

引用本文：韦香宁,童子劲,徐琰,等. 基于虚拟游标效应增敏的 TMZI 光纤 CTD 传感器[J]. 光通信技术,2025,49(4):30-38.

基于虚拟游标效应增敏的 TMZI 光纤 CTD 传感器

韦香宁^{1,2}, 童子劲³, 徐琰^{2,4}, 潘雪梅^{1,2}, 张超^{1,2}, 农恒昌^{1,2}, 于洋^{2*}, 张振荣¹

(1.广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004; 2.国防科技大学 理学院, 长沙 410073;

3.中南大学 物理学院, 长沙 410083; 4.山东理工大学 物理与光电工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:为了实现对盐度、温度和压力的高精度测量,提出了一种基于虚拟游标效应增敏的马赫-曾德尔干涉仪(TMZI)光纤温盐深(CTD)传感器。通过优化光纤结构,该传感器克服了传统单模光纤和微纳光纤耦合器的机械易损问题。采用快速傅里叶变换(FFT)和逆傅里叶变换(IFFT)处理光谱数据,并结合虚拟游标效应,显著提升了测量灵敏度。实验结果表明:在 0~5.85‰和 5.85‰~19.55‰盐度范围内,灵敏度分别达到 37.310 nm/‰和 16.361 nm/‰;温度测量在 30.86~41.95 °C 内的灵敏度为 -27.667 nm/°C;压力传感在 0~4.5 MPa 内的灵敏度为 51.087 nm/MPa。

关键词:马赫-曾德尔干涉仪;多参数监测;快速傅里叶变换;逆傅里叶变换;虚拟游标效应

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0030-09

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



TMZI fiber optic CTD sensor based on virtual cursor effect sensitization

WEI Xiangning^{1,2}, TONG Zijin³, XU Yan^{2,4}, PAN Xuemei^{1,2},

ZHANG Chao^{1,2}, NONG Hengchang^{1,2}, YU Yang^{2*}, ZHANG Zhenrong¹

(1. School of Computer Electronic and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. School of Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 4. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong 255000, China)

Abstract: To achieve high-precision measurements of salinity, temperature, and pressure, a Mach-Zehnder interferometer (TMZI) based fiber-optic conductivity-temperature-depth (CTD) sensor enhanced by the virtual vernier effect is proposed. By optimizing the fiber structure, the sensor overcomes the mechanical fragility issues associated with traditional single-mode fibers and micro/nano fiber couplers. The spectral data is processed using fast Fourier transform (FFT) and inverse fast Fourier transform (IFFT), and combined with the virtual vernier effect, significantly improving measurement sensitivity. The experimental results indicate that the sensitivity reaches 37.310 nm/‰ and 16.361 nm/‰ within the salinity ranges of 0~5.85‰ and 5.85‰~19.55‰, respectively, the sensitivity of temperature measurement is -27.667 nm/°C within the range of 30.86~41.95 °C, and the sensitivity of pressure sensing is 51.087 nm/MPa within the range of 0~4.5 MPa.

Key words: Mach-Zehnder interferometer, multi-parameter monitoring, fast Fourier transform, inverse fast Fourier transform, virtual vernier effect

收稿日期:2024-11-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(62275269)资助。

作者简介:韦香宁(1997—),女,硕士研究生,现就读于广西大学计算机与电子信息学院,主要从事高灵敏度海洋多参量光纤传感器的设计与优化研究工作,重点探索新型光纤干涉结构、信号处理算法及其在复杂海洋环境中的应用,实现多参量同步监测的高精度传感方案,并进行性能验证与系统集成优化。

* **通信作者:**于洋(1984—),男,国防科技大学理学院副研究员,主要从事微纳光电子器件、人机交互技术、生化传感与极端环境监测技术等研究工作。



0 引言

海洋对气候和资源开发至关重要。传统电学式温盐深测量仪(CTD)传感器(测量电导率、温度、深度)因成本高、体积大、易受干扰,难以适应极端环境。而光纤传感器具有高精度、小型化、低成本及强抗干扰能力,成为更优的海洋监测方案。

盐度是海水的关键物理化学参数,直接影响气候研究和海洋动力学模拟^[1-4]。相较于传统电学测量法,基于折射率的盐度检测技术展现出显著优势^[5],主要实现方式包括:法布里-珀罗(F-P)腔结构^[6-9]、多模干

涉结构^[10-12]及表面等离子体共振(SPR)结构^[13-15]。光纤温度传感技术主要利用热光/热膨胀效应,常见器件有:光纤布喇格光栅^[16-17]、光纤干涉仪^[18-19]和微纳光纤结构^[20-22]。深度测量则依赖压力传感,关键器件包含:光纤布喇格光栅^[23]、光纤干涉仪^[24]和微纳光纤耦合系统^[25]。全光纤传感器凭借优异的稳定性和灵敏度,已成为复杂海洋环境长期监测的理想选择。

为提升传感器灵敏度,研究者通常采用双干涉仪级联或并联实现游标效应放大信号^[26-27],如级联法布里-珀罗干涉仪(FPI)传感器^[28]的温度灵敏度达 67.35 nm/°C,微纳光纤谐振器的折射率灵敏度达 6 523 nm/RIU^[29]。然而,传统方法存在光程差匹配困难和参考干涉仪易受干扰等问题,制约了系统稳定性。为此,本文提出一种基于虚拟游标效应增敏的马赫-曾德尔干涉仪(TMZI)光纤 CTD 传感器。

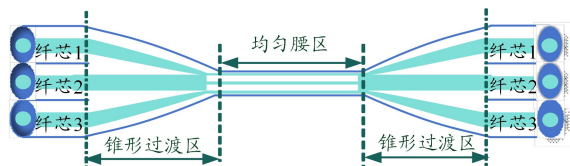
1 传感器结构与原理

1.1 传感器制作

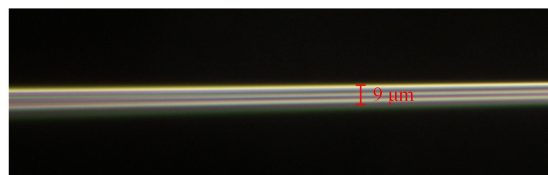
本文提出的传感器采用特殊设计的 TMZI 结构,如图 1 所示。该 TMZI 传感器由 3 根微纳光纤组成,通过光干涉效应实现对外界参数的高灵敏响应。单根微纳光纤腰区直径为 3 μm, TMZI 腰区直径为 9 μm。拉锥完成后,采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)将尾纤固定在不锈钢槽两侧,使中间的传感区域暴露并与外界介质直接接触,以增强结构强度并提高其对抗干扰能力,同时提升了传感器对温度和压力的敏感度。通过拉伸强度测试, TMZI 结构的断裂强度达 3.392 N,显著优于传统 SMF 锥形结构(1.005 N)和微纳光纤耦合器(OMC)结构(1.814 N)。

1.2 理论分析

光信号从 TMZI 的纤芯 1 输入,经锥形区时因三



(a) TMZI 的结构



(b) 均匀腰部区域放大图

图 1 传感器结构图

芯有效折射率差异产生相位差 φ_{13} , 最终在耦合区形成干涉条纹。这一干涉强度^[30]可描述为

$$I(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) + I_3(\lambda) + 2\sqrt{I_1(\lambda)I_3(\lambda)} \cos \varphi_{13} \quad (1)$$

其中, λ 为入射光波长, $I_1 \sim I_3$ 分别表示光从纤芯 1、纤芯 2、纤芯 3 传播时,在输出端的光强分布。当光从纤芯 1 入射时,其模式场能够绕过纤芯 2 的核心区域而在包层中有效重叠,这使得纤芯 1 与纤芯 3 之间形成最强的耦合效应。纤芯 1 与纤芯 2 之间的耦合较弱,这主要源于二者模式场的重叠程度有限,且光能量在通过纤芯 2 时发生了显著偏移;而纤芯 2 与纤芯 3 之间的耦合最弱,这既是因为两者间距较远,又因为模式场严重失配,导致能量传递效率极低,几乎可以忽略不计。三芯耦合仿真结果如图 2 所示。可以看出,光强在波导内部沿 Z 方向呈现明显的周期性聚焦和分裂,形成多个干涉条纹,表明模式之间存在相互耦合。而在三芯功率监测方面,纤芯 1 与纤芯 3 表现出明显的周期性波动,反映了它们之间强烈的能量交互;而纤芯 2 则始终保持平稳,印证了纤芯 1 与纤芯 2 之间微弱的耦合作用。此外,纤芯 2 与纤芯 3 的耦合幅度在仿真结果中几乎不可见,这进一步验证了二者之间极低的能量传递效率。

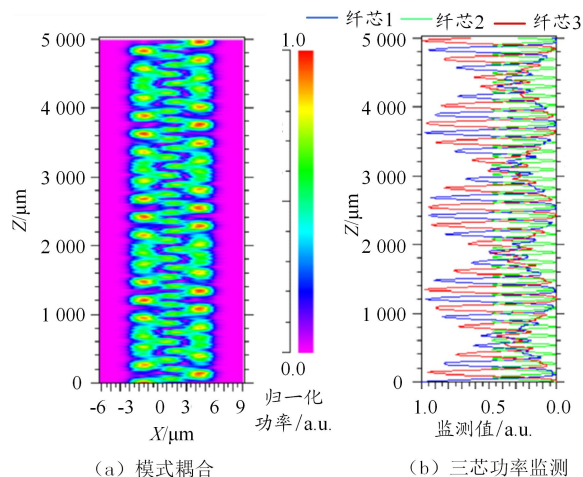


图 2 三芯耦合仿真结果

光信号的相位差可以表示为

$$\Delta \varphi_{13} = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^1 - n_{\text{eff}}^3)L}{\lambda} \quad (2)$$

其中, n_{eff}^1 和 n_{eff}^3 分别为纤芯 1 和纤芯 3 的有效折射率, L 为 TMZI 均匀腰区的长度。当相位差满足 $\Delta \varphi_{13} = 2m\pi$ (其中 m 为整数)时,系统输出透射光谱将出现干涉

韦香宁, 童子劲, 徐琰, 等: 基于虚拟游标效应增敏的 TMZI 光纤 CTD 传感器

峰值。

外界折射率和温度变化会引起 TMZI 纤芯有效折射率的变化, 进而导致干涉光谱偏移, 其温度响应为

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \frac{\lambda_m (\xi_1 n_{\text{eff}}^1 - \xi_3 n_{\text{eff}}^3)}{n_{\text{eff}}^1 - n_{\text{eff}}^3} \quad (3)$$

其中, ξ_1 和 ξ_3 分别为纤芯 1 和纤芯 3 的热光系数。

TMZI 干涉中, 压力响应可由式(4)表示。

$$\frac{d\lambda_m}{dP} = \lambda_m \left(\frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{d\Delta n_{\text{eff}}}{dP} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{L} \frac{dL}{dP} \right) \quad (4)$$

其中, $\frac{d\Delta n_{\text{eff}}}{dP}$ 表示压力引起的有效折射率差变化, $\frac{dL}{dP}$ 表示腔长的压力响应。

TMZI 干涉的折射率响应为

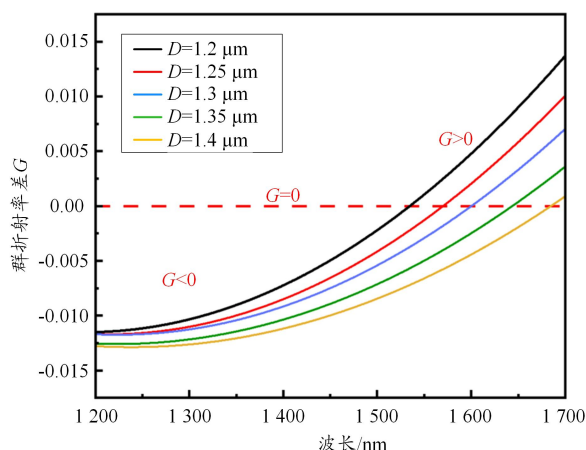
$$\frac{d\lambda_m}{dn} = \frac{\lambda_m}{\Delta n_{\text{eff}}} \frac{d\Delta n_{\text{eff}}}{dn} \quad (5)$$

其中, $\frac{d\Delta n_{\text{eff}}}{dn}$ 表示外部介质折射率变化引起的有效折射率差变化。由于外部折射率变化通常不引起结构长度变化, 故忽略 L 项的导数。

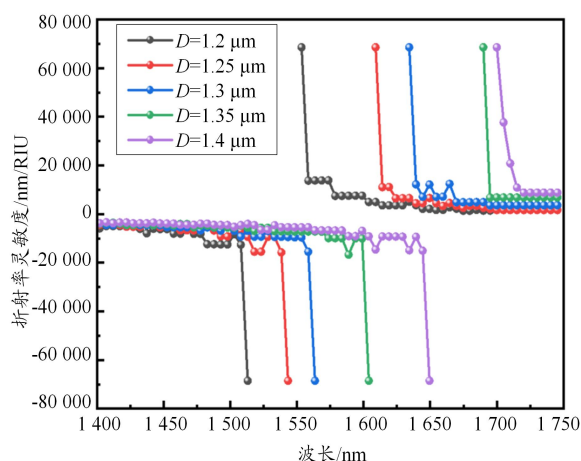
1.3 仿真分析

由于色散和热光学效应^[31-32], 石英晶体的折射率会受波长和温度影响。本文仿真采用 Rsoft 软件, 在温度 $T=25^\circ\text{C}$ 、盐度 $S=20\text{‰}$ 条件下, 设定 TMZI 中单模光纤直径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、外部液体折射率为 1.33, 并综合考虑石英晶体折射率受波长和温度影响的色散及热光学效应。模拟结果显示, 当光从纤芯 1 入射时, 会与纤芯 3 产生有效耦合并形成稳定干涉。

不同直径 D 的微纳光纤下群折射率差 G 和折射率灵敏度随波长变化的关系曲线如图 3 所示。从图 3(a) 可以看出, 群折射率差 G 随着波长的变化呈现出明显



(a) 不同微纳光纤直径的有效群折射率差 G 与波长的关系



(b) 不同微纳光纤直径的折射率灵敏度与波长的关系

图 3 群折射率 G 及色散拐点仿真结果

的色散特性, 且其斜率逐步改变, 形成了 3 个典型的区域: $G < 0$ 、 $G = 0$ 、 $G > 0$ 。此外, 随着光纤直径的增加, 色散拐点 ($G = 0$ 的位置) 逐渐向较长波长方向移动。从图 3(b) 可以看出, 传感器的折射率灵敏度也随着波长的变化表现出类似的色散特性。特别是在色散拐点附近, 折射率灵敏度会发生正负反转, 在理论上, 当 $G = 0$ 时, 折射率灵敏度将趋向于无穷大。由于盐度与折射率之间存在良好的线性关系, 因此折射率灵敏度的提高也意味着盐度分辨率的增强。

1.4 虚拟游标效应

传统游标效应需要 2 个具有相近自由光谱范围 (FSR) 的干涉仪协同工作, 但在锥形光纤结构中精确控制双干涉仪的 FSR 会显著增加系统体积和制造难度。为此, 本文采用先进的数据处理技术^[35-37], 降低物理尺寸的需求和制造复杂度的同时实现等效的游标放大效应。

初始状态下的传感干涉光谱可简化为

$$I_s^0 = I_1 + I_2 + I_3 + 2\sqrt{I_1 I_3} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_m} \Delta n_{\text{eff}}^{13} L\right) \quad (6)$$

当外部环境发生变化时, $\Delta n_{\text{eff}}^{13}$ 会发生变化。

根据前文分析, 纤芯 1 和纤芯 3 之间的干涉现象最为显著。因此, 在对原始信号进行快速傅里叶变换 (FFT) 时, 可以重点提取这两者之间干涉引起的主要频率成分。完成频率成分的提取后, 再通过逆傅里叶变换 (IFFT) 将这些频率成分转换回时域信号。这种方法不仅能够精确地分离出对环境变化高度敏感的信号成分, 从而大幅提高传感器的灵敏度和测量准确性, 还能够有效提升信号的清晰度。

考虑到原始光谱的波长范围(1 520~1 620 nm)限制,本文通过三角函数拟合方法将横坐标范围扩展至1 200~1 700 nm,覆盖光纤通信的低损耗波段,得到的传感信号如下:

$$I_s = A \cos(\omega_s \lambda + \phi_s) \quad (7)$$

其中, A 为传感信号的幅值,表示干涉强度的最大值,单位为 dB; ω_s 为干涉条纹的频率因子(角频率),与光程差相关,单位为 nm^{-1} ; ϕ_s 为初始相位,表示传感信号的初始相位偏移,单位为 rad。为了得到相近的 FSR,本文利用数据信号处理技术构造与传感信号频率成分相近的信号作为参考信号,如式(8)所示。

$$I_r = B \cos(\omega_r \lambda + \phi_r) \quad (8)$$

其中, B 、 ω_r 、 ϕ_r 分别表示参考信号的幅值、角频率和初始相位。将两者相乘后生成叠加信号 I_M ,通过对叠加信号进行包络提取,可以实现对信号的有效放大,从而增强对目标频率成分的检测灵敏度。

$$I_M = I_s \times I_r = \frac{AB}{2} \{ \cos[(\omega_s + \omega_r)\lambda + \phi_s + \phi_r] + \cos[(\omega_s - \omega_r)\lambda + \phi_s - \phi_r] \} \quad (9)$$

2 实验和分析

2.1 盐度测量

为了研究所提传感器对盐度和温度的敏感性,本文搭建了一个测试系统,如图4所示。该系统包括宽带光源(BBS)(波长范围为1 520~1 620 nm)、光谱分析仪(OSA)(分辨率为0.02 nm)、水箱(KQ2200DE)以及CTD(RBRbrevio3)。首先,往水箱中倒入2 L纯净水,再通过逐渐加入高浓度盐水来调整水箱中的盐度,从而最大限度减少NaCl晶体溶解时的吸热干扰。

本文在恒温27℃条件下进行盐度测试,结果如图5所示。可以看出,TMZI传感器的3个特征波谷(Dip1/2/3)在1 550~1 590 nm内均表现出明显红移。随

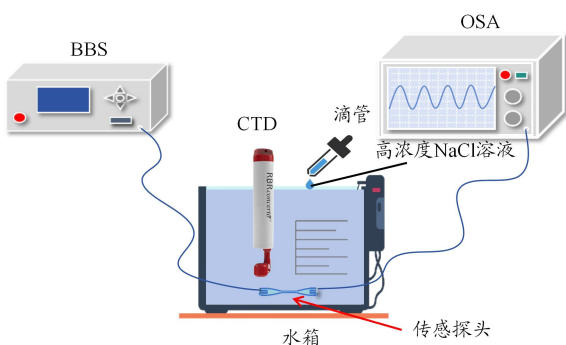
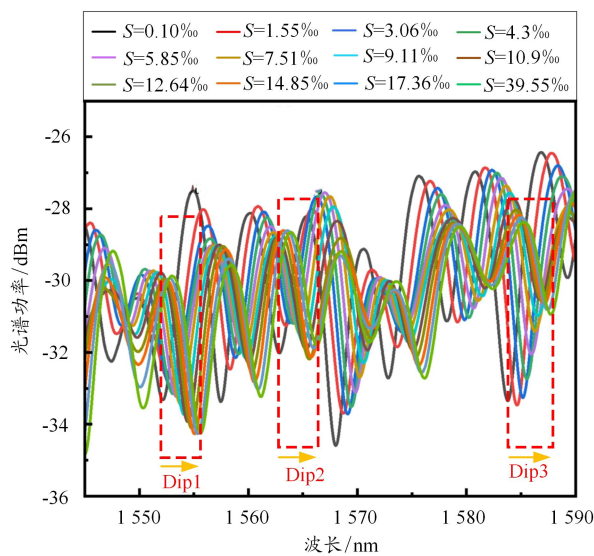
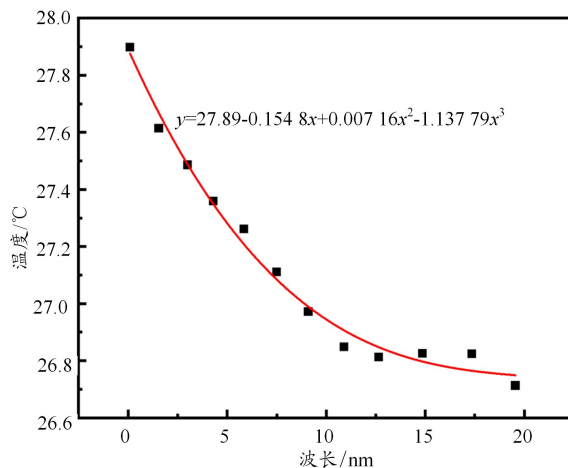


图4 温度-盐度实验装置图



(a) TMZI 盐度响应



(b) 温度-盐度关系

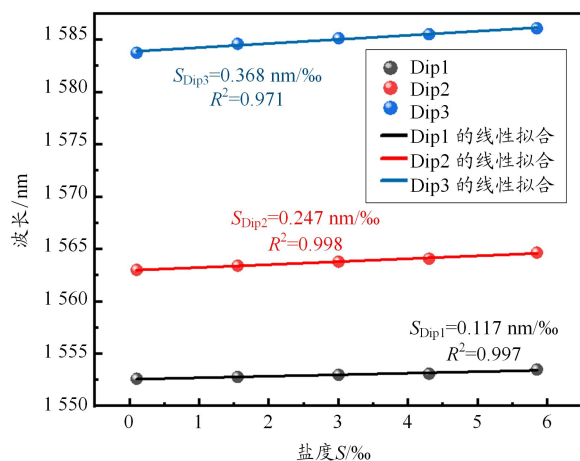
图5 盐度响应及盐度-温度关系

着水箱中盐度逐步升高,溶液温度也从27.898℃下降至26.713℃,总降幅为1.185℃,显示盐度变化对液体热力学平衡存在一定影响。

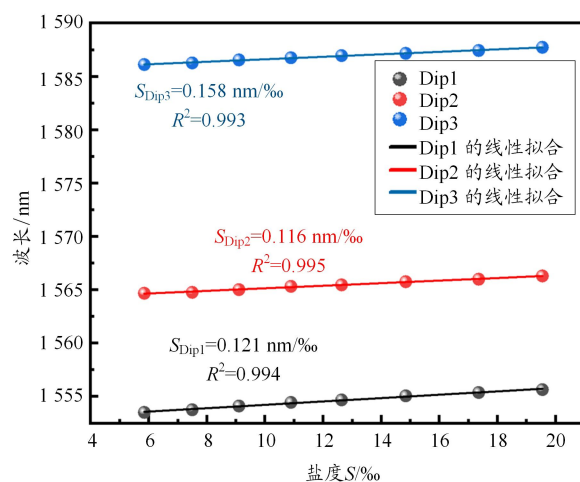
为了减小温度变化对盐度测量结果的影响,本文分别评估2个不同盐度范围内的拟合结果,如图6所示。可以看出,在较低盐度范围(0.1‰~5.85‰)内,本文以Dip1为例,其盐度灵敏度 S_{Dip1} 约为0.117 nm/‰,拟合优度 $R_2=0.997$;而在较高盐度范围(5.85‰~19.55‰)内, S_{Dip1} 为0.121 nm/‰,拟合优度 $R_2=0.994$ 。这表明在低盐度条件下,即使是微小的折射率变化也能引起干涉图样的显著相位变化,从而提升传感器对盐度变化的响应能力。

为进一步提升盐度灵敏度,本文引入了虚拟游标效应进行数据处理。不同盐度范围内传感器的盐度响应包络图如图7所示。可以看出,在低盐度范围内,干

韦香宁, 童子劲, 徐琰, 等: 基于虚拟游标效应增敏的 TMZI 光纤 CTD 传感器

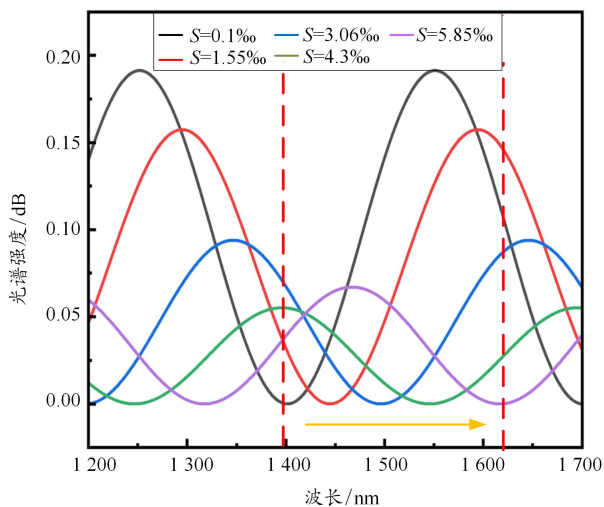


(a) 低盐度范围内(0.1‰~5.85‰)的拟合结果

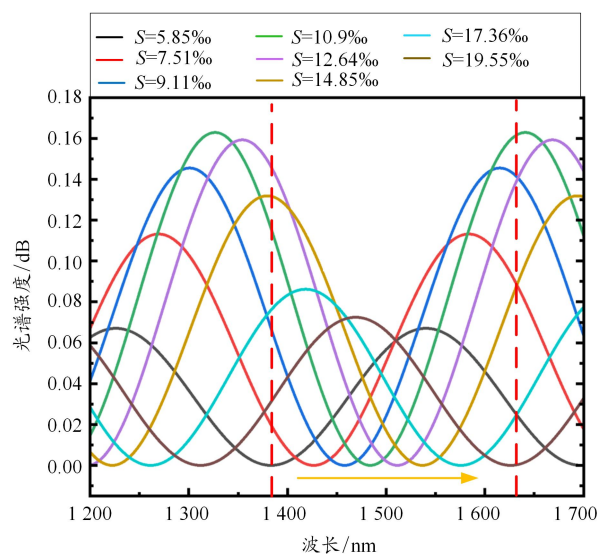


(b) 高盐度范围内(5.85‰~19.55‰)的拟合结果

图6 盐度响应拟合结果



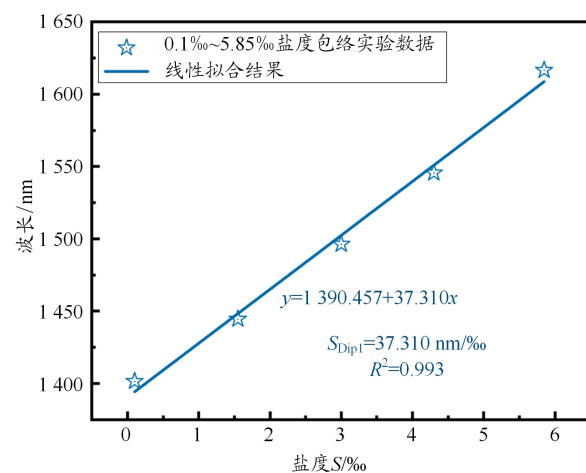
(a) 低盐度范围内(0.1‰~5.85‰)的盐度响应包络



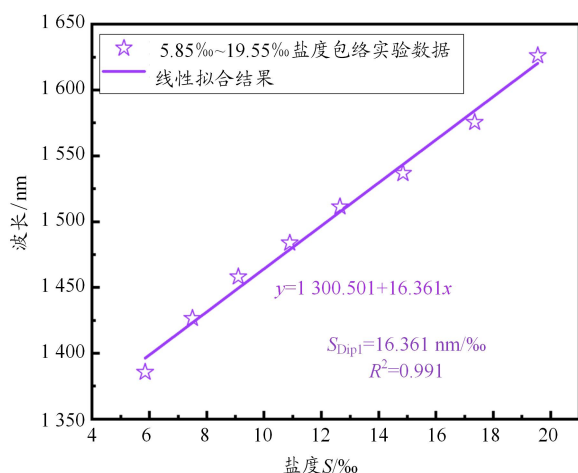
(b) 高盐度范围内(5.85‰~19.55‰)的盐度响应包络

图7 不同盐度范围盐度响应包络

涉包络的变化幅度较大,表明传感器对微小盐度变化具有较高的检测能力;随着盐度进一步增加,干涉包络的波峰间距逐渐变小,响应曲线趋于密集。对不同盐度范围内进行线性拟合,结果如图8所示。可以看出, Dip1 在低盐度范围内的盐度灵敏度 S_{Dip1} 由 0.117 nm/‰ 显著提升至 31.370 nm/‰,增幅约为 318 倍;在高盐度区间,其 S_{Dip1} 由 0.121 nm/‰ 提高至 16.361 nm/‰,增幅约为 135 倍。在数据处理中采用 125 000 采样点数的 FFT/IFFT 算法以匹配光谱仪采样要求,高采样密度为虚拟游标算法提供了更精细的光谱细节,使干涉条纹包络的亚像素级波谷定位精度显著提升。该处理策略使传感器分辨率值达到 0.00 054‰(低盐度区间)和 0.00 122‰



(a) 低盐度范围内(0.1‰~5.85‰)的盐度响应包络线性拟合结果



(b) 高盐度范围内(5.85‰~19.55‰)的盐度响应包络线性拟合结果

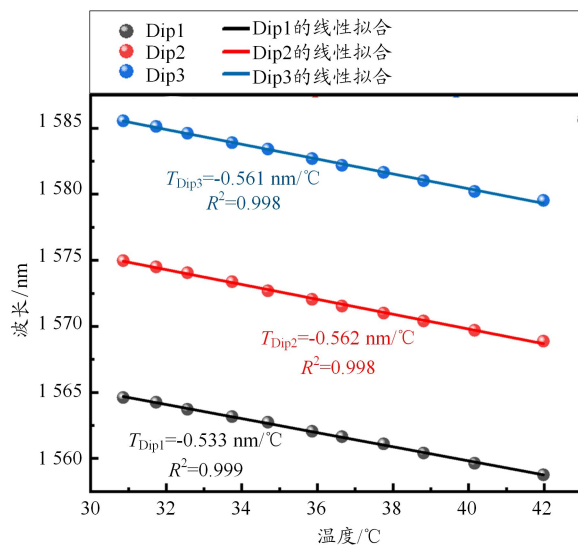
图8 不同盐度范围盐度响应包络线性拟合结果

(高盐度区间)。但虚拟游标处理增大的波长漂移幅度也引入了非线性扰动, 导致线性拟合优度 R^2 从 0.997 略降至 0.993。

2.2 温度测量

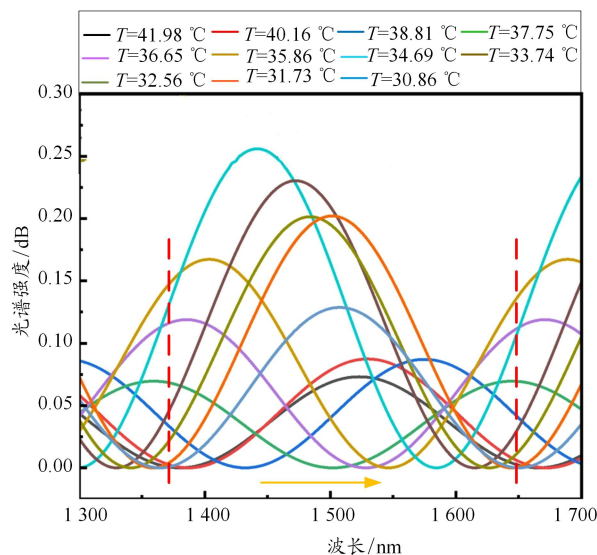
为评估 TMZI 传感器的温度敏感性, 本实验在保持盐度恒定的条件下, 通过加热平台将水箱中的水温从 27 °C 逐步升高至 50 °C。为减小升温过程中可能因温度不均匀性引起的实验误差, 实验重点测量了温度降低阶段的波长漂移数据, 结果如图 9 所示。可以看出, 当温度 T 从 41.98 °C 降至 30.86 °C 时, 3 个特征波谷(Dip1/2/3)在 1 550~1 580 nm 波段均发生系统性红移, 其温度灵敏度分别为 -0.533、-0.562、-0.561 nm/°C。

为优化温度测量性能, 本文引入了虚拟游标增强算法来处理原始干涉信号, 其结果如图 10 所示。可以

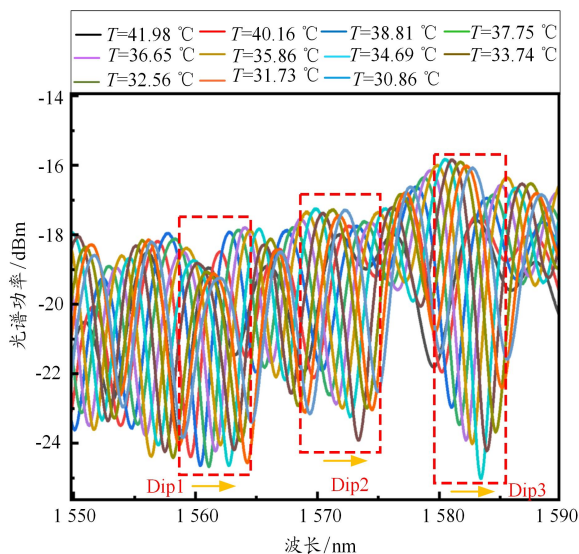


(b) 温度响应线性拟合

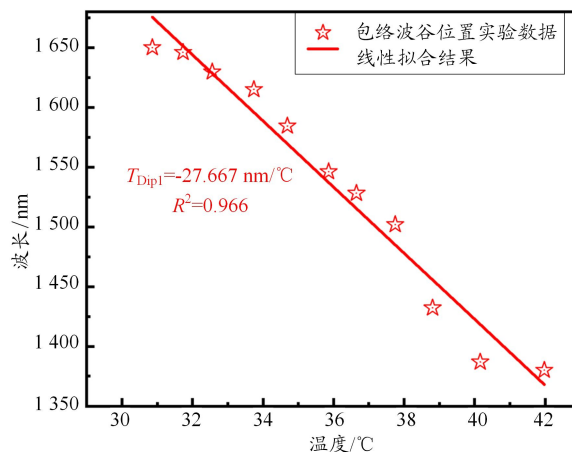
图9 温度响应及其拟合结果



(a) 温度响应包络



(a) 温度响应



(b) 响应包络线性拟合

图10 温度响应包络与拟合结果

韦香宁,童子劲,徐琰,等: 基于虚拟游标效应增敏的 TMZI 光纤 CTD 传感器

看出,随着温度降低,干涉包络整体向长波方向发生显著红移,表现出良好的温度响应特性。通过对这些包络曲线进行分析,计算出传感器输出光谱的总波长漂移达到了 118.822 nm,明显扩大了温度响应范围。进一步的数据拟合结果显示,温度灵敏度从 $-0.533 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 提升至 $-27.667 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ (Dip1 处提升 51 倍),大幅提高了测量精度和响应速度。

2.3 压力测量

为评估传感器的压力敏感性,实验采用密封水压罐装置,通过罐体预设的光纤孔引出传感器末端光纤。利用精密压力调节系统模拟不同水深对应的压力环境,同时采用高精度温压传感器(TD)进行压力参数的实时监测与记录。实验配置如图 11 所示。

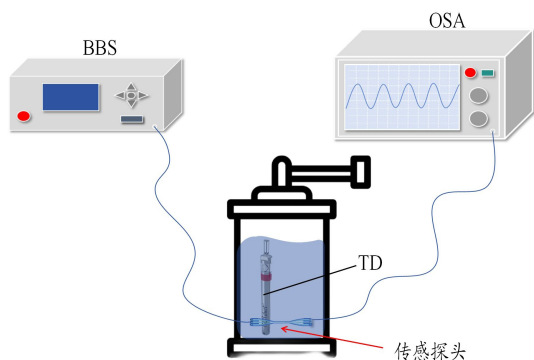
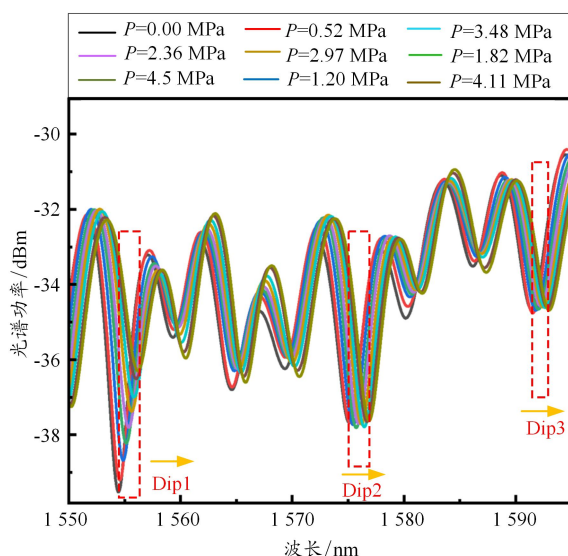


图 11 压力实验装置图

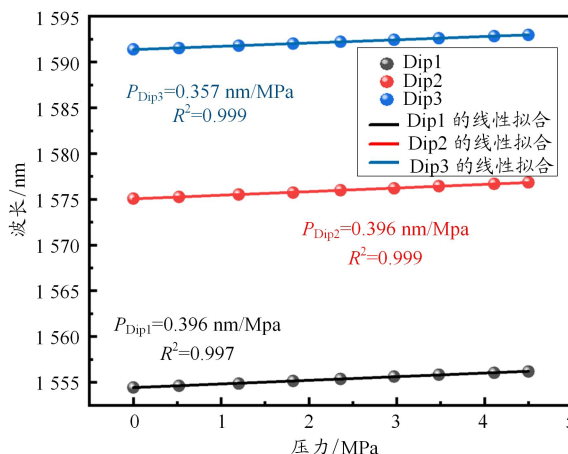
实验在恒温 (26.8°C) 条件下进行压力响应测试,结果如图 12 和图 13 所示。从图 12 可以看出,随着压力 P 的增大,传感器的 3 个特征波谷(Dip1/2/3)均向长波方向发生红移。通过线性拟合分析,Dip1 的压力灵敏度 P_{Dip1} 和 P_{Dip2} 相同 ($0.396 \text{ nm}/\text{MPa}$),而 P_{Dip3} 略低 ($0.357 \text{ nm}/\text{MPa}$)。从图 13 可以看出,随着压力 P 增加,干涉包络整体向长波方向发生显著红移,相较于图 12(a) 中原始干涉谱单个特征波谷的漂移,这种包络曲线的整体漂移更直观地反映了系统相位变化的趋势;经过虚拟游标效应处理后,特征波长的总漂移量放大至 230.78 nm ,Dip1 的压力灵敏度 P_{Dip1} 从 $0.396 \text{ nm}/\text{MPa}$ 显著提升至 $51.087 \text{ nm}/\text{MPa}$,这种优异的压力响应特性表明该传感器在海洋深度监测领域具有重要应用价值。

2.4 稳定性测试

为评估传感器的长期工作稳定性,实验选取 3 个特征波谷(Dip1/2/3)作为监测指标,在连续 7 d 的测试中每日固定时间采集光谱数据,结果如图 14 所示。可以看出,所有特征波长在测试期间保持稳定,以首日测量值为基准,Dip1/2/3 的最大波长漂移量分别为

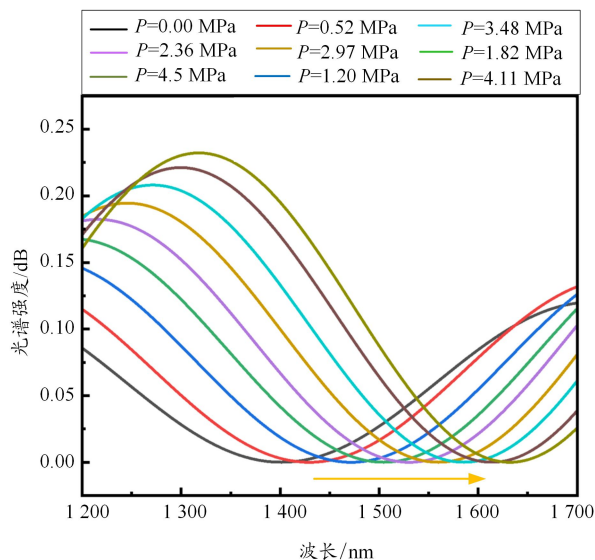


(a) 压力响应

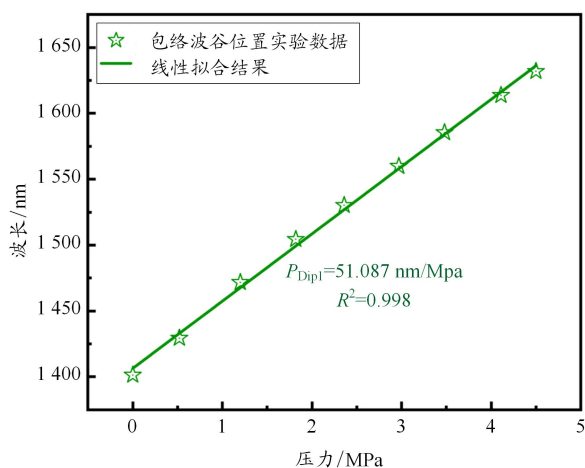


(b) 压力响应线性拟合结果

图 12 压力响应及其拟合结果

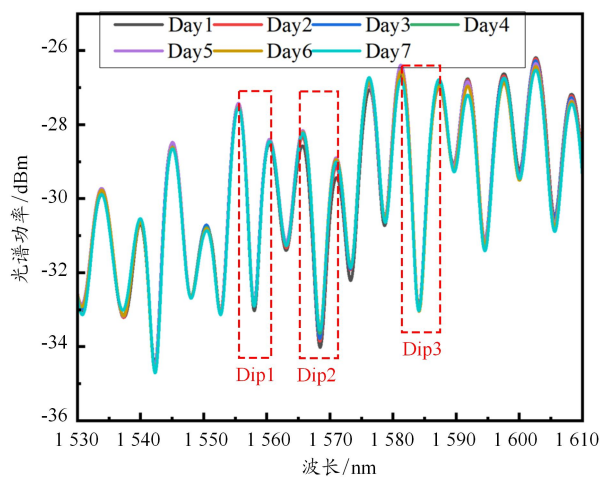


(a) 压力响应包络

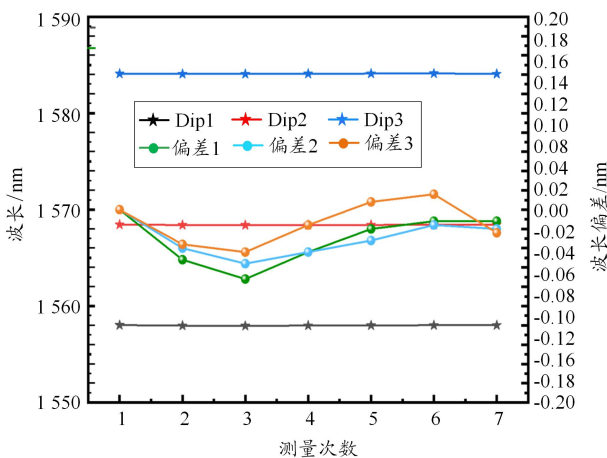


(b) 压力响应包络线性拟合结果

图 13 压力响应包络及其拟合结果



(a) TMZI 连续工作期间的透射光谱



(b) TMZI 内特征波谷的波长漂移与偏差

图 14 TMZI 连续 7 d 工作中的透射光谱和偏差数据

-0.072、-0.056、-0.044 nm; 这是因为不同天数室温轻微差异导致,结果表明该结构具有良好的时间稳定性。

3 结束语

本文提出了一种基于虚拟游标效应增敏的 TMZI 光纤 CTD 传感器,通过优化传感器结构和采用先进的信号处理技术,显著提升了海洋环境多参数测量性能。TMZI 结构结合 PDMS 封装显著提高了传感器的机械稳定性,相较于传统方法,本技术通过虚拟游标效应简化了系统结构,在保证测量精度的同时显著提升了可靠性和成本效益。实验验证表明:在盐度测量方面,0~5.85‰和 5.85‰~19.55‰盐度范围内的灵敏度分别达到 37.310 nm/‰和 16.361 nm/‰;温度测量在 30.86~41.98 ℃内表现出-27.667 nm/℃的高灵敏度;压力传感在 0~4.5 MPa 范围内实现灵敏度达 51.087 nm/MPa 的优异性能。本文为复杂环境下的多参数测量提供了创新思路,并展示了广阔的应用前景。这些进展对于促进海洋环境监测技术的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] ANDO K, MATSUMOTO T, NAGAHAMA T, et al. Drift characteristics of a moored conductivity- temperature- depth sensor and correction of salinity data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22 (3): 282-291.
- [2] ITYEL E, BEN-GAL A, SILBERBUSH M, et al. Increased root zone oxygen by a capillary barrier is beneficial to bell pepper irrigated with brackish water in an arid region[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 108-114.
- [3] SKINNER A J, LAMBERT M F. An automatic soil pore-water salinity sensor based on a wetting-front detector[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 11 (1): 245-254.
- [4] HYLDGÅRD A, MORTENSEN D, BIRKELUND K, et al. Autonomous multi-sensor micro-system for measurement of ocean water salinity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(2): 474-484.
- [5] GROSSO P, LE MENN M, DE LA J L D B, et al. Practical versus absolute salinity measurements: new advances in high performance sea-water salinity sensors[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2010, 57(1): 151-156.
- [6] NGUYEN L V, VASILIEV M, ALAMEH K. Water salinity fiber sensor with selectable sensitivity using a liquid-fillable composite in-fiber Fabry-Perot cavity[C]//IEEE. Proceeding of 7th International Symposium on High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies. Cairo: IEEE, 2010: 161-165.
- [7] VIGNESWARAN D, AYYANAR N, SHARMA M, et al. Salinity sensor using photonic crystal fiber[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 269: 22-28.

韦香宁,童子劲,徐琰,等:基于虚拟游标效应增敏的TMZI光纤CTD传感器

- [8] WANG L, XU Y, GENG Y, et al. High-sensitivity fiber salinity sensor based on an exposed-core microstructured fiber interferometer[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(49): 495402-1-495402-7.
- [9] LIN Z, LV R, ZHAO Y, et al. High-sensitivity salinity measurement sensor based on no-core fiber [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 305: 1119471-1-1119471-6.
- [10] YANG L, WANG J, WANG S, et al. A new method to improve the sensitivity of nitrate concentration measurement in seawater based on dispersion turning point[J]. Optik, 2020, 205: 164202-1-164202-11.
- [11] WANG X, WANG J, WANG S S, et al. Fiber-optic salinity sensing with a panda-microfiber-based multimode interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(23): 5086-5091.
- [12] HUSSAIN I, DAS M, AHAMAD K U, et al. Water salinity detection using a smartphone[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 239: 1042-1050.
- [13] KIM Y C, CRAMER J, BATTAGLIA T, et al. Investigation of in situ surface plasmon resonance spectroscopy for environmental monitoring in and around deep-sea hydrothermal vents[J]. Analytical Letters, 2013, 46(10): 1607-1617.
- [14] YANG F, HLUSHKO R, WU D, et al. Ocean salinity sensing using long-period fiber gratings functionalized with layer-by-layer hydrogels[J]. ACS Omega, 2019, 4(1): 2134-2141.
- [15] ZHAO Y, PENG Y, HU X, et al. Beating the shot-noise limit with optical fiber quantum sensors for salinity measurement[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 320: 128353-1-128353-33.
- [16] XINGRONG L I, LI Y, WEN Z. 300m optic fiber Bragg grating temperature sensing system for seawater measurement[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 276(1): 012130-1-012130-8.
- [17] IZQUIERDO C G, GARCIA-BENADÍ A, CORREDERA P, et al. Traceable sea water temperature measurements performed by optical fibers[J]. Measurement, 2018, 127: 124-133.
- [18] WANG X, YANG H J, WANG S S, et al. Seawater temperature measurement based on a high-birefringence elliptic fiber Sagnac loop[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(16): 1772-1775.
- [19] LIU T, WANG J, LIAO Y, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometer for tunable two quasi-continuous points' temperature sensing in seawater[J]. Optics Express, 2018, 26(9): 12277-12290.
- [20] XIA F, ZHAO Y, ZHENG H, et al. Ultra-sensitive seawater temperature sensor using an FBG-cascaded microfiber MZI operating at dispersion turning point[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106458-1-106458-7.
- [21] ZHOU L, YU Y, CAO L, et al. Fabrication and characterization of seawater temperature sensor with self-calibration based on optical microfiber coupler interferometer[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 6018-1-6018-13.
- [22] WEN J H, WANG J, YANG L, et al. Response time of microfiber temperature sensor in liquid environment[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(12): 6400-6407.
- [23] GU Y F, ZHAO Y, LV R Q, et al. A practical FBG sensor based on a thin-walled cylinder for Hydraulic pressure measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2569-2572.
- [24] BAE H, YUN D, LIU H, et al. Hybrid miniature Fabry-Perot sensor with dual optical cavities for simultaneous pressure and temperature measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1585-1593.
- [25] YU Y, BIAN Q, LU Y, et al. High sensitivity all optical fiber conductivity-temperature-depth (CTD) sensing based on an optical microfiber coupler (OMC)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2739-2747.
- [26] GOMES A D, FERREIRA M S, BIERLICH J, et al. Hollow microsphere combined with optical harmonic Vernier effect for strain and temperature discrimination[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106198-1-106198-7.
- [27] LIANG Y, LIU Q, WU Z, et al. Cascaded-microrings biosensors fabricated on a polymer platform[J]. Sensors, 2019, 19(1): 181-1-181-9.
- [28] 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.
- [29] XU Z, SUN Q, LI B, et al. Highly sensitive refractive index sensor based on cascaded microfiber knots with Vernier effect[J]. Optics express, 2015, 23(5): 6662-6672.
- [30] ZHANG H, ZHANG F, CONG B, et al. Research on Michelson interference refractive index sensing technique based on double-core microfiber[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(9): 513-517.
- [31] MALITSON I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. Josa, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [32] KOMMA J, SCHWARZ C, HOFMANN G, et al. Thermo-optic coefficient of silicon at 1550 nm and cryogenic temperatures[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(4): 041905-1-041905-4.
- [33] QUAN X, FRY E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. Applied Optics, 1995, 34(18): 3477-3480.
- [34] TONG Z, ZHANG Z, ZHANG Z, et al. Asymmetric structure optical fiber humidity sensor assisted by the virtual Vernier effect[J]. Optics Express, 2022, 30(26): 47216-47234.
- [35] TONG Z, ZHANG Z, LIU S, et al. Optical fiber sensor with a lateral-offset structure assisted by virtual vernier effect for stretching strain measurement[J]. Optics Communications, 2023, 545: 129730-1-129730-8.
- [36] FANG X, ZHANG W, LI J, et al. Signal processing assisted vernier effect in a single interferometer for sensitivity magnification[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 11570-11581.
- [37] LIU Z, LIU Z, MEI Y, et al. Simultaneous demodulation of salinity and temperature assisted by deep learning approach utilizing tilted fiber Bragg grating and Fabry-Perot based sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(21): 26820-26827.