

DOI:10.16136/j.joel.2022.01.0125

基于级联 FPI 和 MZI 的游标效应的光纤温度传感器

贾续龙¹, 周雪芳^{1*}, 陈健兰¹, 胡 淼¹, 王天枢²

(1. 杭州电子科技大学 通信工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要:为了兼顾较高温度传感灵敏度和较大的测量范围,提出了一种基于游标效应的级联法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)和马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)的温度传感器,并进行了实验验证。实验中所采用的 FPI 是由两段单模光纤和一个两端镀膜的石英波片构成,其结构稳定且不受恒温箱振动的影响,因此将其用来作为温度传感元件。MZI 作为滤波结构是由两个 3 dB 耦合器自制而成,通过控制两个臂长使其自由光谱范围(free spectral range, FSR)与 FPI 的 FSR 相接近,从而能基于游标效应以级联的方式实现温度传感灵敏度的放大。实验结果表明,在 20 ℃—70 ℃ 的温度变化下,级联干涉仪的温度灵敏度为 72.4 pm/℃,相比于单个 FPI(8.72 pm/℃),该结构将温度传感的灵敏度放大了 8.3 倍,同时还具有较大的测量范围,实验结果与理论相一致。

关键词:温度传感;游标效应;法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI);马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)

中图分类号:TN247 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2022)01-0009-05

Optical fiber temperature sensor based on vernier-effect of cascaded FPI and MZI

JIA Xulong¹, ZHOU Xuefang^{1*}, CHEN Jianlan¹, HU Miao¹, WANG Tianshu²

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: In order to take into account of higher temperature sensing sensitivity and larger measurement range, we proposed a temperature sensor based on the vernier-effect of cascaded Fabry-Perot interferometer (FPI) and Mach-Zehnder interferometer (MZI), and carried out by experiment. The FPI used in the experiment is composed of two sections of single-mode fiber and a quartz wave plate coated at both ends. Its structure is stable and not affected by the vibration of the incubator, so it is used as a temperature sensing element. MZI filter is made up of two 3 dB couplers. By controlling the length of the two arms, the free spectral range (FSR) is close to the FSR of FPI, so that the temperature sensing sensitivity can be amplified in a cascaded manner based on the vernier-effect. The experimental results show that the temperature sensitivity of the cascade interferometer is 72.4 pm/℃ under the temperature change of 20 ℃—70 ℃. Compared with a single FPI (8.72 pm/℃), this structure magnifies the sensitivity of temperature sensing by 8.3 times and has a larger measurement range. The experimental results are consistent with the theory.

Key words: temperature sensor; vernier-effect; Fabry-Perot interferometer (FPI); Mach-Zehnder interferometer (MZI)

* E-mail: zhouxf@hdu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-05 修订日期: 2021-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(601705055)资助和浙江省科技计划公益项目(LGG19F050001)资助项目

1 引 言

从 20 世纪 70 年代以来,光纤传感器以其多种优势如抗电磁干扰、灵敏度高、耐腐蚀且价格低廉等受到了人们的关注,相比于传统的电学式传感器,光纤使传感器更适用于大多数恶劣的环境。而在光纤传感器中,用于温度监测的光纤温度传感器是最早开发也是应用最多的一类传感器,在航空航天、石油化工、电力系统和医学等方面光纤温度传感器都有着广泛的应用。经过这几十年的发展,各种基于不同原理的光纤温度传感结构相继被提出,其中如基于光散射效应的分布式光纤温度传感器^[1,2]、光纤光栅传感器^[3,4]以及干涉型光纤传感器^[5,6]等,其中分布式光纤传感器适用于长距离传感,光纤光栅传感器的传感灵敏度相对较低,而基于光干涉效应的干涉型光纤传感器在小范围、高灵敏度的应用中显然是更好的选择。在干涉型光纤传感中,主要有基于马赫—曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)、法布里—珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)和光纤 Sagnac 干涉仪(fiber Sagnac interferometer, FSI)的光纤传感器,对于这种单个干涉仪的传感结构,虽然其灵敏度远高于光纤光栅传感器,但有时还是不能满足于更高灵敏度的应用,所以在近几年出现了基于游标效应的级联干涉仪结构,其中包括双 MZI 级联^[7,8]、双 FPI 级联^[9-11]和双 FSI 级联^[12-14],结构中两个干涉仪的其中一个作为游标的固定部分,另一个作为游标的滑动部分用于传感,这种方法可以有效将干涉仪的传感灵敏度提高几倍甚至十几倍。另外,采用两个不同灵敏度的干涉仪可避免两者随温度的同步变化带来的影响,文献[15]采用了级联 FSI 和 FPI 的方式使温度传感的灵敏度提高 6 倍达到了 10.28 nm/℃,文献[16]中同样采用级联 FSI 和 FPI 的结构让温度

灵敏度达到 -29 nm/℃,不过,灵敏度的增大也就意味着测量范围的减小,所以合理地选择灵敏度和测量范围很重要。

本文提出了一种基于游标效应的级联 FPI 和 MZI 的光纤温度传感结构,两种干涉仪中 MZI 作为游标的固定部分起到滤波作用,FPI 放入恒温箱中作为游标的滑动部分即传感元件。实验结果表明,该级联传感结构获得了 72.4 pm/℃ 的温度传感系数,相比于单个干涉仪传感灵敏度有了 8.3 倍的提高,该结果与理论相一致。另外,实验中所用的两种干涉仪结构简单成本低廉,系统也易于搭建。

2 实验结构与工作原理

基于游标效应的级联 FPI 和 MZI 的光纤温度传感实验原理图如图 1 所示。实验结构由宽带光源、隔离器(isolator, ISO)、FPI、MZI 和一个波长分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA, YOKOGAWA, AQ6370B)组成。宽带光源是由波长输出为 980 nm 的泵浦激光器和一个 980/1 550 的波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)以及一段长为 5 m 的掺铒光纤(erbium-doped fiber, EDF)构成;FPI 是在两个准直镜中间插入一个两端镀膜的石英波片,入射光波通过准直镜在玻片中来回反射形成干涉光束再通过准直镜输出;而 MZI 是用两个 3 dB 耦合器制作而成,控制两臂长差为 1.86 mm,从而能让两个干涉仪的 FSR 相接近来产生游标效应。

该级联 FPI 和 MZI 的输出光谱取决于两个干涉仪的透射光谱,对于 FPI,它的透射函数 T_{FPI} 可表示为:

$$T_{\text{FPI}} = \frac{(1 - r_1)(1 - r_2)}{1 + r_1 r_2 - 2 \sqrt{r_1 r_2} \cos \varphi_1}, \quad (1)$$

式中, r_1 、 r_2 分别表示镀膜波片两个端面的反射



图 1 光纤温度传感实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber temperature sensing experiment

率, $\varphi_1 = 4\pi n_1 l / \lambda$ 是相邻两个透射光之间的相位差, n_1 和 l 分别为波片的腔内折射率和腔长, λ 则是入射光的波长。

从式中可以看出,当 $\varphi_1 = 4\pi n_1 l / \lambda_m = 2\pi m$ ($m = 0, 1, 2, 3 \dots$, λ_m 表示第 m 阶波峰对应的波长)时,函

数有最大值,对应的则是透射谱的波峰位置,此时有:

$$\begin{cases} 4\pi n_1 l / \lambda_m = 2\pi m \\ 4\pi n_1 l / \lambda_{m+1} = 2\pi(m+1) \end{cases} \quad (2)$$

而 FSR 则可以用两个波峰的波长间隔来表示,

即通过上式可解得 FPI 的自由光谱范围 FSR_{FPI} 为:

$$FSR_{FPI} = \lambda_{m+1} - \lambda_m = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{n_1 l} \approx \frac{\lambda^2}{n_1 l}. \quad (3)$$

从 FPI 的透射函数可以看出,镀膜波片的两个折射率、腔长以入射波长通常是固定不变的,只有腔内折射率 n_1 的改变才会引起透射谱的漂移,因此透射谱受温度变化的漂移量可表示为:

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{\Delta n_{t1} - \Delta n_{t2}}{\Delta n}, \quad (4)$$

式中, $\Delta\lambda$ 表示输出波长随温度变化的漂移量, n_{t1} 和 n_{t2} 分别表示在 t_1 和 t_2 两个不同温度下的光纤折射率。而通常情况下光纤折射率随温度漂移的变化量较小,这也限制了温度传感的灵敏度,而在选择合适的参数下,采用级联的方式可大大提高温度传感的灵敏度。

对于级联的另一个干涉仪光纤 MZI, 它的透射函数同样可表示为:

$$T_{MZI} = \frac{1 - \cos\varphi_2}{2}, \quad (5)$$

式中, $\varphi_2 = 2\pi n_2 \Delta L / \lambda$ 表示入射光经过 MZI 上下两臂汇合后产生干涉而形成的相位差, n_2 表示光纤的折射率(默认两臂光纤为同种光纤的情况下), ΔL 表示两臂的长度差, 同样当 $\varphi_2 = 2\pi n_2 \Delta L / \lambda_m = 2\pi m$ ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$) 时, 透射谱函数将达到最小值, 在波形上表现为波谷, 其自由光谱范围可表示为:

$$FSR_{MZI} = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{n_2 \Delta L} \approx \frac{\lambda_m^2}{n_2 \Delta L}. \quad (6)$$

当两种干涉仪级联时, 输出波形所产生包络的自由光谱范围 $FSR_{envelope}$ 可表示为:

$$FSR_{envelope} = \frac{FSR_{FPI} \cdot FSR_{MZI}}{|FSR_{FPI} - FSR_{MZI}|}. \quad (7)$$

通过仿真模拟 FPI 和 MZI 输出波形如图 2(a) 所示, 设置 FPI 和 MZI 的自由光谱范围分别为 0.7 nm 和 0.8 nm, 两者级联的输出波形即两个波形的叠加结果如图 2(b) 所示, 测得叠加后的波形包络的自由光谱范围为 5.6 nm, 与上述理论一致。

光学游标效应是指通过两个 FSR 相接近的干涉仪级联时, 所产生的包络在相同温度变化量下相比于单个干涉仪的波形漂移量的放大而带来的测量灵敏度的放大, 比如当 MZI 所在环境固定不变, FPI 受到温度变化而发生波形漂移时, 其叠加之后的波形漂移效果会被放大, 这个放大倍数 M_{FPI} 可以表示为:

$$M_{FPI} = \frac{FSR_{MZI}}{|FSR_{FPI} - FSR_{MZI}|}. \quad (8)$$

假设单个 FPI 对温度变化的灵敏度为 C_{FPI} , 则级联放大后的灵敏度系数 C_T 可表示为:

$$C_T = C_{FPI} \times M_{FSI}. \quad (9)$$

另外, 类比于游标卡尺的主尺和副尺, 副尺的刻度小于主尺, 当副尺向右移动时, 两尺所对齐的刻度也是向右移动的, 而这个刻度对应的便是叠加波形中包络的波峰。同时, 副尺的右移也表示主尺的左移, 因此波峰的漂移方向与副尺的移动方向一致, 与主尺的移动方向相反。在两种干涉仪中, FSR 较大的干涉仪对应游标卡尺的主尺, FSR 较小的对应副尺。在上述仿真中, FSR_{MZI} 大于 FSR_{FPI} , 所以叠加波形的包络的漂移方向与 FPI 的波形漂移方向一致。

接下来通过仿真来验证上述理论, 首先改变参数让 FPI 的波形向右漂移 0.5 nm, 如图 3(a) 所示。然后发现叠加波形的包络向右漂移了 4 nm, 如图 3

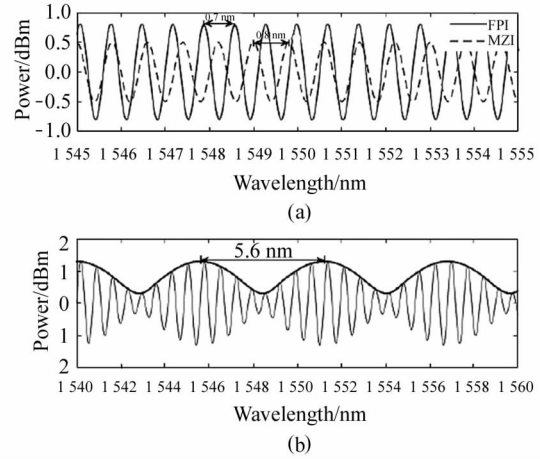


图 2 输出光谱仿真图:(a) 单个干涉仪;(b) 级联干涉仪

Fig. 2 Simulation of spectral output;

(a) Single interferometer; (b) Cascade interferometers

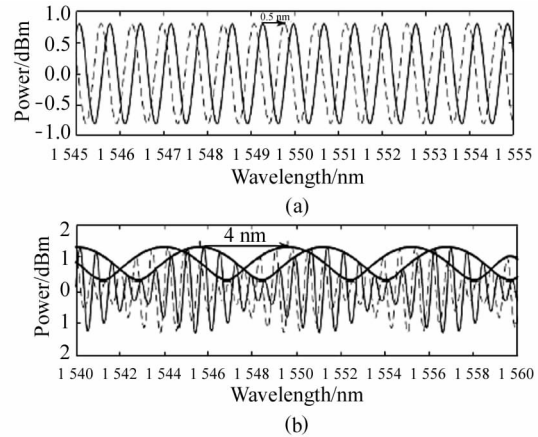


图 3 光谱漂移仿真图:(a) 单个干涉仪;(b) 级联干涉仪

Fig. 3 Simulation of spectral shift;

(a) Single interferometer; (b) Cascade interferometers

(b)所示,波长漂移量实现了 8 倍的放大,放大倍数和漂移方向都与理论一致。

3 实验结果与分析

实验装置如图 1 所示,首先在没有加入干涉仪的情况下,将泵浦仪的输出功率设置为 100 mW,可知 EDFA 自激增益谱在 C 波段是平滑的,所以这里将光谱仪的测量范围调为 1540 nm—1560 nm。然后将泵浦仪输出功率设置为 45 mW 分别测出两种干涉仪的透射光谱,光谱输出实验结果如图 4(a)所示,经测量 FPI 和 MZI 在 1550 nm 附近的自由光谱范围分别为 0.789 nm 和 0.896 nm,根据理论计算可知两者叠加后的波形包络的 FSR 为 6.61 nm,以 FPI 作为温度传感元件时得到的传感灵敏度放大倍数为 8.37。接着将两种干涉仪级联,得到的包络光谱图如图 4(b)所示,三个包络的 FSR 分别为 6.40 nm、6.63 nm 和 6.75 nm,有差异是因为 FSR 与入射光波长有关,其中在 1550 nm 附近的包络值 6.63 nm 与理论值 6.61 nm 接近,所以实验与理论相符合。

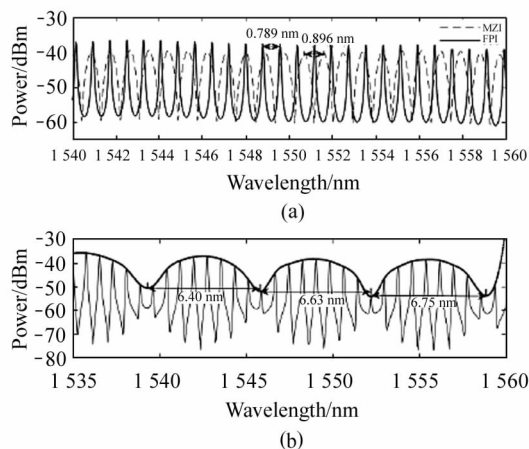


图 4 光谱输出实验结果:

(a) 单个 FPI 和 MZI; (b) 级联 FPI 和 MZI

Fig. 4 Experiment of spectral output:

(a) Single FPI and MZI; (b) Cascade FPI and MZI

接下来进行温度传感的实验,首先将 FPI 放入恒温箱 (TEMI880) 中测量单个 FPI 的温度的灵敏度,其中恒温箱的最小分辨率为 0.01 °C,调节恒温箱温度从 20 °C 和 70 °C 待温度稳定后得到的光谱输出如图 5(a) 所示,在温度变化 50 °C 下光谱右移了 0.436 nm。然后将 FPI 与 MZI 级联在同样条件下得到的输出结果如图 5(b) 所示,在温度变化 50 °C 下

光谱右移了 3.62 nm。由此可见,同等条件下基于游标效应的级联 FPI 和 MZI 结构随温度变化的光谱漂移是单个 FPI 的 8.3 倍,与上述理论计算结果基本一致。

最后,在 20 °C—70 °C 下以 10 °C 为间隔分别测量单个 FPI 以及级联 FPI 和 MZI 的波长漂移与温度变化的关系如图 6 所示,测量结果经线性拟合可见单个 FPI 干涉仪的温度灵敏度为 8.72 pm/°C,而级联后的温度灵敏度为 72.4 pm/°C。与文献[15]的增益系数 6.33 相比,该级联结构的温度增益系数为 8.3。

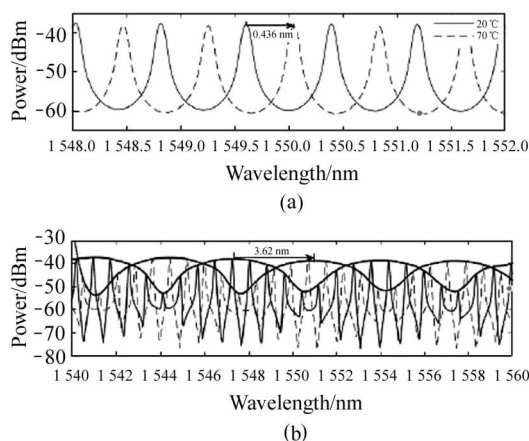


图 5 在 20 °C 和 70 °C 时的测量结果:

(a) 单个 FPI; (b) 级联 FPI 和 MZI

Fig. 5 The measured results at temperature of 20 °C and 70 °C: (a) Single FSI; (b) Cascaded FSI and MZI

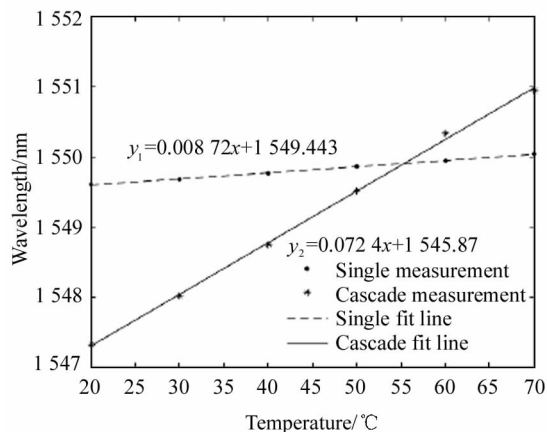


图 6 级联前后输出波长与温度变化的关系

Fig. 6 Relationship between output wavelength and temperature change before and after cascade

4 结 论

综上所述,本文提出的这种基于游标效应的级

联 FPI 和 MZI 温度传感系统中,采用的 FPI 是由两段单模光纤和一个两端镀膜的石英波片构成,因其结构稳定且不受恒温箱振动的影响用于温度传感部分,MZI 是两臂长相差 1.86 mm 的自制干涉仪作为滤波部分。实验结果表明,相比于单个 FPI 干涉仪的 $8.72 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度,这种级联方式可以将其提高到 $72.4 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,增益系数为 8.3,且实验结果与理论一致。本文所设计的这种光纤温度传感器兼顾了温度监测的灵敏度和测量范围,适用范围广,对光纤传感在复杂环境中的应用具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] MOTIL A, BERGMAN A, TUR M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 81-103.
- [2] VICTOR L I, SEBASTIEN L, RAMAN k. High sensitivity distributed temperature fiber sensor using stimulated Brillouin scattering[J]. Opt. Express, 2017, 25(26): 32591-32601.
- [3] GETINET W, KRISTIAN N, ALESSIO S, WOYESSA G, NIELSEN K, STEFANI A, et al. Temperature insensitive hysteresis free highly sensitive polymer optical fiber Bragg grating humidity sensor[J]. Opt. Express, 2016, 24(2): 1206-1213.
- [4] Raffaella Di Sante, Filippo Bastianini. Temperature-compensated fibre Bragg grating-based sensor with variable sensitivity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 75: 5-9.
- [5] LEE B H, KIM Y H, PARK K S, et al. Interferometric fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(3): 2467-2486.
- [6] ZHU T, WU D, LIU M, DUAN D W. In-line fiber optic interferometric sensors in single-mode fibers[J]. Sensors, 2012, 12(8): 10430-10449.
- [7] WANG Z, HUANG L, LIU C, et al. Sensitivity-enhanced fiber temperature sensor based on vernier effect and dual in-line Mach-Zehnder interferometers[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(18): 7983-7987.
- [8] LIN H, LIU F, DAI Y, et al. Cascaded fiber Mach-Zehnder interferometers for sensitivity-enhanced gas pressure measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2581-2586.
- [9] WANG X, CHEN T, MENG D, et al. A simple FBG Fabry-Perot sensor system with high sensitivity based on fiber laser beat frequency and vernier effect[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 71-75.
- [10] ZHANG J, LIAO H, LU P, et al. Ultrasensitive temperature sensor with cascaded fiber optic Fabry-Perot interferometers based on vernier effect[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 1-11.
- [11] TIAN J, LI Z, SUN Y, et al. High-sensitivity fiber-optic strain sensor based on the vernier effect and separated Fabry-Perot interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(21): 5609-5618.
- [12] SHAO L Y, LUO Y, ZHANG Z Y, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect[J]. Optics Communications, 2015, 336: 73-76.
- [13] WANG X, WANG Q. A high-birefringence microfiber Sagnac-interferometer biosensor based on the vernier effect[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4114.
- [14] WU B Q, ZHAO C L, XU B. Optical fiber temperature sensor with single sagnac interference loop based on vernier effect[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE, 2017: 8118631.
- [15] ZHOU X F, ZHOU Y, LI Z Y, et al. Research on temperature sensing characteristics with cascaded fiber Sagnac interferometer and fiber Fabry-Perot interferometer-based fiber laser[J]. Opt. Eng., 2019, 58(5): 057103.
- [16] YANG Y Q, WANG Y G, ZHAO Y X, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor by hybrid cascaded configuration of a Sagnac loop and a F-P cavity[J]. Opt. Express, 2017, 25(26): 33290-33296.

作者简介:

周雪芳 (1976—),女,硕士生导师,副教授,主要从事光纤激光器、光纤传感技术和智能天线技术研究。