

文章编号: 1001-3806(2020)03-0315-06

双折射光纤环镜应变传感器在线测量方法研究

江莺¹, 段峥¹, 张晓丽², 胡兴柳³

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 信阳师范学院物理电子工程学院, 信阳 464000; 3. 金陵科技学院智能科学与控制工程学院, 南京 211169)

摘要: 为了实现双折射光纤环镜(Bi-FLM)传感器的在线测量, 采用推导得出的基于波长解调双折射光纤环镜应变传感器在线测量的理论表达式, 选取典型通讯波长 1550nm 和 1310nm 附近的 2 组波长进行了计算, 所得应变均与给定应变基本吻合。结果表明, 利用干涉光谱任意连续 4 个相邻的波谷波长及其双折射光纤初始长度、初始双折射率和初始双折射应变系数便可计算出双折射光纤受应变后的绝对长度, 并以此计算所受应变唯一大小; 根据干涉光谱任意 4 个相邻波谷波长相对位置蕴含着应变信息的特点, 区分是干扰还是外界传感量导致干涉光谱变化, 以此剔除外界干扰, 提高了测量精度。该研究对 Bi-FLM 应变、振动等各类传感器实现计算机在线测量, 提高测量精度具有指导意义。

关键词: 光纤光学; 双折射光纤环镜; 应变传感器; 在线测量; 波长解调; 波谷波长

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2020.03.008

Research on the on-line measurement of a birefringence fiber loop mirror strain sensor

JIANG Ying¹, DUAN Zheng¹, ZHANG Xiaoli², HU Xingliu³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. College of Physics and Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 3. College of Intelligent Science and Control Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: In order to realize the on-line measurement of a birefringence fiber (BF) loop mirror (Bi-FLM) strain sensor, the theoretical wavelength-demodulation on-line measurements expression of a Bi-FLM strain sensor was deduced. Two different groups of four-adjacent-wave-valley wavelengths near 1550nm and 1310nm were chosen and substituted into the theoretical expression. Both the calculated strains were basically consistent with the given strains. The result shows that the absolute BF length can be calculated by the random four-adjacent-wave-valley wavelengths, the initial BF length, the initial BF birefringence, and the initial strain dependent birefringence coefficient. Then the strain can be calculated according to the absolute BF length after axial strain and the initial BF length. According to the relative positions of any four-adjacent-wave-valley wavelengths which contained strain information, the noises or external sensing can be distinguished when the interference spectrum changes. By this way, the noises can be eliminated, and the measurement accuracy can be improved. These results can provide guidance for realizing the on-line measurement and improving measurement accuracy of the strain, vibration and other sensors of Bi-FLM.

Key words: fiber optics; birefringence fiber loop mirror; strain sensor; on-line measurements; wavelength demodulation; wave valley wavelength

引言

双折射光纤环镜(birefringence fiber loop mirror, Bi-FLM)除了可以作为可调谐光滤波器之外^[1], 其在光纤传感领域的应用也引起了学者的广泛关注^[2-3], 已成功应用于振动^[4-5]、应变^[6]、扭矩^[7-8]等测量。Bi-FLM 传感器的测量原理是: 外界条件变化使双折射光纤长度和双折射率发生变化, 导致相角改变, 从而使干涉光谱随之变化, 以实现对外界条件变化的传感。目

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51505231; 61603324); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20171114); 江苏省高校“青蓝工程”中青年学术带头人资助项目; 金陵科技学院人才引进基金资助项目(Jit-rcyj-201604)

作者简介: 江莺(1976-), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感器、结构健康监测、智能控制方面的研究。

E-mail: jiangying0510@sina.com

收稿日期: 2019-06-20; 收到修改稿日期: 2019-08-13

前, Bi-FLM 传感器在线测量的方法主要是基于强度解调原理^[9-11], 即将 Bi-FLM 传感器的光信号强度通过光电转换器转换为电信号, 通过监测电信号的变化反推光信号的变化, 从而反推外界传感量的变化。由于强度解调受光源稳定性影响较大, 因此该方法精度较低。Bi-FLM 传感器离线测量绝大部分采用波长解调, 即根据波长的相对变化量来推算传感量的大小^[12-19]。基于波长解调的方法, 克服了光源稳定性的影响, 但在测量过程中, 由于干涉光谱是周期性信号, 需要人为判断: 外界传感量的变化是导致干涉光谱左移还是右移, 是传感量导致的较小相角变化产生的干涉光谱, 还是传感量导致的更大的周期相角变化产生的周而复始的干涉光谱, 且在测试过程中, 外界干扰容易改变干涉光谱的初始相角, 导致干涉光谱平移。基于波长解调的方法无法区分是: 干扰还是外界传感量的变化导致的干涉光谱变化, 致使测量精度下降。因此, 基于波长解调的方法无法自动确定传感量唯一大小, 无法实现在线测量, 无法区分是干扰还是外界传感量的变化导致的干涉光谱变化, 且基于波长解调的方法需要选定监测点, 通过监测点波长的变化反推应变的大小, 监测点不同, 同一 Bi-FLM 传感器灵敏度也各不相同^[1, 12-13, 15], 不利于传感器的校准。

本文中理论推导得出基于波长解调的表达式, 可通过干涉光谱任意连续 4 个相邻的波谷波长及其双折射光纤初始信息计算双折射光纤所受轴向应变。该方法只需找到光谱中的任意连续 4 个最小值对应的波长, 即可求解出应变, 无需人为判断和校准, 根据干涉光谱任意 4 个相邻波谷波长相对位置蕴含着应变信息的特点, 区分是干扰改变初始相角还是外界传感量改变应变导致的干涉光谱变化。该方法有助于促进传感器与计算机有效对接, 实现在线测量, 提高测量精度。

1 理论分析

Bi-FLM 传感器原理图如图 1 所示。入射光从端口 1 经光隔离器进入 3dB 光纤耦合器, 按 1:1 分成从端口 3 顺时针和端口 4 逆时针相向传输的两束光, 最后汇聚在端口 2, 由于双折射光纤具有双折射效应, 汇聚在端口 2 的两束光发生干涉。当双折射光纤受到应

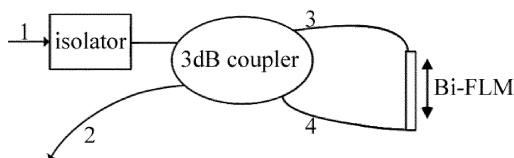


Fig. 1 Schematic of Bi-FLM

变时, 导致双折射光纤双折射率和双折射光纤长度发生变化, 从而导致干涉光谱随之改变, 以此实现应变测量。

Bi-FLM 传感器初始干涉光谱表达式为^[10]:

$$T(\lambda) = \frac{1 - \cos(2\pi L_0 B_0 / \lambda)}{2} = \frac{1 - \cos\theta}{2} \quad (1)$$

式中, λ 为干涉光谱波长, $T(\lambda)$ 为干涉光谱强度, 相角 $\theta = 2\pi L_0 B_0 / \lambda$, L_0 为光纤初始长度, B_0 为光纤初始双折射率。

当双折射光纤受轴向应变后, 相角变化量 $\Delta\theta$ 为^[10]:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} (B_0 \Delta L + L_0 \Delta B) \quad (2)$$

式中, ΔL 为双折射光纤轴向长度变化量, ΔB 为光纤双折射率变化量。

又因 ΔB 与轴向应变成正比^[20], 即:

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

式中, $\varepsilon_z = \Delta L / L_0 = (L' - L_0) / L_0$, 为双折射光纤轴向应变, 单位为 ε ; L' 为双折射光纤受应变后的长度; k 是双折射应变系数, 单位为 $1/\varepsilon$, 即光纤受 1ε 后双折射率变化大小。由(2)式、(3)式可得通过 ε_z 表示的 $\Delta\theta$ 表达式为:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi L_0}{\lambda} (B_0 + k) \varepsilon_z \quad (4)$$

由(2)式、(3)式可得通过 L' 表示的 $\Delta\theta$ 表达式为:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} (B_0 + k) (L' - L_0) \quad (5)$$

由(1)式、(4)式可得通过 ε_z 表示的受到轴向应变后的 Bi-FLM 干涉光谱表达式为:

$$T'(\lambda) = \frac{1 - \cos(\theta + \Delta\theta)}{2} = \frac{1 - \cos\left[\frac{2\pi L_0 B_0}{\lambda} + \frac{2\pi L_0}{\lambda} (B_0 + k) \varepsilon_z\right]}{2} \quad (6)$$

(6)式是通过双折射光纤所受应变 ε_z 来描述干涉光谱 $T'(\lambda)$, 与参考文献[1]、参考文献[4]、参考文献[10]中的一致, 用于与下面推导的基于波长解调计算应变的理论表达式对比, 以校验本文中推导的表达式正确性。

由(6)式可知, 随着应变的变化, 干涉光谱也改变。作者曾通过实验得到 Bi-FLM 应变传感器 $0\mu\varepsilon$ 时的波形, 如图 2 中实线所示^[20], 当传感光纤产生 $100\mu\varepsilon$ 时, 波形如图 2 中虚线所示。基于传统波长解

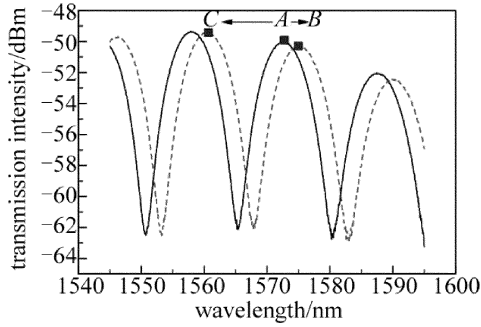


Fig. 2 Birefringence fiber loop mirror sensor wavelength demodulation 调的方法,无法自动确定 A 点是左移到 B 点,还是右移到 C 点,在人工测量时,可以根据经验或人为判断确定。根据(4)式,当相角变化 $\Delta\theta$ 超过 2π 时,信号周而复始,若实施计算机在线实时测量,则无从判断图中虚线是 $100\mu\varepsilon$ 导致的相角变化 $\Delta\theta$ 产生的干涉光谱,还是更大的应变导致的相角变化 $2n\pi + \Delta\theta$ 产生的干涉光谱(n 为整数)。根据(6)式,干扰能改变初始相角 θ 导致干涉光谱平移,传统波长解调的方法无法区分是干扰改变初始相角还是外界传感量改变应变导致的干涉光谱变化。因此,基于传统波长解调的方法无法自动确定应变唯一大小,无法实现在线测量,容易受到外界干扰。以下推导基于波长解调计算应变的理论表达式,能根据干涉光谱任意 4 个相邻波谷波长相对位置蕴含着应变信息计算应变,无需人为判断,剔除了外界干扰,提高了测量精度。

由(1)式、(5)式可得通过 L' 表示的受到轴向应变后的干涉光谱表达式为:

$$T'(\lambda) = \frac{1 - \cos(\theta + \Delta\theta)}{2} = \frac{1 - \cos\left[\frac{2\pi L_0 B_0}{\lambda} + \frac{2\pi}{\lambda}(B_0 + k)(L' - L_0)\right]}{2} \quad (7)$$

欲使(7)式对应干涉光谱 $T'(\lambda)$ 的值最小,则:

$$\frac{2\pi L_0 B_0}{\lambda_n} + \frac{2\pi}{\lambda_n}(B_0 + k)(L' - L_0) = 2n\pi \quad (8)$$

式中, n 为整数, λ_n 为整数 n 对应的波谷波长,其它依此类推。由(8)式解出:

$$\lambda_n = \frac{L_0 B_0 + (B_0 + k)(L' - L_0)}{n} \quad (9)$$

由(9)式可得:

$$\lambda_{n+1} - \lambda_n = -\frac{L_0 B_0 + (B_0 + k)(L' - L_0)}{n(n+1)} \quad (10)$$

由(10)式可得:

$$L' = -\frac{n(n+1)(\lambda_{n+1} - \lambda_n) - L_0 k}{B_0 + k} \quad (11)$$

同理可得:

$$L' = -\frac{n(n-1)(\lambda_n - \lambda_{n-1}) - L_0 k}{B_0 + k} \quad (12)$$

由(11)式、(12)式可解出:

$$n = \frac{\lambda_{n+1} - \lambda_{n-1}}{2\lambda_n - \lambda_{n-1} - \lambda_{n+1}} \quad (13)$$

由(12)式、(13)式可得:

$$L' = \frac{\lambda_{n+1} - \lambda_{n-1}}{2\lambda_n - \lambda_{n+1} - \lambda_{n-1}} \frac{(\lambda_n - \lambda_{n-2})(\lambda_n - \lambda_{n-1})}{2\lambda_{n-1} - \lambda_n - \lambda_{n-2}} - L_0 k \quad (14)$$

由(14)式可知,双折射光纤受轴向应变后的绝对长度 L' 可以由任意 $\lambda_{n+1}, \lambda_n, \lambda_{n-1}, \lambda_{n-2}$ 这 4 个相邻的波谷波长、光纤初始长度 L_0 、光纤初始双折射率 B_0 和双折射应变系数 k 求出。将 L', L_0 代入 $\varepsilon_z = \Delta L/L_0 = (L' - L_0)/L_0$, 可求出双折射光纤所受应变大小。也可以选择选择 4 个相邻的波峰波长计算应变,其理论推导过程与上面类似,不再赘述。

2 分析与讨论

为了验证(14)式的正确性,根据(6)式可得 Bi-FLM 应变传感器干涉波形,并通过编程找出干涉波形 4 个相邻波谷波长,将 4 个相邻波谷波长代入(14)式计算绝对长度 L' ,从而计算应变。选取 2 组不同波长范围的 4 个相邻波谷波长,两次计算的应变均与给定应变基本吻合。详细计算过程如下。

双折射光纤长度 $L_0 = 0.2\text{m}$, 双折射率 $B_0 = 2.6 \times 10^{-4}$, 双折射应变系数 $k = 7.3 \times 0.001/\varepsilon$, 选取波长范围为典型通讯波长 1550nm 附近,横坐标 λ 的步长增量设置为 0.0001nm, (6)式是描述干涉光谱 $T'(\lambda)$ 与

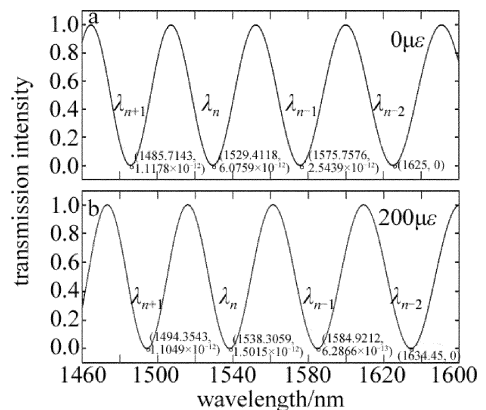


Fig. 3 Birefringence fiber loop mirror sensor interference spectrum near 1550nm

应变 ε_z 的关系表达式,根据(6)式可得各应变对应的干涉光谱 $T'(\lambda)$ 。 $\varepsilon_z = 0\mu\varepsilon$ 和 $\varepsilon_z = 200\mu\varepsilon$ 时的干涉光谱如图3所示。当 ε_z 为确定值时,干涉光谱强度 $T'(\lambda)$ 是随 λ 变化的余弦函数,无量纲。

当传感光纤产生 $200\mu\varepsilon$ 时,传统的基于波长解调的方法需要选定监测点,通过监测点波长的变化反推应变的大小。例如选择干涉光谱图3a中的波谷 λ_n 为监测点,需要人为判断图3a中的波谷 λ_n 是左移到图3b中的 λ_{n+1} 的位置,还是右移到图3b中的 λ_n 的位置,不利于实现计算机在线测量。且选择的监测点不同,同一 Bi-FLM 传感器灵敏度也各不相同,不利于传感器的校准。本文中推导的理论表达式只需要找出干涉光谱的任意 $\lambda_{n+1}, \lambda_n, \lambda_{n-1}, \lambda_{n-2}$, 4个相邻的波谷波

长,便可计算传感器应变大小。

根据(9)式,当 n 值减小时,对应波谷波长增大,故 $\lambda_{n+1} < \lambda_n < \lambda_{n-1} < \lambda_{n-2}$,如图3所示。找出图中干涉光谱的4个连续波谷的坐标, $\varepsilon_z = 200\mu\varepsilon$ 时,4个连续波谷波长 $\lambda_{n+1}, \lambda_n, \lambda_{n-1}, \lambda_{n-2}$ 依次为 1494.3543nm, 1538.3059nm, 1584.9212nm, 1634.4500nm, 将4个连续波谷波长、光纤初始长度 $L_0 = 0.2\text{m}$ 、光纤初始双折射率 $B_0 = 2.6 \times 10^{-4}$ 和双折射应变系数 $k = 7.3 \times 0.001/\varepsilon$ 代入(14)式,计算可得双折射光纤的绝对长度 $L' = 0.200039978870329\text{m}$, 将 L' 代入 $\varepsilon_z = \Delta L/L_0 = (L' - L_0)/L_0$, 计算得应变 $\varepsilon_z = 199.894351642776\mu\varepsilon$ 。其它应变的计算以此类推,表1中为计算结果。

从表1可以看出,通过本文中推导的理论表达式

Table 1 Calculating strain results by four adjacent wave valley wavelengths near 1550nm

given strain/ $\mu\varepsilon$	λ_{n-2}/nm	λ_{n-1}/nm	λ_n/nm	λ_{n+1}/nm	calculated strain/ $\mu\varepsilon$
100	1629.725	1580.3394	1533.8588	1490.0343	99.5752477940537
200	1634.45	1584.9212	1538.3059	1494.3543	199.894351642776
300	1639.175	1589.503	1542.7529	1498.6743	298.913752005692
400	1643.9	1594.0848	1547.2	1502.9943	399.232867617089
500	1648.625	1598.6667	1551.6471	1507.3143	500.740355994095
600	1653.35	1603.2485	1556.0941	1511.6343	599.759737768407
700	1658.075	1607.8303	1560.5412	1515.9543	700.078840896179
800	1662.8	1612.4121	1564.9882	1520.2743	799.098235643586
900	1667.525	1616.9939	1569.4353	1524.5943	899.417350395254

计算的应变与给定应变基本吻合,但仍存在一定误差,误差是由于(6)式绘制的 Bi-FLM 干涉光谱波形横坐标 λ 的步长增量设置为 0.0001nm , 而非连续步长,导致图3中某些波谷的纵坐标不完全等于0,而是近似为0,该点不是严格意义上的波谷点,因此计算的4个连续波谷波长 $\lambda_{n+1}, \lambda_n, \lambda_{n-1}, \lambda_{n-2}$ 也是近似接近理论值,从而与给定应变存在一定误差。

为了验证(14)式计算应变大小可以由任意 $\lambda_{n+1}, \lambda_n, \lambda_{n-1}, \lambda_{n-2}$ 这4个相邻的波谷波长计算得到,本文中选取另一典型通讯波长 1300nm 附近的4个相邻波谷波长进行计算, $\varepsilon_z = 200\mu\varepsilon$ 时的干涉光谱如图4所示,计算方法同上。各应变计算结果如表2所示。虽然选取的4个相邻的波谷波长与表1不同,但计算的应变与给定应变仍基本吻合,因此,基于(14)式计算应变大小可以由任意4个相邻波谷波长 $\lambda_{n+1}, \lambda_n, \lambda_{n-1}, \lambda_{n-2}$ 进行计算。

根据表2中计算的各应变对应的波谷波长 $\lambda_{n+1}, \lambda_n, \lambda_{n-1}, \lambda_{n-2}$, 传统的基于波长解调的方法分别选定波长极小值 λ_{n+1} 和波长极大值 λ_{n-2} 为监测点,得到的

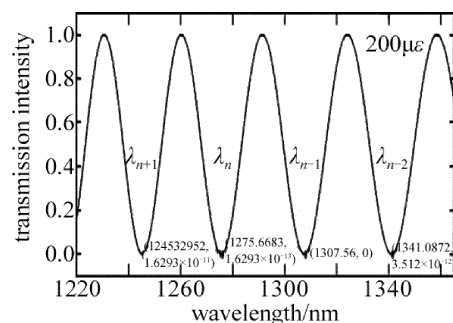


Fig. 4 Birefringence fiber loop mirror sensor interference spectrum near 1300nm

应变与波长拟合直线如图5所示。以 $\lambda_{n+1}, \lambda_{n-2}$ 为监测点的传感器灵敏度分别 $0.036\text{nm}/\mu\varepsilon, 0.03877\text{nm}/\mu\varepsilon$ 。选定的监测点不同, Bi-FLM 传感器的灵敏度也不同,导致同一传感器灵敏度大小不一致,不利于传感器的校准。本文中推导的理论表达式任意选定的4个相邻的波谷波长 $\lambda_{n+1}, \lambda_n, \lambda_{n-1}, \lambda_{n-2}$ 不影响计算应变的大小,无需校准。计算应变时无需人为判断,有助于实现计算机在线测量。干扰只是改变初始相角导致干涉光谱简单平移,但外界传感量改变应变,导致干涉光

Table 2 Calculating strain results by four adjacent wave valley wavelengths near 1300nm

given strain/ $\mu\epsilon$	λ_{n-2}/nm	λ_{n-1}/nm	λ_n/nm	λ_{n+1}/nm	calculated strain / $\mu\epsilon$
100	1337.2103	1303.78	1271.9805	1241.6952	100.267973850571
200	1341.0872	1307.56	1275.6683	1245.2952	200.632670522283
300	1344.9641	1311.34	1279.3561	1248.8952	300.997382638585
400	1348.841	1315.12	1283.0439	1252.4952	401.362110053483
500	1352.7179	1318.9	1286.7317	1256.0952	501.726852655537
600	1356.5949	1322.68	1290.4195	1259.6952	600.029301964372
700	1360.4718	1326.46	1294.1073	1263.2952	700.394017769113
800	1364.3487	1330.24	1297.7951	1266.8952	800.758748691899
900	1368.2256	1334.02	1301.4829	1270.4952	901.123494590345

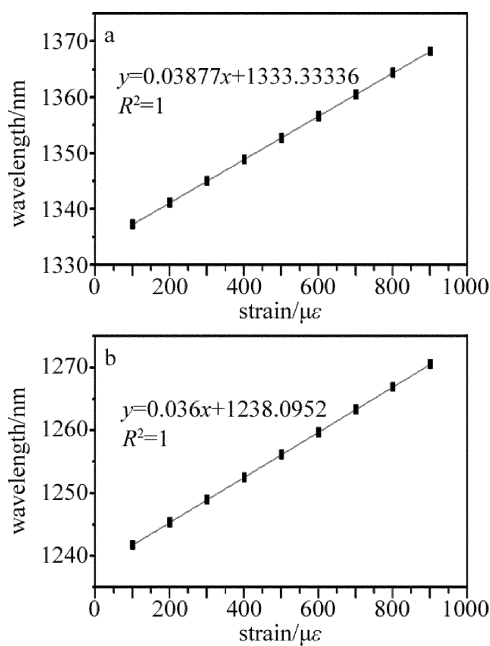


Fig. 5 Relationship between strain and wavelength

谱任意 4 个相邻波谷波长的相对位置发生变化,并以此计算应变,能剔除外界干扰,提高测量精度。

3 结 论

本文中选取了典型通讯波长 1550nm 和 1310nm 附近 4 个相邻的波谷波长,通过本文中推导的理论表达式计算 Bi-FLM 传感器受轴向应变后的双折射光纤绝对长度,并以此计算所受应变大小。通过两种不同波长范围计算的传感器应变大小一致,克服了传统的基于波长解调方法因监测点不同导致同一传感器灵敏度各异、不利于传感器校准的缺点。计算应变时无需人为判断,克服了传统的基于波长解调方法无法自动确定传感量唯一大小、不利于计算机在线测量的缺点。根据干涉光谱任意 4 个相邻波谷波长相对位置蕴含着应变信息,能区分是干扰改变初始相角还是外界传感量改变应变导致的干涉光谱变化,能剔除外界干扰,提

高测量精度。本文中研究结果对 Bi-FLM 应变、振动等各类传感器实现计算机在线测量,提高测量精度具有指导意义。但本文中的测量方法需要连续 4 个相邻的波谷波长,需要的信息量较多,在一定的光源波长范围内,仅有较短的传感光纤的双折射光纤环镜传感器没有足够的波谷点,因此,有待进一步研究一种需要信息量较少的在线测量方法。

参 考 文 献

- [1] JI Zh J, WU X N, YIN Y, *et al.* Tunable optical filters based on high birefringence fiber loop mirrors [J]. *Laser Technology*, 2014, 38 (1):54-57 (in Chinese).
- [2] JIANG Y, LIANG D K, ZENG J, *et al.* Influence of monitoring point wavelength on axial strain sensitivity of high-birefringence fiber loop mirror[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62 (6):064216 (in Chinese).
- [3] SUN G Y, TANG H J, HU Y H, *et al.* Strain and temperature discrimination using high birefringence fiber Sagnac interferometer with enhanced sensitivities [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7):587-589.
- [4] JIANG Y, LIANG D K, LU J Y. Voltage demodulation and vibration monitoring based on a polarization maintaining fiber loop mirror[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28 (13):1832-1838.
- [5] LEANDRO D, LOPEZ-AMO M. All-PM fiber loop mirror interferometer analysis and simultaneous measurement of temperature and mechanical vibration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36 (4):1105-1111.
- [6] JIANG Y, ZENG J, LIANG D K, *et al.* The influences of polarization-maintaining fiber length and sensing length on axial strain sensitivity of polarization-maintaining fiber loop mirror[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(15):1959-6194.
- [7] ZU P, CHAN C C, JIN Y X, *et al.* A Temperature-insensitive twist sensor by using low-birefringence photonic-crystal-fiber-based Sagnac interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23 (13): 920-922.
- [8] SILVA R M, FERREIRA M S, FRAZÃO O. Temperature independent torsion sensor using a high-birefringent Sagnac loop interferometer [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 1167-1170.
- [9] THAKUR H V, NALAWADE S M, SAXENA Y, *et al.* All-fiber embedded PM-PCF vibration sensor for structural health monitoring of

- composite[J]. *Sensors and Actuators: Physical*, 2011, A167(2): 204-2012.
- [10] QIAN W W, ZHAO C L, DONG X Y. Intensity measurement based temperature-independent strain sensor using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(24): 5250-52544.
- [11] JIANG Y, YU M J. Influence of birefringence fibre length on demodulation sensitivity based on a fibre loop mirror sensor[J]. *IET Optoelectronics*, 2018, 12(5): 254-257.
- [12] NOH T K, RYU U C, LEE Y W. Compact and wide range polarimetric strain sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Sensors and Actuators: Physical*, 2014, A213(7): 89-93.
- [13] WU C, TSE M L V, LIU Z, *et al.* In-line microfluidic refractometer based on C-shaped fiber assisted photonic crystal fiber Sagnac interferometer[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3283-3286.
- [14] GONG H P, SONG H F, ZHANG S L. Curvature sensor based on hollow-core photonic crystal fiber Sagnac interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(3): 777-779.
- [15] JIANG Y, ZHANG Ch Zh, LIANG D K, *et al.* Optimal research on the strain sensitivity of polarization maintaining fiber loop mirror[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(5): 1576-1580 (in Chinese).
- [16] ZHANG Y N, PENG H, ZHOU T, *et al.* Hydrogen sensor based on high-birefringence fiber loop mirror with sol-gel Pd/WO₃ coating [J]. *Sensors and Actuators: Chemical*, 2017, B248:71-76.
- [17] WANG J, LIANG H, DONG X, *et al.* A temperature-insensitive relative humidity sensor by using polarization maintaining fiber-based Sagnac interferometer[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2013, 55(10):2305-2307.
- [18] ZHAO Ch L, WANG Zh, ZHANG Sh, *et al.* Phenomenon in an alcohol not full-filled temperature sensor based on an optical fiber Sagnac interferometer[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22):4789-4791.
- [19] ZHANG J, QIAO X, GUO T, *et al.* Highly-sensitive temperature sensor using a Hi-Bi fiber tip probe [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(6):2077-2080.
- [20] JIANG Y, LIANG D K, ZENG J, *et al.* Research on axial strain sensitivity of high-birefringence fiber loop mirror[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3367-3371 (in Chinese).