

DOI:10.16136/j.joel.2022.10.0880

一种基于 FSI 和 MZI 并联组合的光纤温度传感器

陈健兰¹, 周雪芳^{1*}, 胡 淼¹, 毕美华¹, 杨国伟¹, 王天枢², 忻伶怡¹

(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: 基于并联的干涉型滤波器的游标效应, 设计了一种基于光纤萨格纳克干涉仪 (fiber Sagnac interferometer, FSI) 和马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 并联组合的光纤温度传感器。FSI 由一个 3 dB 的四端口耦合器和一段 6.6 m 的保偏光纤 (polarization maintaining optical fiber, PMF) 组成, 因其具有较高的灵敏度以及较好的稳定性, 将其作为传感腔。MZI 作为参考腔由两个 3 dB 的三端口耦合器自制组成, 通过控制 MZI 两臂的长度, 使这两个干涉仪的自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 相接近但不相等, 利用游标效应来提高该结构的温度灵敏度, 然后通过改变温度来测量单个 FSI 与并联 FSI、MZI 这两种结构的波长漂移情况, 从而探究温度灵敏度的放大情况。实验结果表明, 单个 FSI 的温度灵敏度仅为 $-1.65 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 并联系统可以将其放大到 $12.9 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 增益系数为 7.82, 与理论结果相符, 表明在相同温度下, 并联结构能够明显提高温度传感器的灵敏度。该传感器能在较小的温度变化时呈现明显的波长漂移, 适用于生物和工业领域的温度精细检测。

关键词: 光纤温度传感; 游标效应; 光纤萨格纳克干涉仪 (FSI); 马赫-曾德尔干涉仪 (MZI)**中图分类号:** TP212.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)10-1024-07

An optical fiber temperature sensor based on paralleled of FSI and MZI

CHEN Jianlan¹, ZHOU Xuefang^{1*}, HU Miao¹, BI Meihua¹, YANG Guowei¹, WANG Tianshu², XIN Lingyi¹

(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: Based on the vernier effect of the parallel interference filter, we propose a fiber optic temperature sensor based on the paralleled structure of the fiber Sagnac interferometer (FSI) and the Mach-Zehnder interferometer (MZI). The FSI consists of a 3 dB four-port coupler and a 6.6 m polarization maintaining optical fiber (PMF). Because of its higher sensitivity and better stability, it is used as a sensing cavity. MZI as a reference cavity consists of two 3 dB three-port couplers self-made, by controlling the length of the two arms of MZI, so that the free spectral range (FSR) of the two interferometers is close but not equal, the vernier effect is used to improve the temperature sensitivity of the structure, and then by changing the temperature to measure the wavelength drift of a single FSI and paralleled FSI, MZI, so as to explore the amplification of temperature sensitivity. Experimental results show that the temperature sensitivity of a single FSI is only $-1.65 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, and the paralleled system can amplify it to $12.9 \text{ nm}/^\circ\text{C}$.

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

收稿日期: 2021-12-26 修订日期: 2021-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61705055)、浙江省重点研发计划项目(2019C01G1121168)和浙江省教育厅一般科研项目(Y202146926)资助项目

with a gain coefficient of 7.82, which is consistent with the theoretical results, indicating that the parallel structure can significantly improve the sensitivity of the temperature sensor at the same temperature. And the proposed sensor has significant wavelength drift while a smaller temperature changing which is suitable for fine temperature detection in biological and industrial fields.

Key words: fiber temperature sensor; vernier effect; fiber Sagnac interferometer (FSI); Mach-Zehnder interferometer (MZI)

1 引言

随着光纤通信技术的发展,20 世纪 70 年代出现了光纤传感器,虽然光纤传感器的发展历史不长,但其以优异的传感特性和在偏远恶劣环境中的探测能力迅速发展。在光纤传感器中,温度传感器受到了学者的广泛研究和应用,在生产自动化^[1,2]、医学^[3-5]、航空航天工业等^[6]领域光纤温度传感器都有应用。特别是在生产自动化和医学中,需要光纤温度传感器能在检测小范围的温度变化上有较为明显的变化。

目前已经提出了几种基于不同原理的光纤温度传感器,如基于分布式光纤温度传感器^[7]、干涉型光纤温度传感器^[8,9]、光纤光栅温度传感器等^[10]。其中分布式光纤温度传感器是基于光纤中的散射原理实现的,但传感结构复杂,对阈值功率要求高;干涉型光纤温度传感器是基于传输光的相位调制原理实现的,其结构简单且温度灵敏度高;光纤光栅温度传感器是基于光纤的光敏性,但其灵敏度较低,所以对于干涉型光纤温度传感的研究十分热门。对于干涉型温度传感而言,主要有基于马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[11]、法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)^[12]和光纤萨格纳克干涉仪(fiber Sagnac interferometer, FSI)^[13]的光纤传感器,虽然单个的干涉型温度传感器灵敏度比其他结构的高,但是还是不能满足高灵敏度的需求,所以近几年出现了基于游标效应的干涉仪结构,但是现有的具有游标效应的结构通常都是级联两个

干涉仪,如 2019 年, ZHOU 等提出并实验证明了一种基于级联 FSI 和具有游标效应的光纤 FPI 的小型温度传感器,该结构将温度灵敏度从 $-1.7 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 提高到 $10.28 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ^[14]。2021 年, FU 等提出了一种基于二阶 PbS 光纤 Solc-Sagnac 干涉仪的温度传感器,该结构温度灵敏度为 $55.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 温度范围在 $33.3\text{—}78.8\text{ }^\circ\text{C}$ ^[15]。这些结构的游标效应是通过两个干涉仪不同的梳状光谱来实现的,但是,在上述传感结构中,传感腔和参考腔直接级联,参考腔不能与传感腔完全隔离,会对检测结果造成一定的干扰。并且大多数的研究的都集中在大范围的温度变化下,很少有研究针对小范围的温度变化光纤温度传感器的灵敏度情况。

本文设计了一种基于游标效应的 FSI 和 MZI 并联的光纤温度传感结构,在这两种干涉仪之间, FSI 放入恒温箱中作为被测对象被当成传感腔, MZI 被当成参考腔。实验结果表明,该并联传感结构获得了 $12.9 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的温度传感系数,与单个 Sagnac 干涉仪的传感灵敏度相比,提高了 7.82 倍,该结果与理论一致。该结构不仅消除了传感腔和参考腔之间的干扰,还能测量当温度变化为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 时的波长漂移情况。该温度传感器可用于对温度变化较小但对温度控制要求高(如温度变化范围在 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 左右)的工业自动化和生物医学中。

2 实验结构与工作原理

基于游标效应的 FSI 和 MZI 并联的光纤温度传感器的原理图如图 1 所示。实验结构由宽带光源、

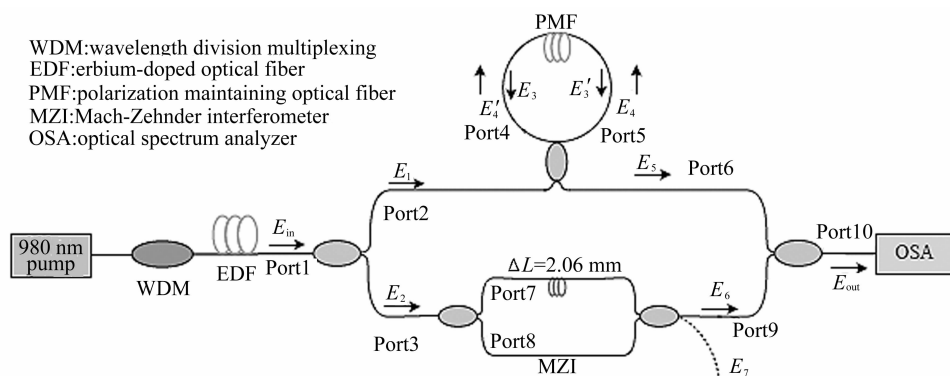


图 1 光纤温度传感器原理图
Fig. 1 Principle diagram of optical fiber temperature sensor

FSI、MZI、3 dB耦合器和一个波长分辨率为0.02 nm的光谱分析仪(OSA, YOKOGAWA, AQ6370B)组成。入射光从1端口进入OC1后被分为两束光,一束光经过3端口,之后进入MZI,从9端口输出;另一束光经过2端口,之后进入Sagnac环,从6端口输出,最后两束光在OC5的耦合器10端口相干输出。其中进入MZI的光即3端口的光进入OC3之后分成两束,一束光经过7端口,另一束光经过8端口,之后两束光在OC4的耦合器9端口输出。而进入Sagnac环的光即2端口的光进入OC2之后分成两束,一束光经过4端口沿顺时针传输,通过沿顺时针传输,通过保偏光纤(polarization maintaining optical fiber, PMF)之后到达OC2的2端口。经PMF之后到达OC2的6端口,另一束光经过5端口沿逆时针传输,通过PMF之后到达OC2的2端口。

根据耦合模理论,其传输特性矩阵为^[18]:

$$\mathbf{T}_{OC} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-k} & j\sqrt{k} \\ j\sqrt{k} & \sqrt{1-k} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{T}_{OC}$ 表示为耦合器的传输特性矩阵,下标OC表示耦合器的含义, k 表示OC的耦合比。

当光入射进入PMF时,保偏和普通单模光纤连接时也会存在一定的夹角,设PMF与固定实验坐标系的X轴夹角为 θ_1 ,即坐标旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

PMF的传输矩阵为:

$$\mathbf{T}_{PMF} = \begin{bmatrix} e^{-j\varphi} & 0 \\ 0 & e^{j\varphi} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, $\varphi = \pi\Delta n L_{PMF}/\lambda$, L_{PMF} 是PMF的长度, Δn 是PMF快慢轴之间的有效折射率差,由于光场顺时针、逆时针通过PMF引入的相位差是一样的,所以反向光经过PMF时传输矩阵是一样的。

MZI的上下臂相位差矩阵为:

$$\mathbf{T}_{MZI} = \begin{pmatrix} e^{j\Delta\phi} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中, $\phi = 2n\pi\Delta L/\lambda$, ΔL 为MZI上下臂长度之差。

假设入射光的光场强度为:

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{in}\cos\theta \\ E_{in}\sin\theta \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中, E_x 和 E_y 分别表示输入光矢量在 x 、 y 坐标轴上的投影。

光进入OC1时,且耦合系数 $k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=0.5$,可描述为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{OC1} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_{in} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

分析 $\mathbf{E}_1$ 的光场情况, $\mathbf{E}_1$ 经过OC2分成两束光为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_3 \\ \mathbf{E}_4 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{OC2} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

分析Sagnac环顺时针方向光场 $\mathbf{E}_3$ 经过PMF后:

$$\mathbf{E}_3 = \begin{pmatrix} E_{3x} \\ E_{3y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_3\cos\theta \\ E_3\sin\theta \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}'_3 &= \begin{pmatrix} E'_{3x} \\ E'_{3y} \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\theta_1) \times \mathbf{T}_{PMF} \times \mathbf{R}(\theta_1) \times \begin{pmatrix} E_{3x} \\ E_{3y} \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{-j\varphi}\cos\theta_1\cos(\theta_1-\theta) - e^{j\varphi}\sin\theta_1\sin(\theta_1-\theta) \\ -e^{-j\varphi}\sin\theta_1\cos(\theta_1-\theta) - e^{j\varphi}\cos\theta_1\sin(\theta_1-\theta) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

分析Sagnac环逆时针光场 $\mathbf{E}_4$ 经过PMF后:

$$\mathbf{E}_4 = \begin{pmatrix} E_{4x} \\ E_{4y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_4\cos\theta \\ E_4\sin\theta \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}'_4 &= \begin{pmatrix} E'_{4x} \\ E'_{4y} \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\theta_1) \times \mathbf{T}_{PMF} \times \mathbf{R}(\theta_1) \times \begin{pmatrix} E_{4x} \\ E_{4y} \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{-j\varphi}\cos\theta_1\cos(\theta_1+\theta) - e^{j\varphi}\sin\theta_1\sin(\theta_1+\theta) \\ e^{-j\varphi}\sin\theta_1\cos(\theta_1+\theta) + e^{j\varphi}\cos\theta_1\sin(\theta_1+\theta) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

最后两束光回到OC2为:

$$\mathbf{E}_5 = \mathbf{T}_{OC} \begin{pmatrix} \mathbf{E}'_3 \\ \mathbf{E}'_4 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{E}_5 = \begin{pmatrix} E_{5x} \\ E_{5y} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} [e^{-j\varphi}\cos\theta_1\sin\theta_1\sin\theta + e^{j\varphi}\sin\theta_1\cos\theta_1\sin\theta] \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} [e^{-j\varphi}\sin\theta_1\cos\theta_1\cos\theta + e^{j\varphi}\cos\theta_1\sin\theta_1\cos\theta] \end{bmatrix}, \quad (13)$$

分析 $\mathbf{E}_2$ 的光场情况, $\mathbf{E}_2$ 通过OC3进入MZI上下两臂,上臂与下臂之间有个相位差,之后在通过OC4相干干涉,输出为 $\mathbf{E}_6$ 、 $\mathbf{E}_7$ 。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_6 \\ \mathbf{E}_7 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{OC} \times \mathbf{T}_{MZI} \times \mathbf{T}_{OC} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_2 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{4} \begin{pmatrix} (e^{j\Delta\phi} - 1)j \\ -e^{j\Delta\phi} - 1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{E}_7 = \begin{pmatrix} E_{7x} \\ E_{7y} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{4} (e^{j\Delta\phi} + 1)\cos\theta_2 \\ -\frac{\sqrt{2}}{4} (e^{j\Delta\phi} + 1)\sin\theta_2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

最后 $\mathbf{E}_5$ 、 $\mathbf{E}_7$ 通过OC5之后,得到FSI与MZI并

联之后的透射谱为:

$$T_{\text{out}} = \cos^2 \varphi \cos^2 \theta_1 \sin \theta_1 + \frac{1}{2} \cos \varphi \sin \Delta \phi$$

$$\cos \theta_1 \sin \theta_1 \sin(\theta - \theta_2) + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} \cos \Delta \phi. \quad (16)$$

两个相邻波谷之间的间隔被定义为自由光谱范围(free spectral range, FSR), MZI 的自由光谱范围可以表示为:

$$FSR_{\text{MZI}} = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{n \Delta L} \approx \frac{\lambda_m^2}{n \Delta L}, \quad (17)$$

式中, λ_m ($m = 0, 1, 2, 3 \dots$) 为第 m 阶波峰对应的波长。

FSI 的 FSR 为:

$$FSR_{\text{FSI}} = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{n \Delta L} \approx \frac{\lambda_m^2}{n \Delta L}. \quad (18)$$

当 PMF 所在的环境温度发生变化时, 会导致其双折射系数 Δn 发生变化, 从而引起透射谱的漂移, 受温度变化影响的透射谱漂移可以表示为:

$$\Delta \lambda = \lambda \frac{\Delta n_{T_1} - \Delta n_{T_2}}{\Delta n}, \quad (19)$$

式中, $\Delta \lambda$ 表示波长随温度的漂移, Δn_{T_1} 和 Δn_{T_2} 分别表示光纤在 T_1 和 T_2 两个温度下的折射率。一般情况下, 光纤的折射系数随温度变化并不大, 因此限制了温度传感的灵敏度。

当两种干涉仪并联时, 输出波形所产生的包络的自由光谱范围 FSR_{envelope} 可表示为:

$$FSR_{\text{envelope}} = \frac{FSR_{\text{FSI}} \times FSR_{\text{MZI}}}{|FSR_{\text{FSI}} - FSR_{\text{MZI}}|}. \quad (20)$$

通过 Matlab 软件仿真模拟 FSI 和 MZI 的输出波形如图 2 所示, 设置 FSI 和 MZI 的自由光谱范围分别为 0.9 nm 和 0.8 nm。

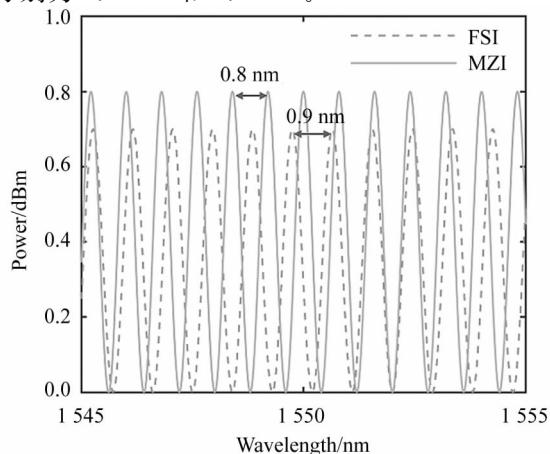


图 2 单个干涉仪输出光谱仿真图

Fig. 2 Simulation results of output spectrum of single interferometer

两者并联的输出波形如图 3 所示, 经过测量得到并联后波形包络的 FSR 为 7.2 nm, 与理论值一致。

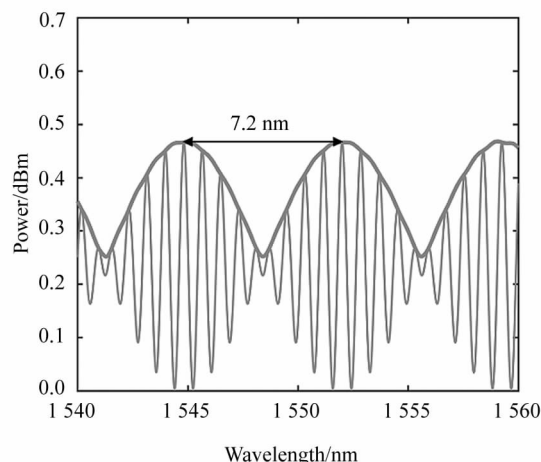


图 3 并联干涉仪输出光谱仿真图

Fig. 3 Simulation results of output spectrum of paralleled interferometer

光学上的游标效应主要是利用两个 FSR 相近的传感腔, 将两个传感器的光谱叠加起来, 会产生一个新的包络。在相同温度变化下, 新的包络比单个干涉仪的漂移量要大, 因而使温度传感器的灵敏度放大。放大倍数可以表示为:

$$M = \frac{FSR_{\text{MZI}}}{|FSR_{\text{FSI}} - FSR_{\text{MZI}}|}. \quad (21)$$

假设单个 FSI 对温度变化的灵敏度为 C_{FSI} , 因此并联放大后的温度灵敏系数 C_T 为:

$$C_T = -C_{\text{FSI}} \times M, \quad (22)$$

式中, $-C_{\text{FSI}}$ 不是代表 FSI 的温度灵敏度是负值, 而是代表波形的漂移方向, 假定温度升高时波形向右漂移为正, 即负值代表 FSI 在温度升高时, 波形向左漂移。并联后包络的峰值与游标卡尺原理类似, 即包络的峰值与较小的 FSR 漂移方向一致, 与较大的 FSR 漂移方向相反。为了验证上述理论, 在 Matlab 仿真中改变 FSI 参数, 使其左漂移 0.5 nm, 得到结果如图 4 所示, FSI1 代表漂移 0.5 nm 后的波形, FSI2 表示未漂移前的波形, 从图 4 可看出, 波形是向左在漂移。

从图 5 中也可看出: 并联后的包络向右漂移了 4 nm, 与单个 FSI 结构相比, 并联结构放大了 8 倍。因此验证了上述理论, 还验证了并联后放大的温度灵敏系数与理论值一致。

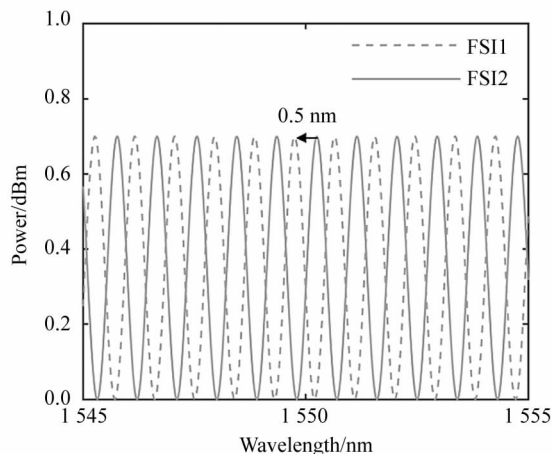


图4 单个FSI的光谱温漂仿真图

Fig. 4 Simulation results of spectral temperature drift under single FSI conditions

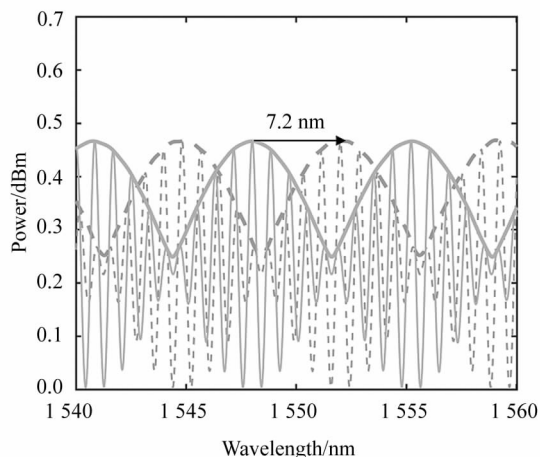


图5 并联干涉仪的光谱温漂仿真图

Fig. 5 Simulation results of spectral temperature drift under paralleled interferometer

3 实验结果与讨论

根据前面的理论分析和图1的实验结构进行实验测试。Sagnac环中PMF的双折射系数为 4.02×10^{-4} ,长度为6.6 m。MZI通过光纤熔接器将上下臂之间的长度差距控制在2.06 mm,目的是为了使MZI与FSI的FSR相接近,从而有效地运用游标效应。首先将泵浦仪的输出功率设置在100 mW,对两种干涉仪的透射谱进行了测量,光谱仪的输出结果如图6所示,经过实验测量FSI和MZI在1548—1551 nm的FSR,进行取平均,得到FSI和MZI的FSR分别为0.906 3 nm和0.804 3 nm。

将FSI和MZI并联起来,经过计算,理论上并联的包络应该为7.2 nm,实际上并联包络在1550—1560 nm附近,也为7.2 nm,如图7所示。

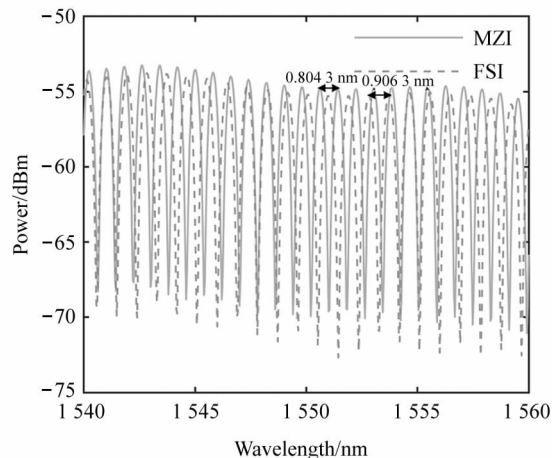


图6 单个FSI情况下的输出光谱实验结果

Fig. 6 Experimental results of output spectra under single FSI conditions

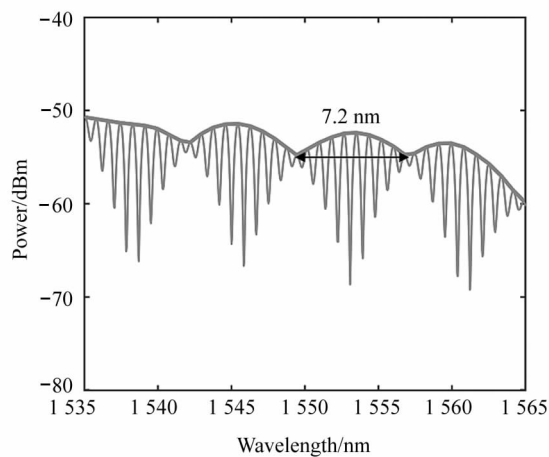


图7 并联干涉仪情况下的输出光谱实验结果

Fig. 7 Experimental results of output spectra under paralleled interferometer conditions

接下来对传感器进行温度传感特性测量,受恒温箱温度调节的限制,恒温箱的最小温度只能精确到0.5℃,所以测试的温度变化范围为2℃。首先对单个FSI的温度灵敏度进行测量,即将单个FSI放入恒温箱中,将恒温箱温度设置在20—21℃,恒温箱温度稳定后,FSI波形漂移结果如图8所示,从结果图可以看出,FSI在温度升高1℃后,波形向左漂移1.65 nm。

在相同的温度设置下,将FSI和MZI并联进行温度灵敏度测量,结果如图9所示,并联后的包络在温度升高1℃后,波形向右漂移了12.9 nm,其温度灵敏度系数为12.9 nm/℃,对比单个FSI相比,灵敏度放大了7.82倍,与理论放大倍数7.89接近。

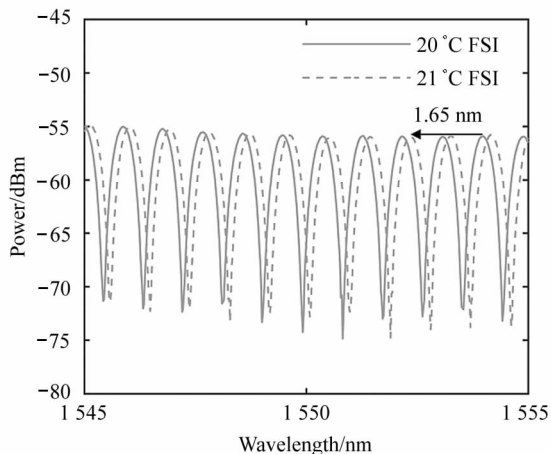


图 8 单个 FSI 情况下在 20 °C 和 21 °C 的实验测量结果
Fig. 8 Experimental results with single FSI at 20 °C and 21 °C

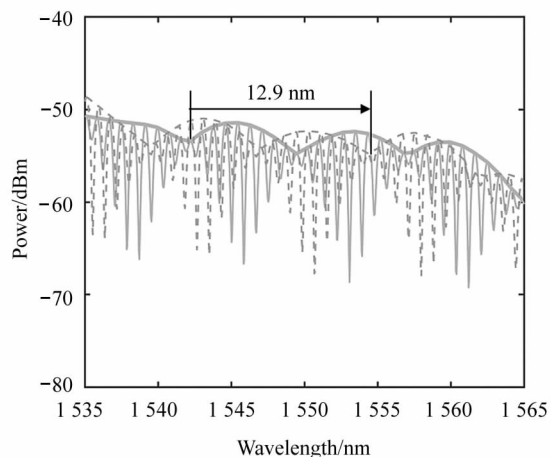


图 9 并联干涉仪情况下在 20 °C 和 21 °C 的实验测量结果
Fig. 9 Experimental results with paralleled interferometers at 20 °C and 21 °C

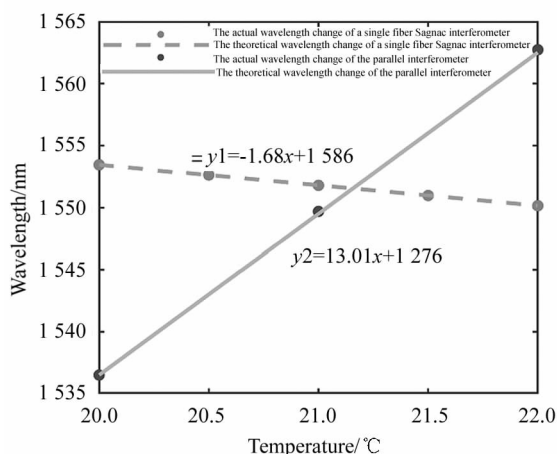


图 10 不同干涉仪时的输出波长与温度变化关系
Fig. 10 Relationship between output wavelength and temperature with different interferometers

最后,在图 10 中,虚线记录了温度从 20—22 °C 的变化过程中,每隔 0.5 °C 单个 FSI 的波长漂移和温度变化之间的关系。实线记录了在该温度变化过程中,每隔 0.5 °C FSI 和 MZI 并联后的波长漂移和温度变化之间的关系。

4 结 论

本文基于游标效应,设计并实验测试了一种 FSI 与 MZI 并联的温度传感器,并对此结构进行了光路分析、仿真和实验测试。对比分析实验与模拟仿真结果可以看出该结构具有较高的温度灵敏度。单个 FSI 仅仅只有 1.65 nm/°C 的温度灵敏度,而将 FSI 和 MZI 并联后的结构能将温度灵敏度放大至 12.9 nm/°C,增益系数为 7.82,与理论结果 7.9 十分接近,验证了理论的正确性。该并联结构能明显提高单个 FSI 结构的温度灵敏度,能在温度变化仅仅只有 0.1 °C 的情况下,使该结构波长漂移 1.29 nm,有一个较为明显的波长变化,且制作简单、成本低廉,对光纤温度传感在精密器件以及对温度要求较高的环境下的应用具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] MATSEH I, HUSAINI T, SIMANUNGKALIT E, et al. Automation of temperature sensor in biogas production from palm oil mill effluent (POME) [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1116(4): 042015.
- [2] YU L M, TAO S, REN Y Z, et al. Comprehensive evaluation of soil moisture sensing technology applications based on analytic hierarchy process and delphi [J]. Agriculture, 2021, 11(11): 1116.
- [3] VITA E D, ZALTIERI M, TOMMASI F D, et al. Multipoint temperature monitoring of microwave thermal ablation in bones through fiber Bragg grating sensor arrays [J]. Sensors (Basel), 2020, 20(11): 3200.
- [4] TOSI D, SCHENA E, MOLARDI C, et al. Fiber optic sensors for sub-centimeter spatially resolved measurements: review and biomedical applications [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 43: 6-19.
- [5] HE C Y, KORPOSH S, CORREIA R, et al. Optical fibre sensor for simultaneous temperature and relative humidity measurement: towards absolute humidity evaluation [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 344(1): 130154.
- [6] HE C Y, KORPOSH S, LIU L L, et al. Real-time humidity measurement during sports activity using optical fibre sensing [J]. Sensors (Basel), 2020, 20(7): 1904.

- [7] XIANG M Q, LIU Y Y, QING X G, et al. The study of radiation effect on Raman distributed optical fiber temperature sensor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1780:012004.
- [8] JIA X L, ZHOU X F, BI M H, et al. High-sensitivity optical fiber temperature sensor of cascaded FSI and MZI based on vernier effect[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65: 10625.
- [9] GE Q, ZHU J H, CUI Y Y, et al. Fiber optic temperature sensor utilizing thin PMF based Sagnac loop[J]. Optics Communications, 2022, 502:127417.
- [10] FU H W, WANG S, CHANG H M, et al. A high resolution and large range fiber Bragg grating temperature sensor with vortex beams[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60:102369.
- [11] WANG T T, LIU B, ZHAO L L, et al. Enhanced refractive index and temperature sensor based on balloon-shaped Mach-Zehnder interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65:102615.
- [12] CHEN M Q, ZHAO Y, WEI H M, et al. Cascaded FPI/LPFG interferometer for high-precision simultaneous measurement of strain and temperature[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53:102025.
- [13] WANG S, WANG S, JIN R B, et al. All-optical demodulation fiber acoustic sensor with real-time controllable sensitivity based on optical vernier effect[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4):6801911.
- [14] 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]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 057103.
- [15] FU X H, HUANG S, LI D S, et al. Temperature sensor based on second-order PbS fiber solc-Sagnac interferometer[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61:102437.

作者简介:

周雪芳 (1976—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光通信、光纤激光器和光纤传感技术方面的研究。