光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250427001

基于虚拟游标效应的锯齿形光纤MZI高灵敏应变传感器

陈丽萍*，魏　勇

（重庆三峡学院 电子与信息工程学院，重庆 404000）

摘　要： 为提升虚拟游标效应传感器灵敏度，提出一种锯齿形光纤马赫曾德尔干涉仪结构。通过二氧化碳激光器在毛细管光纤上加工锯齿形微结构，减小其传感区域横截面积，促使应变集中分布，从而显著增大传感干涉仪自身灵敏度。实验结果表明，当锯齿深度为30 μm时，传感干涉仪的应变灵敏度提升至2.5 pm/με。进一步结合虚拟游标效应处理，将传感信号与虚拟参考信号叠加放大（放大因子为136.6），最终传感器的包络谷灵敏度达341.75 pm/με，较现有同类传感器性能显著提高。该方法通过协同优化传感干涉仪结构与虚拟游标效应，为高灵敏度光纤应变传感器设计提供了新思路。

关键词： 锯齿形毛细管光纤；光纤应变传感器；虚拟游标效应；高灵敏应变传感

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0659－07

High-Sensitivity Strain Sensor Based on a Serrated Fiber Mach-Zehnder Interferometer with Virtual Vernier Effect

CHEN Liping, WEI Yong

(Chongqing Three Gorges University, Faculty of Electronic and Information Engineering, Chongqing 404000, CHN)

Abstract: To enhance the sensitivity of fiber-optic strain sensors utilizing the virtual vernier effect, this paper proposes a serrated fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) design. The sensing region of a capillary fiber was etched with serrated microstructures via CO_2 laser processing, reducing its cross-sectional area to induce strain concentration and thereby significantly amplify the intrinsic sensitivity of the sensing interferometer. Experimental results demonstrate that at a serration depth of 30 μm, the strain sensitivity of the sensing interferometer reaches 2.5 pm/με. Further amplification was achieved by applying the virtual vernier effect, where the sensing signal was superimposed with a virtual reference signal (amplification factor = 136.6). This dual-path optimization resulted in an envelope valley strain sensitivity of 341.75 pm/με for the virtual vernier effect sensor, significantly surpassing the performance of existing comparable sensors. This methodology synergistically optimizes both the interferometer's structural design and the virtual vernier effect amplification, establishing a novel paradigm for designing high-sensitivity fiber-optic strain sensors.

Key words: serrated capillary fiber; fiber-optic strain sensor; virtual vernier effect; high-sensitivity strain sensing

收稿日期：2025－04－27.

*通信作者：陈丽萍

0 引言

高灵敏度光纤应变传感器在结构健康监测中应用广泛[1-2]。基于虚拟游标效应的应变传感技术通过叠加传感干涉信号与参考干涉信号形成游标包络,可显著放大灵敏度,已成为光纤传感领域的重要突破方向[3-4]。进一步提升虚拟游标效应传感器灵敏度,对拓展其应用范围、更好地服务高灵敏应变测量具有重要研究意义。

基于虚拟游标效应的应变传感器,灵敏度由放大因子和传感干涉仪应变灵敏度共同决定。目前的研究主要集中于通过增大放大因子来提升应变灵敏度,当传感干涉光谱与虚拟参考光谱的自由光谱范围(Free Spectral Range,FSR)差异越小时,放大因子越大,游标效应传感器的灵敏度越高。例如,Zhang等通过生成与传感干涉光谱FSR相近的虚拟参考信号,实现放大因子提升至188.6,采用灵敏度为1.67 pm/με的传感干涉仪,最终应变灵敏度提升至315 pm/με[5]。Bei等通过将放大因子提高至1 000,采用灵敏度为0.21 pm/με的传感干涉仪,最终应变灵敏度仅达到216.56 pm/με[6]。尽管增大放大因子可显著提升虚拟游标效应应变传感器的灵敏度,但若传感干涉仪自身灵敏度过低,虚拟游标效应应变传感器的灵敏度提升会受到限制。

传感干涉仪自身应变灵敏度由应变引起的传感干涉仪光程差变化量决定,应变引起的光程差变化量越大,传感干涉仪的灵敏度越高。在光纤干涉应变传感器研究中,减小传感光纤横截面积可以将应变集中于传感光纤区域,增大传感光纤所受到应变,进而增大传感干涉仪光程差变化量,提升传感干涉仪应变灵敏度。例如,Zhao等提出的锥形光纤干涉仪[7],通过熔融拉锥技术将传感区直径由125 μm缩减至51.3 μm,传感干涉仪灵敏度提升至8.62 pm/με,使相同应变下光纤轴向应变提高3倍。Andé等提出一种锥形多模光纤干涉应变传感器[8],将多模光纤直径由125 μm拉锥至15 μm,该干涉仪的灵敏度提升至23.69 pm/με,轴向应变提高10.4倍。若通过减小传感光纤区域的横截面积,提升传感干涉仪自身应变灵敏度,再与放大因子结合,可进一步提升虚拟游标效应传感器的应变灵敏度。

基于此,本文提出一种基于虚拟游标效应的锯齿形光纤马赫曾德尔干涉仪(Mach Zehnder Interference,MZI)高灵敏应变传感器。首先,对毛细管光纤进行锯齿形加工,减小传感干涉仪横截面积,使应变集中于传感光纤区域,进而提升传感干涉仪应变灵敏度。然后,将该参考干涉信号与传感干涉信号进行叠加,形成虚拟游标效应,进一步提升虚拟游标效应应变传感器灵敏度。该方案制作简单、成本低,为虚拟游标效应应变传感器的增敏研究提供新方案。

1 原理分析与传感器设计

1.1 原理分析

当传感干涉仪受轴向应变调制时,弹光效应与应变效应会导致发生干涉的两个模式的光程差变化,进而引起干涉谷波长漂移[9]。通过检测干涉光谱波长漂移量,即可实现对轴向应变的测量。假设忽略温度等其他物理量对波谷的影响,其传感干涉仪的应变灵敏度S_S可以表示为[10]:

$$S_S=\frac{\Delta\lambda_{dip}}{\Delta\varepsilon}=\frac{2}{2m+1}\left[\Delta\left(\Delta n_{eff}L\right)\right]=\frac{2}{2m+1}\left[\Delta\left(\Delta n_{eff}\right)L+\Delta n_{eff}\Delta L\right] \tag{1}$$

式中,$\Delta\lambda_{dip}$为应变引起的干涉谷波长变化,$\Delta\varepsilon$为施加的应变,Δn_{eff}为传感干涉仪中发生干涉的两个模式的有效折射率差,L为传感光纤长度,$\Delta\left(\Delta n_{eff}L\right)$为应变引起的光程差变化量,$\Delta L$为应变引起的传感光纤长度变化量,$\Delta\left(\Delta n_{eff}\right)$为应变引起的有效折射率差的变化量,$m$为干涉阶数。由公式(1)可知,当应变引起的光程差变化量越大时,传感干涉仪的灵敏度越高。

根据弹光效应可知,传感区受到更大的应变将引起更大的有效折射率差变化,使得传感器的光程差变化量越大,从而提升传感器灵敏度。当传感光纤与传输光纤在受到外界应变时,施加到传感光纤与传输光纤上的应变有如下关系[11-12]:

$$\varepsilon_1EA_1=\varepsilon_2EA_2 \tag{2}$$

式中,ε_1与ε_2分别为传感光纤与传输光纤受到的应变,A_1与A_2分别为传感光纤与传输光纤的横截面积,E为光纤的杨氏模量。通过该公式可知,当传感光纤横截面积小于传输光纤时,应变集中于传感区域,使得传感区受到更大的应变,从而增大由应变引起的光程差变化量,实现传感干涉仪应变灵敏度的提升。并且,传感光纤所减小的横截面积越大,应变灵敏度越高。

虚拟游标效应是将传感干涉仪光谱与虚拟参考光谱叠加,利用两者FSR的微小差异形成游标包络[13-14]。当应变引起传感干涉仪光谱漂移时,两光谱干涉峰的相位匹配点偏移,导致包络谷位置发生

显著移动，通过检测包络谷的放大位移量，即可实现将传感干涉仪的微小波长变化转化为高灵敏度应变信号。其包络谷的应变灵敏度可以表示为[4]：

$$S_{envelop}=MS_S=\frac{FSR_R}{FSR_R-FSR_S}S_S \tag{3}$$

式中，M为放大因子，FSR_R与FSR_S分别为参考干涉仪与传感干涉仪的自由光谱范围。由于温度对传感干涉仪波谷的影响已被忽略，且虚拟游标的参考干涉信号由计算人为生成，不受外界干扰，因此虚拟游标效应传感器具有较高的鲁棒性[13]。此外，由公式(3)可知，包络谷的灵敏度由放大因子和传感干涉仪的灵敏度共同决定。当放大因子不变时，传感干涉仪的灵敏度越高，包络谷的灵敏度越高。

1.2　传感器设计

基于以上分析，基于虚拟游标效应的锯齿形 MZI 应变传感器设计如图 1 所示，传感区域为中间的锯齿形毛细管光纤，两侧多模光纤起分光与合光作用，两侧单模光纤为输入与输出光纤。左侧单模光纤注入光，经过多模光纤扩束后，光束分别进入到毛细管光纤包层与其中部的空气孔中，传输一段距离后形成光程差，再在右侧多模光纤处耦合回单模光纤中，发生干涉。当传感干涉仪受到应变调制时，由于弹光效应和应变效应，毛细管光纤中两束干涉光的有效折射率差和路径长度增大，使得光程差增大，相位差增大，进而使干涉谷波长位置红移，实现应变传感。为了得到虚拟游标效应传感器的参考光谱，对传感干涉仪的光谱进行提取、傅里叶滤波，生成与其 FSR 相似的参考信号，将两者信号进行叠加，实现高灵敏的虚拟游标效应传感器。

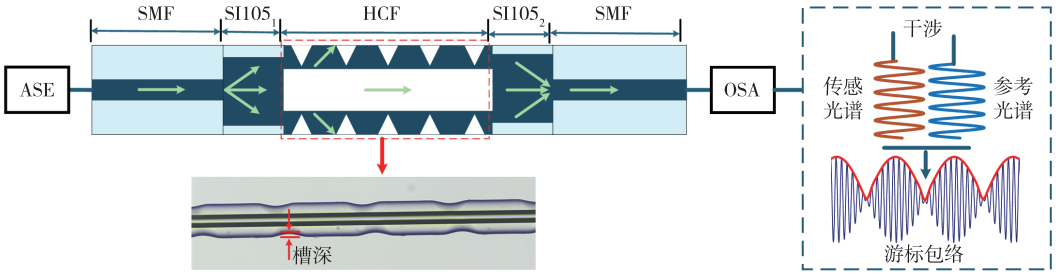


图 1　基于虚拟游标效应的锯齿形光纤 MZI 应变传感器示意图

2　实验装置搭建及传感器制作

2.1　实验装置搭建

实验系统配置如图 2 所示，锯齿形光纤 MZI 传感干涉仪的右端单模光纤连接至宽带光源(HY-ASE-CL-17-N-B-FP，HOYATEK)，左端则接入光谱仪(AQ6370D，YOKOGAWA)。

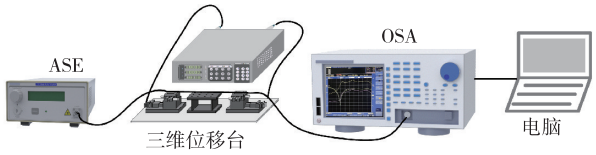
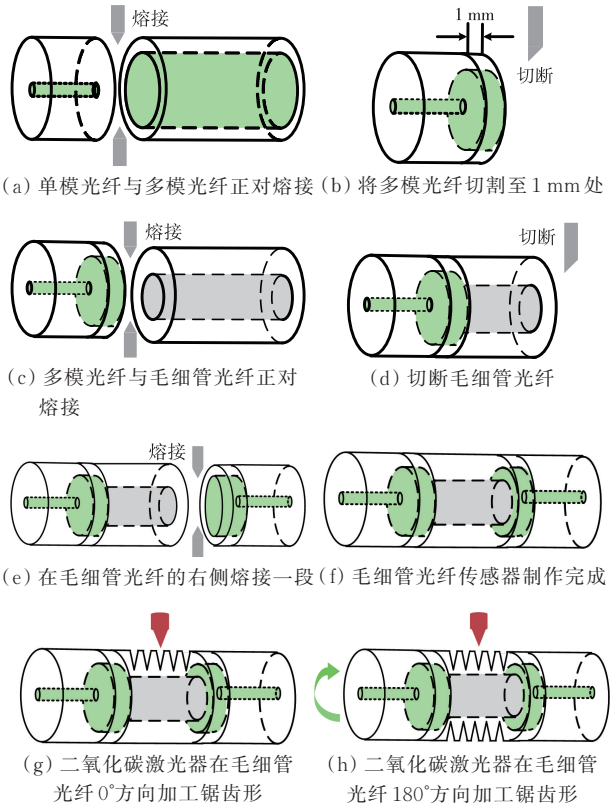


图 2　传感器在应变测试的实验装置示意图

为确保应变测量的精准性，传感器主体被精密固定于三维位移台中心区域，该位移系统配备电机驱动的夹具间距调节功能，用于施加轴向应变。应变控制机制通过调节三维位移台夹具间距实现。当光纤固定在夹具后，打开应变控制器，夹具间的初始间距为 24 cm；当电机驱动位移台产生 24 μm 位移量时，每次施加的应变为 $\Delta L/L=100\ \mu\varepsilon$。实验过程中，按照不同应变状态依次对干涉光谱进行连续采集。最后，将采集的光谱数据传输至计算机终端，利用 Origin 软件完成数据处理，最终获取应变-光谱响应特性曲线。

2.2　锯齿形微结构传感干涉仪的制作

锯齿形微结构传感干涉仪的制作流程如图 3 所示。首先，使用光纤熔接机(FL-116，Fiberlink)将单模光纤(SMF-28e，Corning)与阶跃多模光纤(SI105/125-22/250，YOFC)进行正对熔接。随后，利用光纤定长切割装置将 SI105 光纤切割为 1 mm 长度，再通过光纤熔接机将 SMF-SI105 复合结构与毛细管光纤熔接。完成熔接后，对毛细管光纤进行精密切割，并熔接另一段 SI105-SMF 结构，至此初步完成毛细管光纤传感器的制作。接下来，利用二氧化碳激光加工器(MC-E-B，Yueming Laser)沿毛细管光纤的 0°方向进行锯齿形加工。将光纤翻转 180°，在另一方向重复相同加工步骤，最终形成完整的锯齿形 MZI 传感干涉仪。



(a) 单模光纤与多模光纤正对熔接 (b) 将多模光纤切割至1 mm处

(c) 多模光纤与毛细管光纤正对熔接 (d) 切断毛细管光纤

(e) 在毛细管光纤的右侧熔接一段 (f) 毛细管光纤传感器制作完成

(g) 二氧化碳激光器在毛细管光纤0°方向加工锯齿形 (h) 二氧化碳激光器在毛细管光纤180°方向加工锯齿形

图3 锯齿形MZI传感干涉仪的制作流程图

二氧化碳激光加工的具体步骤如下:将制备的毛细管光纤传感器固定于三维位移台夹具内,调整位移台使光纤位于激光焦点的正下方。通过控制计算机设定加工参数:加工长度为1.5 mm,扫描速度为2 000 mm/s,激光功率为35%,频率为29 kHz,加工次数为2,3和4次,分别对应生成深度为10 μm,20 μm和30 μm的锯齿结构。激光加工后,光纤包层单侧因熔融变形形成锯齿形凹槽。最后,将夹具两端翻转180°,并将计算机控制的加工区域右移1 μm,以相同参数对光纤进行二次加工,确保锯齿结构的对称性,最终完成锯齿形MZI传感干涉仪的制备。

为控制FSR大小,从而形成较为密集的干涉光谱,研究毛细管光纤的长度对初始光谱FSR的影响。对长度分别为0.5 mm,1 mm与1.5 mm的未进行锯齿形微加工的毛细管光纤MZI进行光谱采集,光谱如图4所示。当长度为1.5 mm时FSR较小,光谱更加密集,越有利于形成虚拟游标效应,因此,选择长度为1.5 mm的毛细管光纤进行后续实验。由于毛细管光纤的包层半径为62.5 μm,纤芯半径为25 μm,为避免锯齿结构加工深度超过纤芯导致光从纤芯泄漏至空气,进而破坏纤芯与包层间的折射率差并影响干涉条件,其锯齿结构的最大深度限制为37.5 μm(即包层半径减去纤芯半径的差值)。为探究传感光纤横截面积对应变灵敏度的影响规律,实验设计并制作了锯齿深度分别为10 μm,20 μm和30 μm的三种传感干涉仪,通过应变实验测试与数据分析开展对比研究。

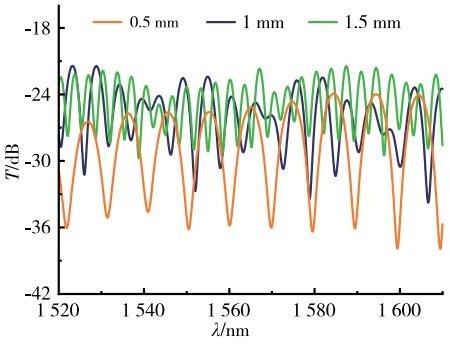
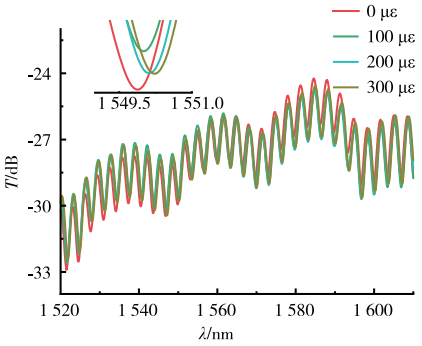


图4 未进行锯齿形微加工的毛细管光纤长度分别为0.5 mm,1 mm与1.5 mm的初始光谱

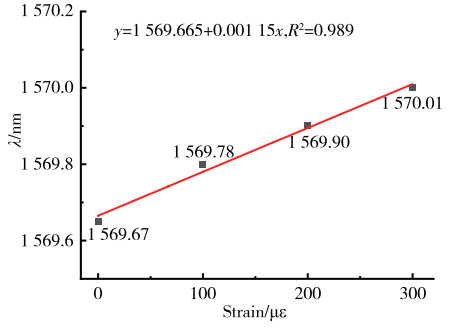
3 实验结果

3.1 锯齿形MZI传感干涉仪应变传感实验

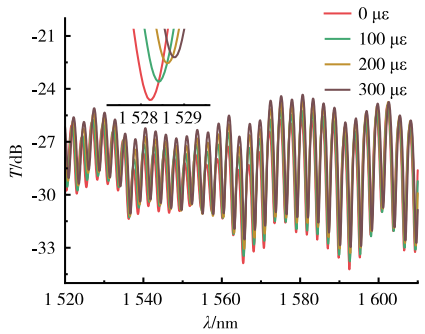
对锯齿深度分别为10 μm,20 μm和30 μm的锯齿形MZI传感干涉仪进行应变实验测试,数据如图5所示。



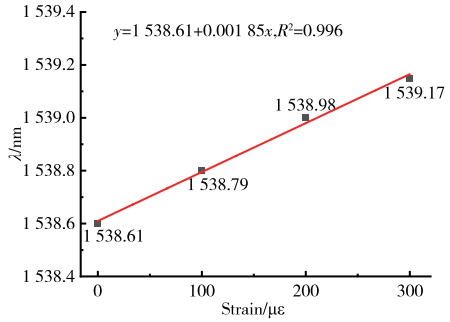
(a) 加工深度为10 μm的锯齿形毛细管光纤MZI光谱响应



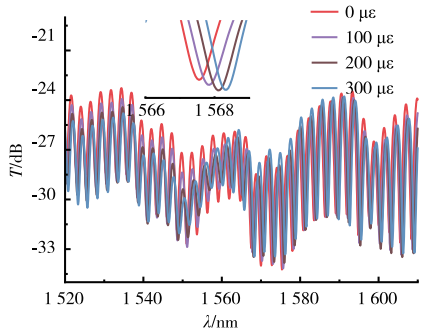
(b) 加工深度为10 μm的锯齿形毛细管光纤MZI特征波长与应变关系



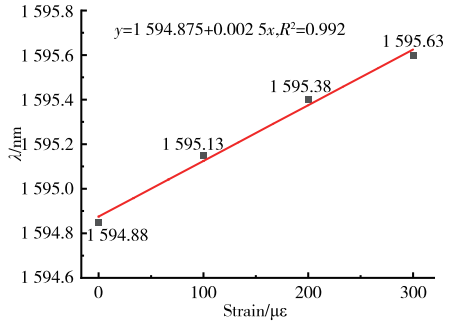
(c) 加工深度为 20 μm 的锯齿形毛细管光纤 MZI 光谱响应



(d) 加工深度为 20 μm 的锯齿形毛细管光纤 MZI 特征波长与应变关系



(e) 加工深度为 30 μm 的锯齿形毛细管光纤 MZI 光谱响应



(f) 加工深度为 30 μm 锯齿形毛细管光纤 MZI 特征波长与应变关系

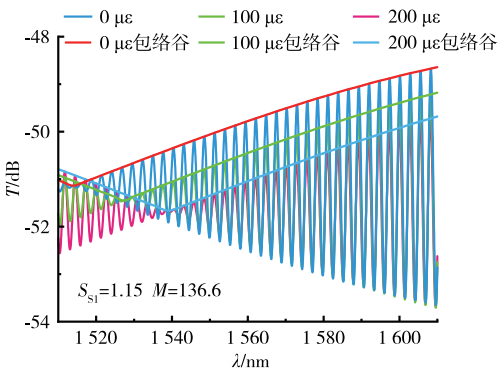
图 5　无游标效应的单个锯齿型毛细管光纤 MZI 的应变响应

从图 5(a)、(c)和(e)中可以看出，在测量范围为 0～300 με，随着轴向应变的施加，锯齿形 MZI 光纤应变传感器发生干涉的波谷出现红移，与前面理论分析一致。对锯齿加工深度分别为 10 μm，20 μm 和 30 μm 的锯齿形 MZI 光纤应变传感器干涉光谱数据进行寻谷处理后，干涉谷波长与轴向应变的对应关系分别如图 5(b)、(d)和(f)所示。从图中可以看出，干涉谷波长随应变变化呈现线性关系，并且具有良好的线性度。

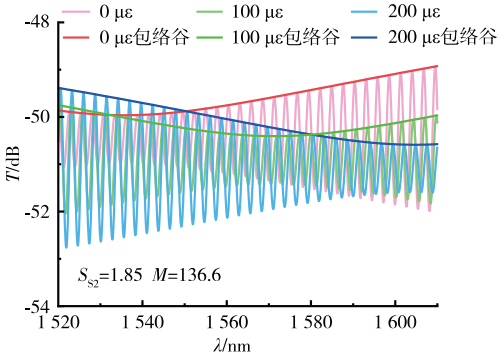
经计算得出，锯齿加工深度为 10 μm 的毛细管光纤干涉仪的应变灵敏度为 1.15 pm/με，线性度为 0.989；锯齿加工深度为 20 μm 的毛细管光纤干涉仪的应变灵敏度为 1.85 pm/με，线性度为 0.996；锯齿加工深度为 30 μm 的毛细管光纤干涉仪的应变灵敏度为 2.5 pm/με，线性度为 0.992。实验结果表明，随着锯齿加工深度的增加，被激光去掉的光纤横截面积增加，应变越集中于毛细管光纤区域，传感器的应变灵敏度越大。

3.2　虚拟游标效应结果分析

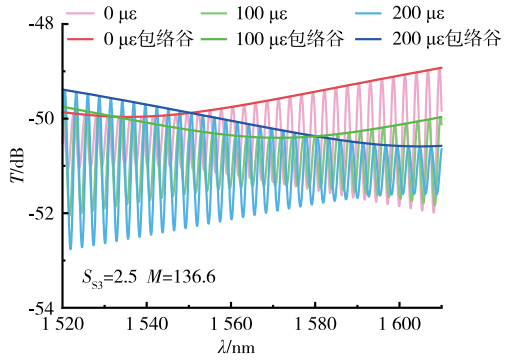
将该干涉仪的原始光谱进行滤波、傅里叶变换和快速傅里叶逆变换滤波，生成与传感信号相似但不相等的信号，作为参考信号，将二者叠加形成虚拟参考干涉信号的光纤干涉游标效应传感器。增大放大因子可提升灵敏度，但受光谱波长限制，放大因子过大会导致应变调制下包络谷超出可观测范围。为兼顾高灵敏度与可观测性，最终选择放大因子为 136.6。图 6 分别展示在相同放大因子(M=136.6)下，不同锯齿深度的游标效应传感器游标包络光谱。



(a) 加工深度为 10 μm



(b) 加工深度为 20 μm



（c）加工深度为 30 μm

图 6 不同锯齿加工深度的虚拟参考光谱与传感光叠加后形成虚拟游标光谱

通过提取不同应变下的包络谷以及计算包络谷应变灵敏度大小，锯齿深度分别为 10，20 与 30 μm 的游标效应传感器的包络谷应变灵敏度分别为 156.06，252.51 与 341.75 pm/με。根据实验结果可知，当放大因子相同时，传感干涉仪的灵敏度越高，游标包络谷灵敏度越高，这与前面的理论分析一致。

4 讨论

本研究提出一种基于虚拟游标效应的锯齿形光纤 MZI 应变传感器。通过对毛细管光纤进行锯齿形加工，减小了传感光纤的横截面积，使应变集中于传感区域，进而增大传感光纤所受到的实际应变，最终提升传感干涉仪的应变灵敏度。结合放大因子的协同作用，使基于虚拟游标效应的光纤干涉应变传感器灵敏度实现显著提升。与其他虚拟游标效应应变传感器的性能进行了比较，如表 1 所示。

表 1 基于虚拟游标效应的光纤干涉应变传感器性能比较

传感器结构	传感干涉仪灵敏度/(pm·με^{-1})	放大因子	游标效应传感器灵敏度/(pm·με^{-1})	参考文献
基于单模光纤的 FPI	−0.21	1 000	216.56	[6]
基于空芯光纤的 FPI	1.31	14	18.36	[15]
基于空芯光纤的 FPI	1.67	188.6	315	[5]
基于锯齿型 MZI	2.5	136.6	341.75	本文

相较于其他采用虚拟游标效应的应变传感器，锯齿形 MZI 结构的传感器具有更高的应变灵敏度。当游标效应传感器的放大因子相同时，锯齿形传感干涉仪应变灵敏度越高，游标效应传感器的应变灵敏度越高。所提出的灵敏度增强机制在高放大因子条件下，通过优化传感干涉仪灵敏度参数，实现了游标效应传感器灵敏度的进一步提升，该技术方案可拓展至温度、压力、折射率等物理参量的精密测量领域。

5 结论

本文提出一种基于虚拟游标效应的锯齿形光纤 MZI 高灵敏应变传感器。通过对毛细管光纤进行锯齿形加工，让应变集中于传感区域，传感干涉仪的最高应变灵敏度可达到 2.5 pm/με。在形成虚拟游标效应后，放大因子为 136.6，基于虚拟游标效应的光纤干涉应变传感器的应变灵敏度可达到 341.75 pm/με。该传感器具有结构紧凑、成本低、参考干涉仪不易受外界干扰等优势，有望在桥梁结构监测、飞机形变检测等结构健康检测领域得到广泛应用。

参考文献：

[1] Dai Z, Mu Z, Su C, et al. A highly sensitive strain fiber sensor based on waved core structure [J]. Optics & Laser Technology, 2024, 169: 110103.

[2] Lopez-Higuera J M, Rodriguez Cobo L, Quintela Incera A, et al. Fiber optic sensors in structural health monitoring [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(4): 587-608.

[3] Tang Y, Wang C, Ruan S, et al. Virtual Vernier effect-based high sensitivity optical fiber humidity sensor [C]//2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks, 2021: 1-3.

[4] Yang P, Jiang S, Wang Z, et al. Tunable sensitivity microfiber Sagnac loop based on a virtual reference arm for microdisplacement detection [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 79: 103344.

[5] Zhang F, Qi B, Su B, et al. High sensitivity hollow-core fiber strain sensor based on signal processing assisted vernier effect [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(19): 1050-1053.

[6] Bei G, Wei T, Ma H, et al. Combination of virtual optical vernier method and peak position recognition without envelope fitting: a general method for sensor sensitivity enhancement [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 43(7): 3292-3299.

[7] Zhao Y, Chen M Q, Peng Y. Tapered hollow-core fiber air-microbubble fabry - perot interferometer for high sensitivity strain measurement [J]. Advanced Materials Interfaces, 2018, 5(21): 1800886.

[8] Andre R M, Biazoli C R, Silva S O, et al. Strain-temperature discrimination using multimode interference in tapered fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 25(2): 155-158.

[9] 王 磊，张钰民，姚霁峰，等. 单模-空芯-单模光纤微结构应变传感特性研究[J]. 半导体光电，2024，45(4)：515-522.
Wang Lei, Zhang Yumin, Yao Jifeng, et al. Research on the

strain sensing characteristics of single mode-hollow core-single mode optical fiber microstructure [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(4): 515-522.

[10] Li X, Chen J, Wang S, et al. An S-shaped core M-Z interferometer induced by arc-discharging for strain sensing[J]. Photonics, 2024, 11(9): 816.

[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] Zhang H, Zhang M, Kang J, et al. High sensitivity fiber-optic strain sensor based on modified microfiber-assisted open-cavity Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4556-4563.

[13] 杨翔文, 罗彬彬, 石胜辉, 等. 基于虚拟游标效应的夹层多模光纤马赫-曾德尔干涉仪高灵敏温度传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 1706002.
Yang Xiangwen, Luo Binbin, Shi Shenghui, et al. High-sensitivity temperature sensor based on sandwich multimode fiber Mach-Zehnder interferometer with virtual vernier effect [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1706002.

[14] Zornoza A, Flores-Bravo J A, Zubia J, et al. Sensitivity magnification of an interferometric optical fiber sensor with a length-linked virtual reference [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 167: 109819.

[15] Wu Y, Xia L, Li W, et al. Highly sensitive fabry - perot demodulation based on coarse wavelength sampling and vernier effect [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(6): 487-490.

作者简介：

陈丽萍(1999—),女,四川省南充市人,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感。