without compensation and (c) when laser scans in both directions with compensation

3 结 论

针对航天器、发动机等的动应变、振动等高频动态信息的测试或监测需求,开展了基于可调谐激光器的 FBG 高速解调的光传输时延误差补偿研究。设计了一种补偿光传输时延导致的 FBG 解调误差的方法,DBR 可调谐激光器在工作光频率范围内进行高

线性度的正向、反向扫描,利用正向、反向扫描过程中光电探测信号中的 FBG 反射峰位置差异计算出光传输时延导致的波长解调误差并进行补偿。试验验证结果表明,在 50 kHz 解调频率和 100 m 连接光纤长度条件下,本文设计的方法将光传输时延导致的波长解调误差由 2 nm 降低到了小于 10 pm,在航天器、发动机等的动应变、振动等高频动态信息的 FBG

测量中具有重要的应用前景。

参考文献:

- [1] IAIN M K, SELWAN I, EMILE H, et al. Fiber optic sensing in spacecraft engineering: an historical perspective from the european space agency[J]. *Frontier in Physics*, 2021, 9: 719441.
- [2] GAO H C, WANG X F, TANG C J, et al. Research on fiber Bragg grating sensors for strain monitoring at cryogenic temperatures[C]//*Proceedings of SPIE*, March 18, 2021, Guangzhou, China. Bellingham, Washington: SPIE, 2021, 11780: 117801H.
- [3] YAN J, LI W, JIANG M S, et al. Shape perception and three-dimensional reconstruction technology of plate structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106006.
闫洁, 李伟, 姜明顺, 等. 基于光纤光栅传感器的板状结构形态感知与三维重构技术[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106006.
- [4] LIANG L, ZHU Z H, WANG H, et al. Research on testing technology of helicopter blade load based on FBG[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2019, 30(12): 1280-1284.
梁磊, 朱振华, 王慧, 等. 基于光纤光栅的直升机桨叶载荷测试技术研究[J]. *光电子 • 激光*, 2019, 30(12): 1280-1284.
- [5] KAN B X, YANG C, BIAN H M, et al. Humidity influence on embedded fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(S1): S122007.
阚宝玺, 杨超, 卞贺明, 等. 植入式光纤光栅应变传感器的湿度影响[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(S1): S122007.
- [6] GU B, WANG W, SUN Y H, et al. Flexible baseline measurement method for airborne distributed POS based on fiber Bragg grating[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019, 27(3): 307-313.
顾宾, 王巍, 孙一弘, 等. 基于光纤光栅的分布式 POS 柔性基线测量方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2019, 27(3): 307-313.
- [7] XIE R W, ZHANG X Z, WANG S, et al. Research on influencing factors of FBG temperature sensors stability[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2018, 29(4): 363-369.
谢仁伟, 张学智, 王双, 等. 光纤光栅温度传感器稳定影响因素研究[J]. *光电子 • 激光*, 2018, 29(4): 363-369.
- [8] WANG Q N, YANG Y H. Adaptive peak detection algorithm for fiber Bragg grating spectrum based on image processing[J]. *Navigation and Control*, 2016, 15(1): 70-74.
- 王巧妮, 杨远洪. 自适应的光纤布拉格光栅图像寻峰算法[J]. *导航与控制*, 2016, 15(1): 70-74.
- [9] CHU Q L, LIU K, JIANG J F, et al. The error analysis and compensation of fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on tunable laser[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2018, 29(1): 14-21.
楚奇梁, 刘琨, 江俊峰, 等. 基于可调谐激光器的光纤光栅波长解调系统误差分析与补偿[J]. *光电子 • 激光*, 2018, 29(1): 14-21.
- [10] IBRAHIM S K, FARNAN M, KARABACAK D M, et al. Enabling technologies for fiber optic sensing[C]//*Proceedings of SPIE*, April 29, 2016, Brussels, Belgium. Bellingham, Washington: SPIE, 2016, 9899: 98990Z.
- [11] LIANG H G, WANG X F, TANG C J, et al. Research on high-speed dynamic calibration technology of tunable laser[C]//*Proceedings of SPIE*, December 18, 2019, Beijing, China. Bellingham, Washington: SPIE, 2019, 11340: 113400Y.
- [12] ZHENG S H, YANG Y H. High precision and accuracy wavelength tuning characteristics of modulated grating Y-branch tunable lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0201001.
郑胜亨, 杨远洪. 调制光栅 Y 分支可调谐激光器高精度波长调谐特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0201001.
- [13] LIU J, ZHU L Q, HE W, et al. Research on optical interrogation system based on MG-Y tunable diode laser[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 87-96.
刘佳, 祝连庆, 何薇, 等. 基于 MG-Y 型可调谐半导体光源的光纤光栅解调系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3): 87-96.
- [14] LI Z Y, LIU M Y, WANG Y M, et al. Delay calibration method for wavelength-swept laser-based FBG demodulation system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2090-2092.
- [15] MEI J W, XIAO X S, YANG C X. Delay compensated FBG demodulation system based on Fourier domain mode-locked lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(15): 1585-1588.
- [16] WANG M C, TANG C J, WANG X F, et al. An on-line wavelength calibration apparatus and method of DBR tunable laser; Chines Patent, 201711393885.6[P]. 2019-05-24.
王明超, 唐才杰, 王学锋, 等. 一种 DBR 可调谐激光器的波长在线校准装置及方法: 中国专利, 201711393885.6[P]. 2019-05-24.

作者简介:

唐才杰 (1982—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光纤传感技术和光纤测量仪器方面的研究。