

引用本文: 王婷婷, 柯伟, 王秀婷. 基于并联游标效应的 MZ 光纤应变传感器增敏解调系统[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 13-17.

基于并联游标效应的 MZ 光纤应变传感器增敏解调系统

王婷婷¹, 柯伟², 王秀婷¹

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044; 2. 南京师范大学 计算机与电子信息学院/人工智能学院, 南京 210023)

摘要: 为了进一步提高马赫-曾德尔(MZ)光纤应变传感器的灵敏度, 设计了一种基于并联游标效应的 MZ 光纤应变传感器增敏解调系统。该系统由传感干涉仪和参考干涉仪并联组成, 2 个干涉仪都是单模-无芯-少模-单模(SNFS)结构的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。通过提取 2 个 SNFS-MZI 传输信号的差频成分并跟踪其波谷的移动, 提高系统应变灵敏度。此外, 通过单独提取参考干涉仪的干涉谱, 从而消减应变测量时的温度串扰。实验结果表明: 该系统的应变灵敏度为 $7.39 \text{ pm}/\mu\text{E}$, 约为单个传感干涉仪的应变灵敏度 5 倍; 通过调节参考干涉仪和传感干涉仪的传感臂长, 可以灵活调节 MZ 光纤应变传感器增敏解调系统的灵敏度性能。

关键词: 光纤光学; 马赫-曾德尔干涉仪; 并联游标效应; 应变; 温度串扰

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)01-0013-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Sensitization and demodulation system of MZ optical fiber strain sensor based on parallel vernier effect

WANG Tingting¹, KE Wei², WANG Xiuting¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Computer and Electronic Information / School of Artificial Intelligence, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to improve the sensitivity of Mach-Zehnder (MZ) optical fiber strain sensor, a MZ optical fiber strain sensor sensitization demodulation system based on parallel cursor effect is designed. The system consists of a sensing interferometer and a reference interferometer in parallel, both of which are Mach-Zehnder interferometer (MZI) with a single mode fiber-no-core fiber-few-mode fiber-single mode fiber (SNFS) structure. By extracting the difference frequency components of two SNFS-MZI signals and tracking the movement of their troughs, the strain sensitivity of the system is improved. In addition, the temperature crosstalk during strain measurement is reduced by extracting the interference spectrum of the reference interferometer separately. The experimental results show that the strain sensitivity of the system is $7.39 \text{ pm}/\mu\text{E}$, which is about 5 times that of a single sensor interferometer. By adjusting the sensing arm length of the reference interferometer and the sensing interferometer, the sensitivity performance of the MZ optical fiber strain sensor sensitization demodulation system can be flexibly adjusted.

Key words: fiber optics, Mach-Zehnder interferometer, parallel vernier effect, strain, temperature crosstalk

0 引言

光纤传感器以其结构简单、重复性好、易于制造、

收稿日期: 2023-10-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61405094)资助; 江苏高校优势学科三期建设工程项目资助。

作者简介: 王婷婷(1979—), 女, 江苏南通人, 九三学社社员, 博士, 副教授, 主要研究方向为光波导、光纤传感、光信号调制解调, 主持了 4 项国家、省市级项目, 以第一发明人获得 20 余项专利授权, 并发表了 20 余篇论文。



抗电磁性能好等优点受到国内外研究人员的青睐, 已被广泛用于多种物理参数的测量, 如温度^[1-2]、应变^[3-4]、折射率^[5-6]和曲率^[7-8]。其中, 马赫-曾德尔干涉仪(MZI)传感器结构包括纤芯错位拼接^[8-9]、锥形光纤^[10]、花生型结构^[4]等。近年来, 游标效应的出现, 为提高光学传感器的灵敏度提供了新的思路。

为了在叠加光谱中实现游标效应, 需要 2 个自由光谱范围近似但不相等的干涉仪。2017 年, LIAO H 等人^[11]提出了一种新的频谱提取方法, 即通过使用由 2 个错位的单模光纤(SMF)结构组成的级联 MZI 精确提

王婷婷, 柯伟, 王秀婷: 基于并联游标效应的 MZ 光纤应变传感器增敏解调系统

取信号包络。然而, 由于传感器通过级联 2 个 MZI 来实现游标效应, 这导致了信号干涉强度差异较大, 因此信号相对较弱。此外, 级联 MZI 的叠加频谱包含高频精细谱分量, 这些高频精细谱分量需要经过复杂的数学处理才能提取出包络偏移。同年, WANG Z 等人^[12]在 2 根多模光纤之间熔接 1 段空心光纤, 制成了 1 种基于并联游标效应的温度 MZI 传感器, 其叠加谱中不含高频精细谱分量。这种特性使得包络偏移的提取更为容易。然而, 这种测量方法主要适用于单一的温度测量。

基于此, 本文设计一种基于并联游标效应的马赫-曾德尔(MZ)光纤应变传感器增敏解调系统(下文简称 MZ 光纤应变传感器解调系统), 提高系统应变测量灵敏度和消减应变测量时的温度串扰。

1 基本原理

1.1 SNFS-MZI 结构以及理论分析

基于并联游标效应的 MZ 光纤应变传感器由 2 个干涉仪组成, 其中一个为传感干涉仪, 另一个为参考干涉仪。这 2 个干涉仪的自由光谱范围相差很小。单个干涉仪均由单模光纤(SMF)、无芯光纤(NCF)、少模光纤(FMF)、SMF 熔接组成, 这种结构被称为 SNFS-MZI 结构, 如图 1 所示(图中的箭头表示光信号传输方向)。SNFS-MZI 利用 FMF 纤芯中的高阶模和基模间的模间干涉, 既简化了干涉仪的结构, 又解决了已有全光纤 MZI 中干涉模式多、激发难以控制的问题。

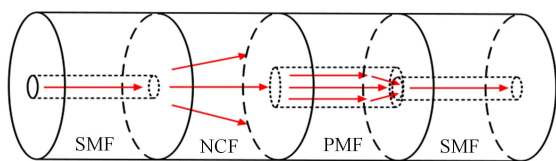


图 1 SNFS-MZI 结构示意图

由于高阶模之间干涉强度较低, 因此本文忽略了高阶模间的干涉, 得出 SNFS-MZI 的输出光强^[14]近似表示为

$$I = I_1 + \sum_{m=2}^{\infty} I_{\text{core}}^m + \sum_{m=2}^{\infty} 2\sqrt{I_1 I_{\text{core}}^m} \times \cos \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^1 - n_{\text{eff}}^{\text{core},m})L}{\lambda} \quad (1)$$

其中, I_1 、 I_{core}^m 分别为 FMF 纤芯内基模和高阶模的光强, m 为高阶模的阶数, n_{eff}^1 、 $n_{\text{eff}}^{\text{core},m}$ 分别为 FMF 纤芯内基模和高阶模的有效折射率, λ 为自由空间光波长, L 为 FMF 长度。FMF 纤芯中基模和高阶模的相位差 $\Delta\varphi$ 表

达式为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^1 - n_{\text{eff}}^{\text{core},m})L}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \quad (2)$$

其中, Δn_{eff} 为 FMF 纤芯中基模和高阶模的有效折射率差值。当 FMF 纤芯中基模和高阶模的相位差满足 $\Delta\varphi = (2j+1)\pi$ 时, 输出光强 I 会在特定的波长处产生极小值, 该波长可以表示为

$$\lambda_j = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{(2j+1)} \quad (3)$$

其中, j 为整数。

单个 SNFS-MZI 的自由光谱范围 F_{MZI} 为

$$F_{\text{MZI}} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}L} \quad (4)$$

由式(4)可知, F_{MZI} 随着长度 L 的增大而减少。

当应变 ε 施加到 SNFS-MZI 时, 光纤长度和有效折射率都将发生变化, 因此干涉条纹的波谷波长将发生偏移。应变引起的波长偏移为

$$\Delta\lambda = -\lambda(1 + 2\nu + p_e)\varepsilon \quad (5)$$

其中, ν 和 p_e 分别为光纤的泊松比和有效弹光系数。

由于光纤存在热膨胀 α 和热光系数 ζ , 当外部环境温度变化时, SNFS-MZI 的温度灵敏度可以描述为

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda(\alpha + \zeta) \quad (6)$$

1.2 MZ 光纤应变传感器解调系统原理

MZ 光纤应变传感器解调系统如图 2 所示。传感分析仪通道 1 输出的扫描激光经光纤耦合器(OC₁)分别进入传感干涉仪和参考干涉仪, 参考干涉仪的透射谱经 OC₂ 分成 2 路, 一路直接回到传感分析仪通道 2, 另一路经 OC₃ 与传感干涉仪透射谱叠加并发生干涉后回到传感分析仪通道 3。传感干涉仪两端被光纤夹持器固定在光学平移台上, 参考干涉仪固定在带有凹槽的亚克力板上, 2 个干涉仪处于同一个温度环境中。此外, 在传感干涉仪支路中串联了一个光衰减器用来实时调节传感干涉仪透射谱的强度, 使叠加谱包络条纹对比度最大。解调系统通过提取传感干涉仪和参考干涉仪传输信号的差频成分并跟踪其波谷波长的移动, 提高系统应变测量灵敏度; 根据参考干涉仪的干涉

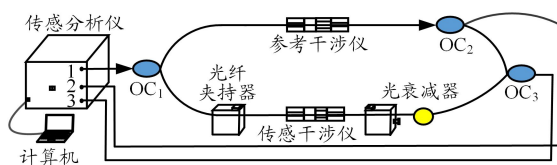


图 2 MZ 光纤应变传感器解调系统示意图

谱解调出环境温度, 消减应变测量时的温度串扰。

当将自由光谱范围相近而不相等的传感干涉仪和参考干涉仪并联时, 由于 2 个干涉仪的光程差相近, 并联合叠加谱中既包含单个干涉仪的频率分量, 又有低频包络谱。单个干涉仪的频率分量为 $\frac{\Delta n_{\text{eff}} L_s}{\lambda}$ 或 $\frac{\Delta n_{\text{eff}} L_r}{\lambda}$, 低频包络分量为 $\frac{\Delta n_{\text{eff}} (L_s - L_r)}{\lambda}$ 。其中, L_s 、 L_r 分别是传感干涉仪和参考干涉仪的干涉臂长。当 Δn_{eff} 视作不变时, 叠加干涉谱的低频包络 I_e [13-14] 可以表示为

$$I_e = A + B \cos \frac{2\pi \Delta n_{\text{eff}} (L_s - L_r)}{\lambda} \quad (7)$$

其中, A 为常数, B 为叠加干涉谱包络的振幅。

叠加谱包络的自由光谱范围 F_e 为

$$F_e = \frac{F_s F_r}{|F_s - F_r|} \quad (8)$$

其中, F_s 、 F_r 分别是传感干涉仪和参考干涉仪的自由光谱范围。当传感干涉仪的透射谱随着应力或温度的改变而移动时, 包络也会发生偏移, 且移动量约为传感干涉仪的 M 倍。考虑到 Δn_{eff} 很小, 可忽略其影响, 则应力或温度灵敏度提高倍数 M 可表示为

$$M = \frac{F_r}{F_r - F_s} = \frac{L_s}{L_s - L_r} \quad (9)$$

由式(9)可知, 通过控制传感干涉仪和参考干涉仪中 FMF 的长度, 可以调整传感系统灵敏度。

2 实验结果和讨论

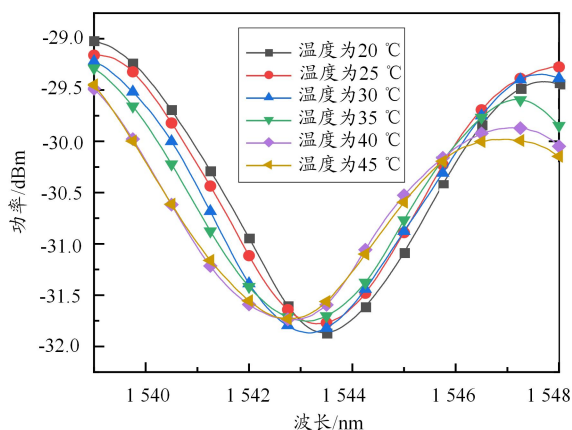
2.1 单个 SNFS-MZI 的温度响应和传感干涉仪的应变响应

为了在有限的光源扫描范围(1 510~1 590 nm)内至少观察到叠加谱包络的 2 个波谷, 叠加谱包络的自由光谱范围必须小于 40 nm。根据式(8)、式(9)可知, 包络的自由光谱范围由传感干涉仪的自由光谱范围和灵敏度提高倍数决定。实验中, 传感干涉仪和参考干涉仪的 FMF 长度分别为 18.2 cm 和 22.0 cm。

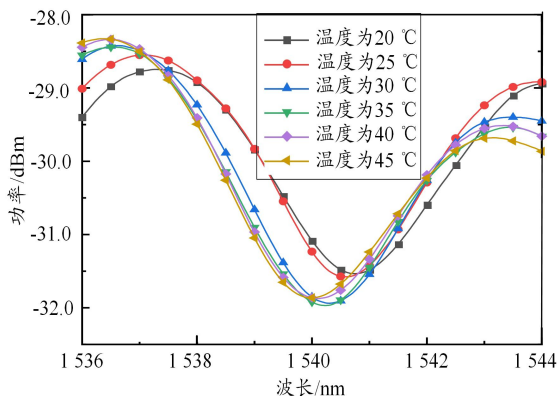
首先, 本文对单个 SNFS-MZI 的温度响应进行了测量标定。在均无应变作用的前提下, 温控箱的温度从 20 °C 增加到 45 °C (温度采集步长为 5 °C)。SNFS-MZI 的透射光谱随温度变化的移动如图 3 所示。可以看出, 随着温度的增加, 透射光谱波谷波长都发生左移。分别将 SNFS-MZI 透射光谱的波谷波长对温度的响应进行线性拟合, 结果如图 4 所示。将图 4 中的数据分别代入温度灵敏度、线性拟合度公式, 可以计算出

传感干涉仪的干涉波谷波长在 1 543 nm 附近的温度灵敏度 k_s 为 -26.91 pm/°C, 线性拟合度为 0.982 4; 参考干涉仪的干涉波谷波长在 1 540 nm 附近的温度灵敏度 k_r 为 -29.80 pm/°C, 线性拟合度为 0.962 4。

然后, 对传感干涉仪的应变响应进行测量标定。由于参考干涉仪保持无应变状态, 因此无需标定其应

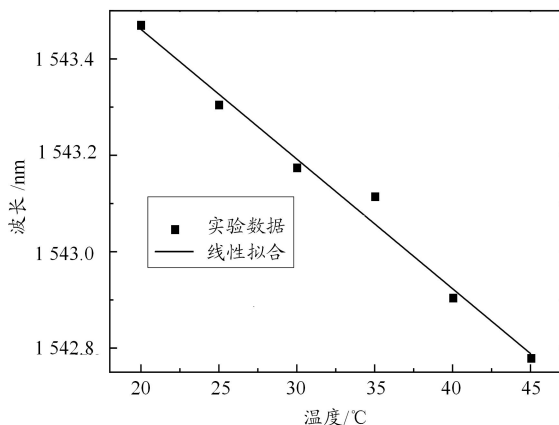


(a) 传感干涉仪



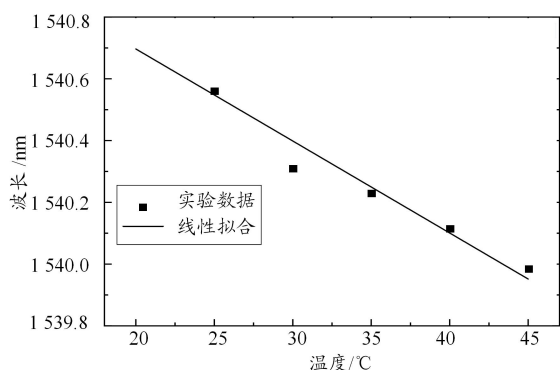
(b) 参考干涉仪

图3 SNFS-MZI 的透射光谱



(a) 传感干涉仪

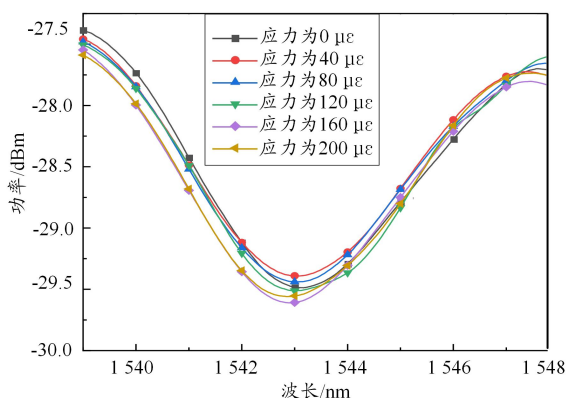
王婷婷, 柯伟, 王秀婷: 基于并联游标效应的 MZ 光纤应变传感器增敏解调系统



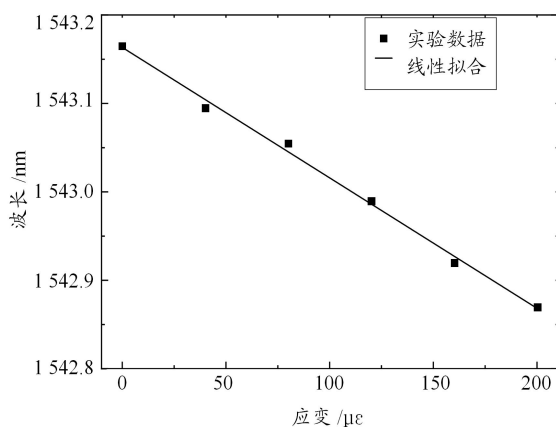
(b) 参考干涉仪

图 4 SNFS-MZI 的温度响应

变响应。当环境温度 $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 将传感干涉仪用光纤夹持器固定在 2 个间距 20 cm 的位移台上, 移动位移台, 对传感干涉仪施加 0~200 μe 轴向拉力, 以步长为 40 μe 分别观察并记录每一次推进位移平台后传感干涉仪的透射光谱, 透射光谱和应变响应如图 5 所示。



(a) 透射光谱



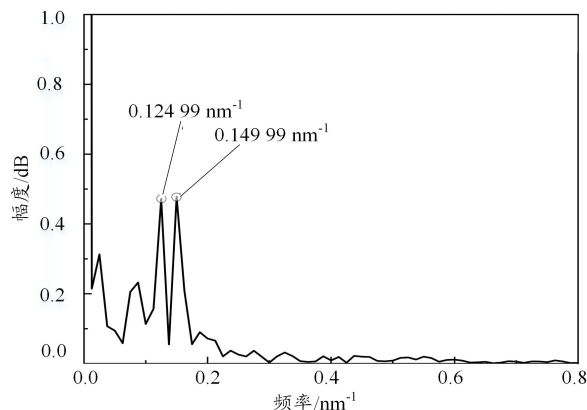
(b) 应变响应

图 5 传感干涉仪的透射光谱和应变响应

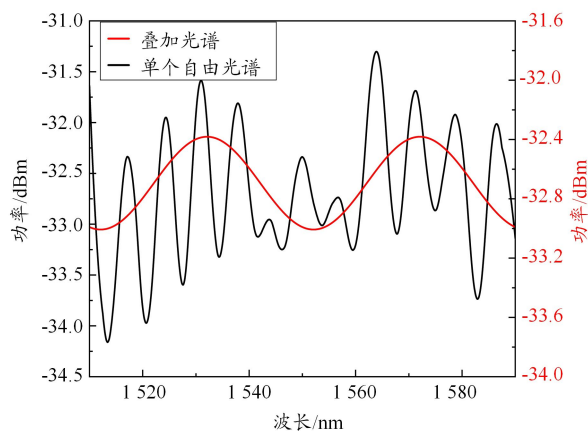
将图 5 中的数据代入温度灵敏度、线性拟合度公式, 可以计算出传感干涉仪的应变灵敏度为 $-1.48\text{ pm}/\mu\text{e}$ 。

2.2 包络提取

图 6(a) 是叠加信号的空间频谱图。图中 2 个相邻主峰 ($0.124\text{ }99\text{ nm}^{-1}$ 和 $0.149\text{ }99\text{ nm}^{-1}$) 分别对应传感干涉仪和参考干涉仪透射谱的空间主频率。除此之外, 由于上述 2 个主峰空间频率接近, 且透射光谱强度相当, 在低频处产生一个峰, 这个峰所对应的叠加光谱信号 (图 6(b) 所示) 的频率, 是 2 个主要空间频率的差频, 其值为 0.025 nm^{-1} 。对叠加光谱进行带通滤波, 在 $0.021\sim 0.029\text{ nm}^{-1}$ 频率范围内进行包络提取, 提取的包络如图 6(b) 中红色曲线所示。可以看出, 叠加光谱包络的自由光谱范围宽度是传感干涉仪的 4.7 倍。当传感干涉仪的透射谱随着应力或温度的改变而移动 1 个周期时, 包络也移动 1 个周期, 且移动量约为传感干涉仪的 4.7 倍, 即测量时叠加光谱的灵敏度为单个自由光谱的 4.7 倍。



(a) 空间频谱图



(b) 叠加光谱

图 6 叠加信号的空间频谱和光谱

2.3 叠加光谱包络线的温度和应变响应

在无应变作用的前提下, 将 MZ 光纤应变传感器解调系统放进温控箱, 温度从 20 °C 增加到 45 °C (温度采集步长为 5 °C)。此时, 传感分析仪显示通道 3 的透射叠加谱和温度响应在波长为 1 555 nm 干涉波谷波长处的温度灵敏度 k_T 为 139.06 pm/°C, 线性拟合度为 0.990 1。此时, MZ 光纤应变传感器解调系统的温度灵敏度约为单个传感干涉仪的 5 倍, 但温度串扰严重。

在环境温度 $T_0=20$ °C 时, 将 MZ 光纤应变传感器解调系统中的传感干涉仪用光纤夹持器固定在 2 个间距 20 cm 的位移台上, 移动位移台, 对传感干涉仪施加 0~200 $\mu\epsilon$ 的轴向拉力, 以步长为 40 $\mu\epsilon$ 观察并记录传感分析仪通道 3 的透射叠加谱, 发现应变响应在波长为 1 555 nm 干涉波谷波长处的应变灵敏度为 7.39 pm/ $\mu\epsilon$, 线性拟合系数为 0.994 7。对比单个传感干涉仪, MZ 光纤应变传感器解调系统的应变灵敏度提高了约 4 倍。

在实际应变测量过程中, 并联叠加谱包络线波谷位移 $\Delta\lambda_e$ 不可避免地受到温度串扰的影响, 需要消除。消除串扰的叠加光谱包络后波谷波长位移表示为

$$\Delta\lambda_e = k_e \Delta\epsilon + k_T \Delta T \quad (10)$$

其中, $T_0=20$ °C 时, k_e 为 7.39 pm/ $\mu\epsilon$, k_T 为 139.06 pm/°C。

传感分析仪通道 3 获取的参考干涉仪透射谱在 1 540 nm 附近的波谷位移表示为

$$\Delta\lambda_T = k_R \Delta T \quad (11)$$

其中, k_R 为 -29.80 pm/°C。系统中参考干涉仪被固定在带有凹槽的亚克力板上, 与传感干涉仪处于相同温度环境中。因此, 根据 $\Delta\lambda_T$ 就可获取温度变化 ΔT 。将 ΔT 代入式(10), 根据 $\Delta\lambda_e$ 即可求出消减了温度串扰的被测应变 $\Delta\epsilon$ 。

3 结束语

本文设计了一种 MZ 光纤应变传感器增敏解调系统, 并解决了传感器温度串扰问题。该系统由自由光谱范围相差较小的 SNFS-MZI 结构的传感干涉仪和参考干涉仪构成。实验结果表明: 系统应变灵敏度为 7.39 pm/ $\mu\epsilon$, 温度灵敏度为 139.06 pm/°C; 与单个传感干涉仪相比, 所提系统的应变灵敏度提高了约 4 倍;

通过调节 2 个干涉仪的传感臂长可以灵活调整系统灵敏度的提高倍数。该系统结合参考传感器的干涉谱, 还可以消减温度串扰, 适用于精密测量领域。

参考文献:

- [1] LIAO Y C, LIU B, LIU J, et al. High temperature (up to 950 °C) sensor based on micro taper in-line fiber Mach - Zehnder interferometer (invited) [J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2394-1-2394-11.
- [2] GENG Y, LI X, TAN X, et al. Compact and ultrasensitive temperature sensor with a fully liquid-filled photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14: 167-170.
- [3] 孙家程, 王婷婷, 戴洋, 等. 基于无芯光纤的多参数测量传感器[J]. 物理学报, 2021, 70(6): 214-221.
- [4] 孙明明, 王剑峰, 金永兴, 等. 基于错位和花生形结构的全光纤马赫 - 曾德干涉仪的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1560-1564.
- [5] YU H, XIONG L, CHEN Z, et al. Ultracompact and high sensitive refractive index sensor based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 56: 50-53.
- [6] XIA F, ZHAO Y. RI sensing system with high sensitivity and large measurement range using a microfiber MZI and a photonic crystal fiber MZI[J]. Measurement, 2020, 156: 107603-1-107630-8.
- [7] XU S, CHEN H, FENG W. Fiber-optic curvature and temperature sensor based on the lateral offset spliced SMF-FCF-SMF interference structure[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107174-1-107174-7.
- [8] 付广伟, 李硕峰, 李昀璞, 等. 温度不敏感的错位熔接 - 粗锥型光子晶体光纤曲率传感器[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 82-90.
- [9] WANG H, MENG H, XIONG R, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference[J]. Optics Communications, 2016, 364: 191-194.
- [10] TALATAISONG W, WANG D, CHITAREE R, et al. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer based on an inner air-cavity for high-pressure sensing[J]. Optic Letters, 2015, 40: 1220-1222.
- [11] LIAO H, LU P, FU X, et al. Sensitivity amplification of fiber-optic in-line Mach - Zehnder interferometer sensors with modified vernier-effect [J]. Optic Express, 2017, 25(22): 26898-26909.
- [12] 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.
- [13] ZHU H, YUE Y, WANG Y, et al. High-sensitivity optical sensors based on cascaded reflective MZIs and microring resonators [J]. Optic Express, 2017, 25: 28612-28618.
- [14] QUAN M, TIAN J, YAO Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Perot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and vernier effect[J]. Optic Letters, 2015, 40: 4891-4894.