动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250617005

光电振荡器温度传感技术研究进展

滕义超[1]，张绍卓[1*]，韩　丽[2]，杨明远[1]，王荠萱[1]

（1. 国防科技大学 气象海洋学院，长沙 410000；2. 长沙科技学院，长沙 410000）

摘　要： 针对环境监测、工业过程控制、生物医疗和航空航天等领域对高精度、抗干扰温度监测的迫切需求，文章系统综述了光电振荡器温度传感技术的研究进展。重点分析该技术的发展历程、核心应用原理、性能表现及其面临的挑战。研究结果表明，光电振荡器温度传感技术具有超高精度、强抗干扰性及快速响应等特点。然而，该技术仍面临测量范围窄、模式跳变及系统复杂度高等挑战。未来需通过光子集成芯片化、温敏新材料开发及智能算法融合，进一步提升综合性能并拓展其在极端环境监测与分布式传感中的应用。该工作可为光电振荡器温度传感技术的创新突破与工程化应用提供参考。

关键词： 微波光子；光电振荡器；温度传感；光纤传感

中图分类号： TN29；TB942　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－0959－09

Progress in Temperature Sensing Technology Based on Optoelectronic Oscillator

TENG Yichao[1], ZHANG Shaozhuo[1], HAN Li[2], YANG Mingyuan[1], WANG Jixuan[1]

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410000, CHN; 2. Changsha University of Science and Engineering, Changsha 410000, CHN)

Abstract: In this study, the research progress of opto-electronic oscillator (OEO) temperature sensing technology is systematically reviewed based on the urgent demand for high-precision and interference-resistant temperature monitoring in fields such as environmental monitoring, industrial process control, biomedicine, and aerospace. The study focuses on analyzing the technology's development history, core operating principles, performance metrics, and existing challenges. The research results demonstrate that current OEO temperature sensing technology offers advantages such as ultra-high precision, strong interference resistance, and rapid response. However, to date, challenges, including narrow measurement ranges, mode hopping, and system complexity, exist. Future efforts should focus on advancing photonic integrated circuits, developing new temperature-sensitive materials, and integrating intelligent algorithms to further enhance overall performance and expand applications in extreme environment monitoring and distributed sensing. This study aims to provide a reference for innovative breakthroughs and engineering applications in OEO temperature sensing technology.

Key words: microwave photonics; optoelectronic oscillator; temperature sensing; fiber-optic sensing

收稿日期：2025－06－17.

基金项目：湖南省自然科学基金项目(2021JJ40691).

*通信作者：张绍卓

0 引言

在环境监测、工业过程控制、生物医疗和航空航天等领域，对高精度、大动态范围以及高可靠性的温度传感技术的需求日益增长[1-3]。然而，传统温度传感技术（如热电偶、热敏电阻和红外传感等）虽已广泛应用于实际场景，但在复杂电磁环境、高精度测量以及分布式监测等应用场景中仍存在诸多局限（如易受电磁干扰、测量精度不足以及响应速度较慢等）[4]。相比之下，光纤传感器凭借其轻质化、高灵敏度、强抗电磁干扰能力及在恶劣环境下的良好适应性，已成为温度传感领域的研究热点。在传统光纤温度传感方案中，通常采用光谱分析仪（OSA）进行波长解调。但受限于OSA的分辨率和扫描速率，基于OSA的波长解调方案存在测量速度慢、分辨率低等缺点，制约了其实际应用性能[4]。

微波光子学作为光与微波交叉融合的前沿学科领域，通过光域与微波域的协同处理，为突破传统传感技术的性能瓶颈提供全新思路[4-6]。作为微波光子学的重要分支，光电振荡器（OEO）自上世纪90年代被提出，其凭借独特的优势成为高频信号生成与精密测量领域的研究热点[7-10]。与传统振荡器相比，OEO采用光电混合的方法，利用长距离光纤延迟线或光学微腔作为储能元件，突破了传统振荡器的技术瓶颈，能够产生几百兆赫兹到几十吉赫兹范围内的高频谱纯度、低相位噪声微波信号，且其信号的相位噪声特性与工作频率无关，展现出优异的频率稳定度。OEO的谐振频率对外界环境参数（如温度、应变、折射率等）具有高灵敏度，使其在传感领域具有独特优势。基于OEO的温度传感系统能够将光域波长测量的低分辨率特性（皮米量级）转换为微波域的高分辨率频率测量（千赫兹量级），显著提升温度传感的精度和动态响应速度。同时，OEO技术还兼具抗电磁干扰能力强、信号传输距离远等综合优势，为高精度温度传感技术的发展开辟了全新的技术路径。

早期研究主要聚焦于OEO腔长或折射率变化对输出频率的影响，从而实现基础温度传感功能。随着光子集成技术与信号处理算法的快速发展，基于OEO的传感系统逐步从传统的分立器件向芯片化、网络化方向迈进。例如，研究者通过结合微环谐振腔、马赫-曾德尔干涉仪等集成光学结构，提升温度分辨率，达到纳米量级；同时，利用双环路OEO或多模竞争机制，降低温度与应变等参数之间的交叉敏感度。这些技术的进步不仅推动了OEO传感技术的实用化进程，也为其实现分布式监测、多参量融合感知等复杂应用场景奠定了基础。

本文将系统综述基于OEO结构的温度传感技术的最新研究进展。针对基于腔长变化、布拉格光栅、受激布里渊散射等典型的OEO温度传感方案，将详细阐述其工作原理和性能特点，并深入对比分析各方案的技术优势与局限性。此外，还探讨了当前该技术面临的瓶颈问题，并展望未来的研究方向，以期为高精度温度传感技术的创新与发展提供理论指导与实践启示。

1 基于腔长变化的OEO温度传感方法

基于腔长变化的OEO温度传感方法的原理是将由温度引起的物理形变与光学参数变化转换为可测量的频率信号。温度变化通过热膨胀效应使光纤腔物理长度增加，同时通过热光效应导致光纤材料折射率增大，两者共同延长光信号在腔内的传输时延；而OEO的振荡频率对光传输时延高度敏感，时延增加会线性降低输出微波频率。通过高精度检测频率偏移量，即可直接反演温度变化值。此方案的优势在于频率信号抗干扰能力强、灵敏度远超传统电学传感器，但局限性在于长光纤易受振动干扰，且高温下热膨胀系数与热光系数可能呈非线性关系。

受模式竞争和带通滤波器的限制，OEO环路中仅存在一个纵模。振荡频率取决于OEO环路的延迟，光纤长度的变化会影响OEO的振荡频率特性，OEO输出信号频率f_0的模式间隔FSR需要满足：

$$FSR=\frac{1}{\tau_g}=\frac{1}{\tau_e+\tau_o}=\frac{c}{nL} \tag{1}$$

$$f_0=N\times FSR=\frac{Nc}{nL} \tag{2}$$

式中，c为真空中光速，n为光纤有效折射率，L为包含电学部分的环路总长度，N为振荡模式阶数。环路总延迟τ_g由射频部分延迟τ_e和光学部分延迟τ_o组成，即$\tau_g=\tau_e+\tau_o$。

当温度作用于传感探头时，振荡频率的偏移可以表示为：

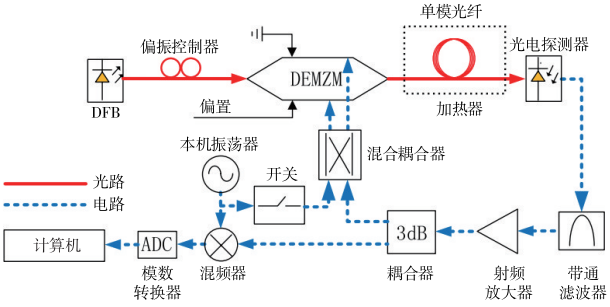
$$\Delta f=-f_0\left(\frac{\Delta L}{L}+\frac{\Delta n}{n}\right)=-f_0\frac{L_h}{L}(\alpha+\xi)\Delta T \quad (3)$$

式中，α为热膨胀系数，ξ为单模光纤的热光系数（取值范围为 6.7×10^{-6} ℃$^{-1}$～9×10^{-6} ℃$^{-1}$），ΔT为温度变化量，L_h为传感光纤长度。由公式（3）可知，振荡频率与传感头温度呈线性关系，其灵敏度与振荡频率及 L_h/L 的比值成正比。系统的动态范围（Dynamic Range，DR）可表示为：

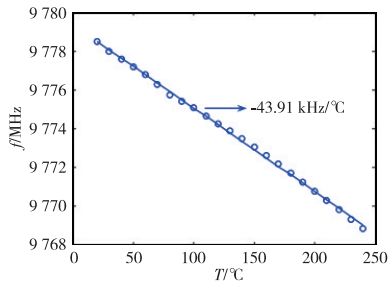
$$DR=\frac{FSR}{\left|\Delta f/\Delta T\right|}=\frac{L}{NL_h(\alpha+\xi)} \quad (4)$$

本振信号频率设定为f_1或f_2，分别对应目标温度范围的下限与上限。系统的总测量范围由频率区间$f_0\pm FSR/2$确定，在此区间内振荡纵模的频移不会发生跳变。

2014 年，浙江大学研究团队提出一种实现高灵敏度温度测量的方法[11]，该系统通过监测 OEO 振荡频率的变化来测量温度变化。与传统的光纤传感器相比，该传感器通过注入锁定方法提高测量的准确性，克服光纤激光传感器在高温环境下性能下降的问题。方案如图 1（a）所示，系统结构包括半导体激光器（DFB）、双电极马赫-曾德尔调制器（DEMZM）、单模光纤、光电探测器、带通滤波器和射频放大器等。通过注入锁定方法设置传感器的初始振荡频率，OEO 环路中的全局延迟决定了振荡频率，而传感器探头的温度变化会影响光纤的折射率和长度，从而导致振荡频率的改变。实验中可通过测量振荡频率的变化进一步确定温度的变化。实验结果表明，该温度传感器实现了 43.91 kHz/℃的测量灵敏度，传感器的测量精度为±0.12℃，如图 1（b）所示。传感器具有高可靠性，能够在较宽的动态范围内稳定工作。实验还验证了注入锁定方法的有效性，消除了初始振荡频率的不确定性，提高了测量的准确性。



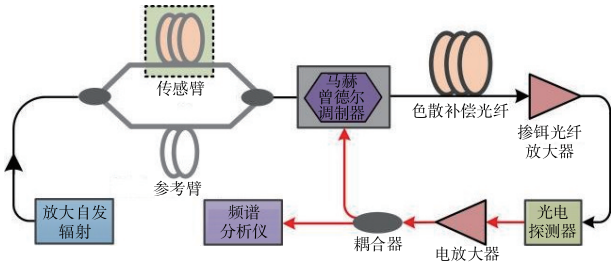
（a）基于 OEO 的注入锁定温度传感器原理图



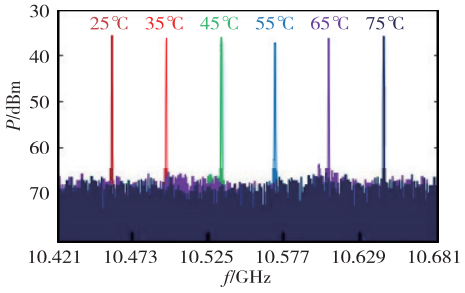
（b）测量所得振荡频率与传感头温度的关系

图 1　基于光纤长度变化的 OEO 高灵敏度温度测量方法结构和实验结果图

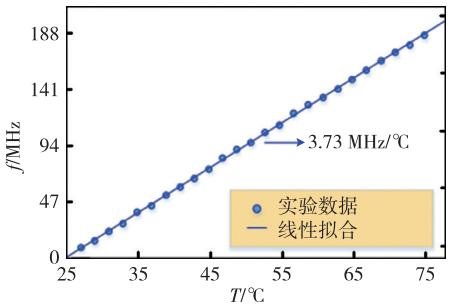
2016 年，加拿大渥太华大学研究团队提出一种基于马赫-曾德尔干涉仪（MZI）与 OEO 融合的高灵敏度温度传感方法[12]，其核心原理是将温度引起的 MZI 光谱偏移转换为可测频率信号：温度变化通过热膨胀效应使 MZI 传感臂光纤物理长度伸长，改变 MZI 的自由光谱范围（FSR），而 FSR 与 OEO 振荡频率直接相关，温度变化导致频率线性偏移（实验测得 39.8 MHz/℃）。系统通过色散补偿光纤（DCF）精确控制光波相位-频率映射关系，避免传输失真；并通过掺铒光纤放大器（EDFA）与电放大器协同增益控制，确保环路有效振荡，实现无需外部参考的闭环测量。该方案利用 MZI 替代传统带通滤波器，突破分立器件温漂限制，在－40℃～120℃宽温域实现±0.025℃分辨率。实验结果表明，该温度传感器方案实现了 3.73 MHz/℃的高灵敏度。系统的分辨率理论上限为 0.015℃，系统的最大频率偏移为 300 kHz，对应的温度测量精度为 0.08℃，重复性误差小于 0.02%。如图 2 所示。



（a）所提出的基于 OEO 的传感系统的原理图



（b）不同温度下产生的微波信号的叠加电谱

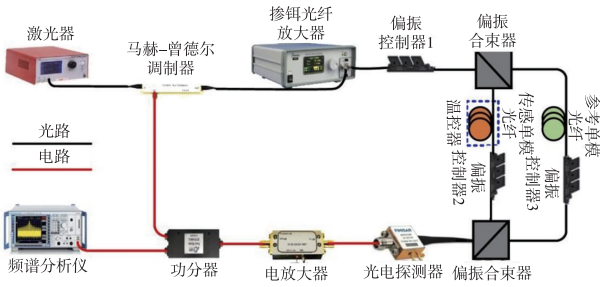


（c）频率偏移和温度的线性关系图

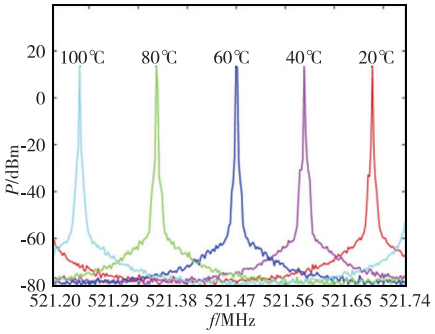
图2 渥太华大学MZI与OEO融合的高灵敏度温度传感方法结构和实验结果图

2020年，南京师范大学研究团队提出一种基于双环OEO游标效应的高灵敏度光纤温度传感方法[13]，其核心原理是通过双环路长度差实现游标效应，显著放大温度引起的频率偏移：温度变化通过热膨胀效应与热光效应改变传感光纤腔长与折射率，导致光传输时延增加；而双环OEO中两路光信号因路径差产生游标效应，将微小频率偏移放大为游标包络峰频移（测得灵敏度达201.25 kHz/℃）。系统中未使用射频滤波器，以偏振分束器与合束器构建正交偏振双路径，其中传感环光纤直接暴露于环境中，参考环维持恒温；双路信号经掺铒光纤放大器增益均衡后干涉，通过高速光电探测器转换为微波信号，再经电放大器反馈至马赫-曾德尔调制器形成振荡闭环。该方案通过电谱分析仪检测游标包络峰频移，实现了0.005℃的测量分辨率，并利用双环互参考机制抑制共模噪声。实验验证了系统的稳定性与重复性，信号中心频率在40℃和60℃下波动小于10 kHz，频率稳定性误差控制在±0.05℃。如图3所示。

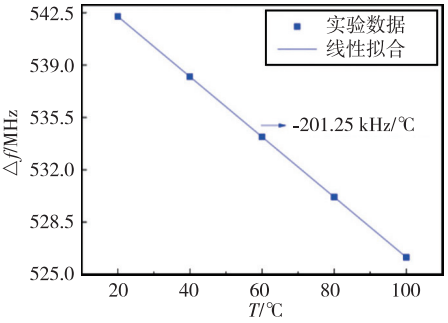
2021年，武汉光电国家实验室研究团队提出一种基于双环OEO与微环谐振器（MRR）融合的高精度温度传感方法[14]，其核心原理是通过热光效应将温度变化转换为MRR谐振波长偏移，再经OEO双环结构锁定为可测频率信号。温度升高通过硅基波导热光效应系数1.86×10^{-4} ℃$^{-1}$使MRR谐振波长红移，灵敏度达85 pm/℃；当可调谐激光器的相位调制边带与MRR谐振谷对齐时，光相位调制转换为强度调制，形成微波光子滤波器。双环OEO通过偏振分束器引入单模光纤延迟路径差，将模式间隔扩大至1.6 GHz，彻底抑制模式跳变。实验结果表明，所提出的温度传感器实现了10.02 GHz/℃



（a）基于双环OEO的传感器示意图



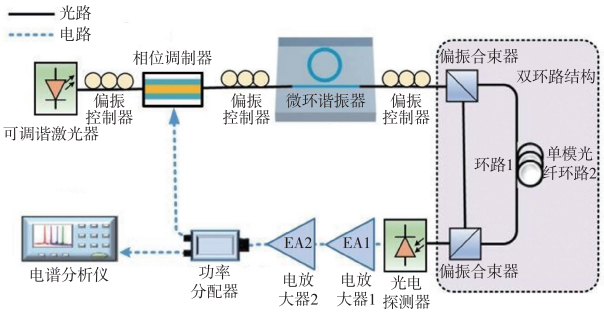
（b）在不同温度下产生的微波信号的叠加电谱



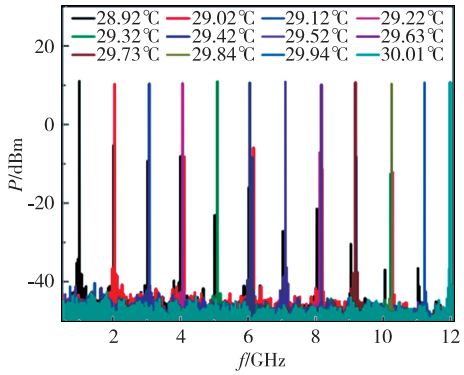
（c）振荡频率偏移和温度的线性关系图

图3 基于双环OEO游标效应的高灵敏度光纤温度传感方法结构和实验结果图

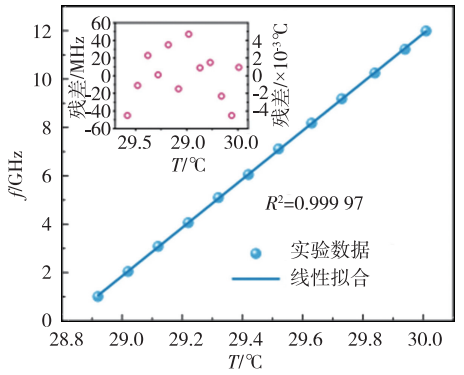
的高灵敏度和$\pm1.73\times10^{-4}$℃的高精度，分辨率达到了6.79×10^{-3}℃。通过线性拟合测量数据，得出传感器的灵敏度为10.02 GHz/℃，相关系数R^2为0.999 97。此外，实验还验证了系统的稳定性和重复性，振荡频率的最大变化在±1.73 MHz以内，对应的温度精度为$\pm1.73\times10^{-4}$℃。如图4所示。



（a）基于双环OEO与微环谐振器（MRR）的温度传感器的原理图



（b）不同芯片温度下的电光谱



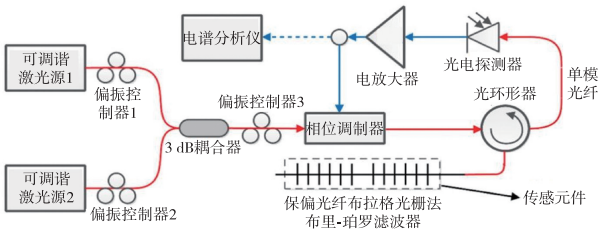
（c）测量的振荡频率与芯片温度及测量数据的线性拟合

图 4　基于双环 OEO 与 MRR 融合的高精度温度传感方法结构和实验结果图

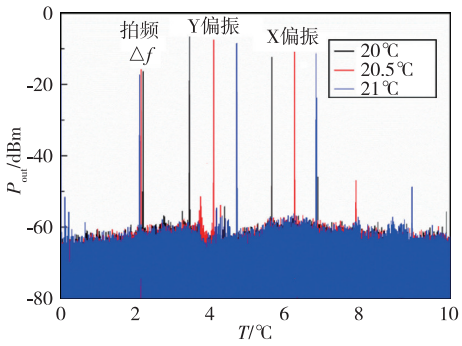
2　基于布拉格光栅的 OEO 温度传感方法

基于布拉格光栅的 OEO 温度传感方法的原理是当光纤布拉格光栅（FBG）受温度变化影响时，其光栅周期和纤芯有效折射率同步改变，导致布拉格反射波长发生漂移；该波长漂移信号作为光源注入 OEO 环路，通过电光相位调制器将波长偏移量加载至微波载波，利用 OEO 环路的微波光子滤波器频选特性，将波长的微小光谱偏移转换为输出微波频率的显著变化，最终通过检测振荡频率偏移量实现温度解算。

2017 年，中国海洋大学与北京交通大学研究团队提出一种基于保偏光纤布拉格光栅（PMFBG）法布里-珀罗滤波器的双频 OEO[15]，通过双频互参考机制同步解耦轴向应变与温度：系统以两个可调谐激光器为光源，经偏振控制器调整后合路输入相位调制器；调制光信号通过 PMFBG 滤波器（含双正交偏振超窄带响应）实现相位调制到强度调制的转换，生成单边带信号；反射信号经光电探测器转换为微波信号，再经电放大器反馈至调制器形成 OEO 闭环。该 PMFBG 滤波器与相位调制器、激光器协同构成高 Q 值双通带微波光子滤波器，其两个振荡频率由滤波器决定。实验结果表明：当轴向应变增加 40 με 时，双振荡频率分别以 100.6 MHz/με 和 100.5 MHz/με 线性变化，差频变化可忽略；当温度升高 1℃（20℃～21℃）时，双振荡频率分别以 1.152 GHz/℃和 1.193 GHz/℃变化。通过实时监测双振荡频率及差频偏移，结合光纤双折射对应变低敏特性（应变影响远小于温度影响），实现轴向应变与温度的高精度同步测量。如图 5 所示。



（a）基于 PMFBG 法布里-珀罗滤波器的双频 OEO 配置，同时进行轴向应变和温度传感

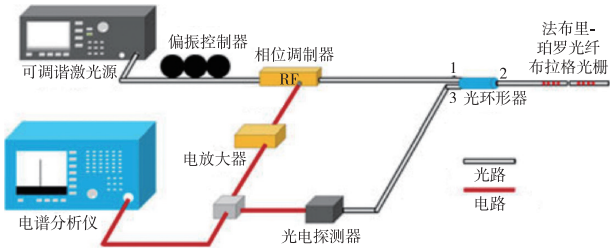


（b）在无轴向应变条件下，对 PMFBG 法布里-珀罗滤波器施加微波信号的实验测量频谱

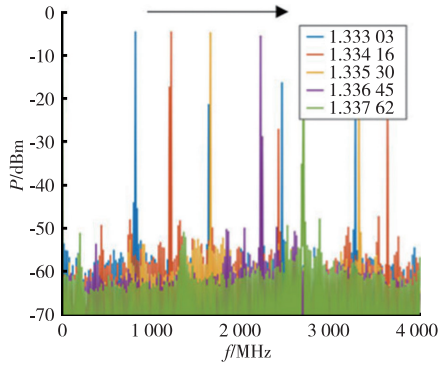
图 5　基于 PMFBG 法布里-珀罗滤波器的双频 OEO 应变与温度方法结构和实验结果图

2019 年，北京交通大学研究团队提出一种基于法布里-珀罗光纤布拉格光栅（FP-FBG）的 OEO 传感系统[16]，通过双参量频率映射机制同步解耦折射率与温度：FP-FBG 由两个相同 FBG 在石英 V 形槽内轴向对齐并预留间隙构成，其反射光谱中形成的窄带宽作为微波光子滤波器的频率选择单元；可调谐激光器输出光载波经偏振控制器调整后输入相位调制器，生成相位调制信号经 FP-FBG 反射实现相位-强度转换；反射信号由光电探测器转换为微波信号，经电放大器反馈至调制器形成 OEO 闭环。该系统通过监测振荡频率

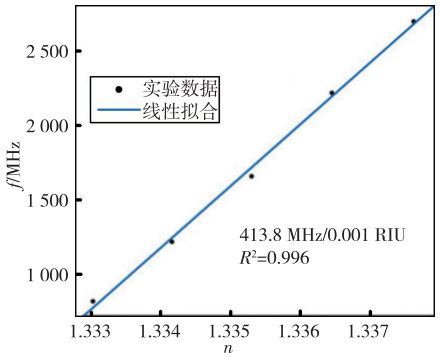
偏移实现传感，FP-FBG中心波长受环境参量调制：当间隙填充液体折射率发生变化时，光程差改变导致波长漂移；温度变化通过硅基材料热光效应（$dn/dT\approx 1.2\times10^{-4}℃^{-1}$）与热膨胀效应协同作用引发波长红移。实验结果表明：折射率灵敏度达413.8 MHz/0.001 RIU，温度灵敏度2 516 MHz/℃；折射率增加0.001 RIU时频率提升413.8 MHz，温度升高1℃时频率偏移2 516 MHz，线性拟合优度$R^2>0.99$；系统稳定性表现为30 min频率漂移小于±2 kHz，10 min功率波动小于0.56 dB，验证了高精度测量能力。系统结构和实验结果如图6所示。



（a）RI和温度传感器的原理图



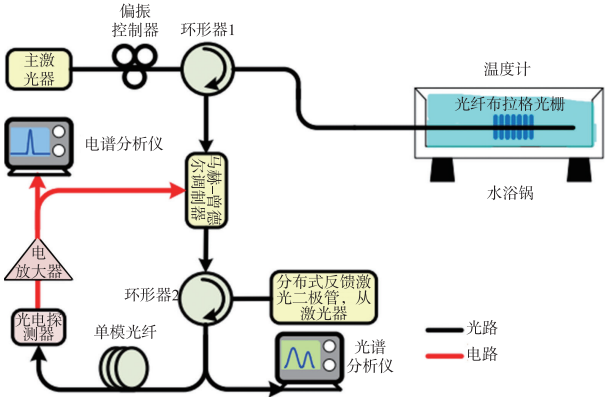
（b）随着液体RI的增加，在PD输出处产生的微波信号的电谱



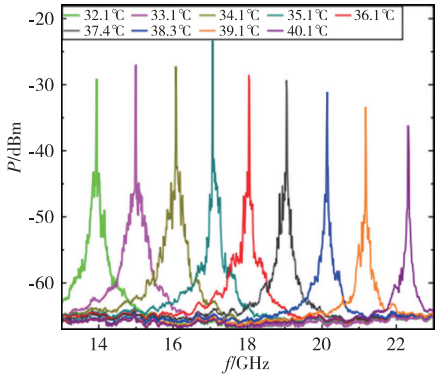
（c）RI频率与微波信号频率的关系

图6 FP-FBG-OEO传感系统结构和实验结果图

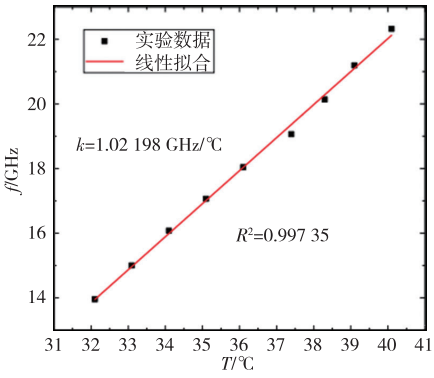
2024年，浙江师范大学研究团队提出光注入DFB激光器与OEO协同FBG温度传感系统[17]，通过光纤布拉格光栅反射谱温致红移改变注入DFB腔体的光功率，动态调控激光器载流子浓度实现振荡波长偏移；该波长信号经相位调制器输入OEO环路，利用微波光子滤波器频选特性将波长偏移转换为微波频率变化。实验结果证实：当FBG温度升高时，反射谱红移导致注入功率增强，驱动DFB振荡波长，最终输出微波频率呈线性增长；通过调节DFB工作电流与温度设定点，系统灵敏度可在0.443 22 GHz/℃～1.259 52 GHz/℃范围连续调谐，较传统FBG解调技术提升三个数量级，同时OEO相位噪声抑制机制保障了频率解算精度。该系统结构和实验结果如图7所示。



（a）基于光注入分布式反馈激光二极管（DFB-LD）和光电子振荡环路的光纤布拉格光栅温度测量传感系统



（b）不同温度下输出微波信号的频谱



（c）中心频率和温度的线性关系

图7 光注入DFB激光器与OEO协同FBG温度传感系统结构和实验结果图

3　基于受激布里渊散射的OEO温度传感方法

在布里渊光电振荡器环路中，相位调制光通过受激布里渊散射（SBS）中斯托克斯光与反斯托克斯光的非对称增益转换为微波信号以维持振荡。单模光纤同时作为布里渊增益介质和传感单元，其振荡频率随温度呈线性变化。该传感器具备高灵敏度与高稳定性。

布里渊光电振荡器的振荡频率取决于环路总时延和SBS增益谱，其FSR和振荡频率f_0由公式（1）和（2）给出。

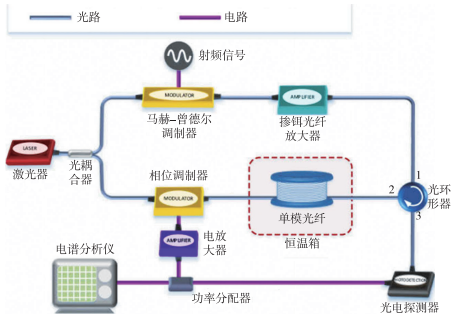
当单模光纤温度变化时，布里渊频移（BFS）和布里渊光电振荡器振荡频率随之改变，其关系为：

$$\Delta f = C^{\varepsilon}\Delta\varepsilon + C^{T}\Delta T \tag{5}$$

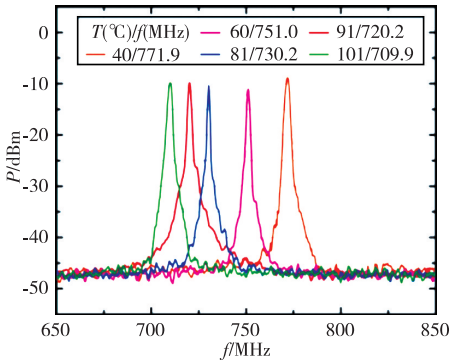
式中，Δf为BFS；C^{ε}和C^{T}分别为应变系数和温度系数，在G.652单模光纤中其典型值分别为0.04 MHz/με和1.06 MHz/℃。

温度变化通过热膨胀与热光效应改变光纤材料折射率与声速，引发泵浦光与声子相互作用产生布里渊频移。该频移信号作为斯托克斯光或反斯托克斯光输入OEO环路，通过电光相位调制器将布里渊频移量加载至微波载波，利用OEO环路的微波光子滤波器频选性，将兆赫兹量级的布里渊频移非线性放大为吉赫兹的输出微波频率显著偏移。

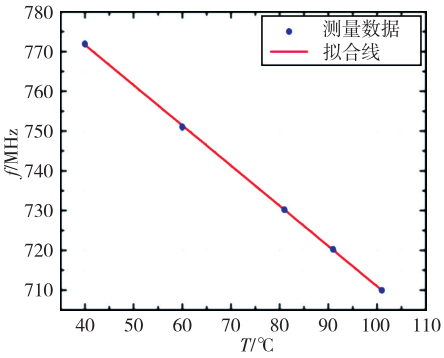
2019年，重庆大学研究团队提出基于受激布里渊散射效应的OEO温度传感系统[18]，通过频率-温度映射机制实现应变不敏感的高精度测温：单模光纤作为感温介质，其BFS随温度变化而偏移，形成中心频率可调的单通带微波光子滤波器；激光二极管输出光载波经耦合器分束后，分别输入马赫-曾德尔调制器与相位调制器，调制信号经掺铒光纤放大器放大后注入传感光纤，其中相位调制信号作为SBS探测光；环形器引导反射信号至光电探测器转换为微波信号，经电放大器反馈至相位调制器形成OEO闭环。该系统通过SBS效应将相位调制转为强度调制，并利用模式竞争机制消除应变干扰。结果表明：当温度从40℃升至101℃时，振荡频率从272 MHz降至211 MHz，灵敏度达1.007 45 MHz/℃，全量程最大测量误差为±0.5℃，频率漂移小于500 kHz（对应温度精度0.5℃）。系统结构和实验结果如图8所示。



（a）基于SBS效应的OEO温度传感系统原理图



（b）不同温度的微波信号电谱

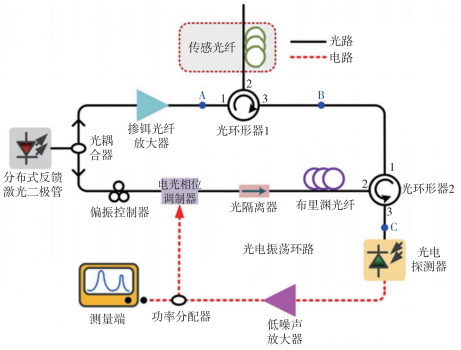


（c）驱动频率为11.5 GHz时，振荡频率和温度的线性关系

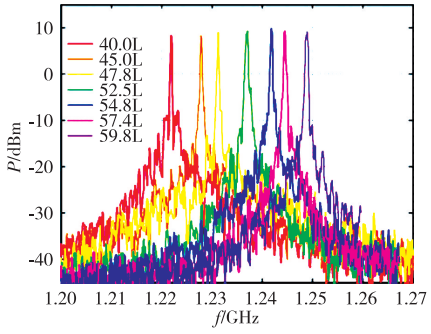
图8　基于SBS效应的OEO温度传感系统结构和实验结果图

2020年，电子科技大学相关研究团队提出双光纤差频型OEO温度传感系统[19]，通过传感单模光纤与高非线性光纤的BFS差实现温变-频率映射。分布式反馈激光二极管输出连续光经耦合器分束后，上路经掺铒光纤放大器放大注入40 km传感单模光纤激发SBS效应，生成频移的斯托克斯光；该光作为泵浦注入OEO环路内的20 m高非线性光纤形成布里渊损耗谱。下路光经电光相位调制器加载振荡微波信号后，与泵浦光在高非线性光纤中反向传输，其调制边带在布里渊损耗谱通带内完成相位-强度转换。光电探测器将光信号转换为微波信号，经两级级联低噪声放大器反馈至相位调制器形成闭环OEO。当传感光纤温度从40.0℃升至59.8℃时，BFS变化导致振荡频率从1.222 GHz线

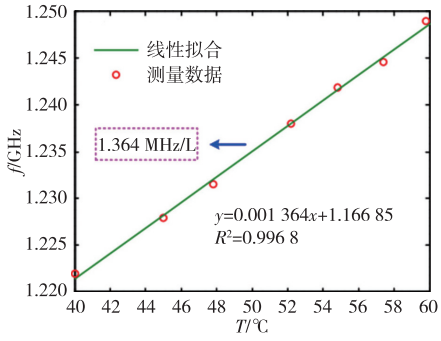
性增至1.249 GHz,灵敏度达1.364 MHz/℃(R^2为0.996 8)。系统通过双级联低噪声放大器抑制相位噪声,实现振荡频率漂移小于200 kHz,等效温度测量误差控制在±0.3℃以内,验证了工业场景下的长期稳定性,如图9所示。



(a) 基于SBS的双光纤差频型OEO温度传感器原理图



(b) 不同温度下微波信号在OEO中的叠加光谱



(c) 振荡频率与温度的关系曲线

图9 双光纤差频型OEO温度传感系统结构和实验结果图

4 OEO温度传感方法对比分析

各种光纤温度传感方案对比如表1所示。基于光纤特性的方案原理简洁,结构相对简单。注入锁定和游标效应方案实现了中高灵敏度和较好的精度;但长光纤方案易受环境振动干扰,热膨胀系数与热光系数在高温下可能呈非线性,从而影响精度;游标效应方案虽显著提升了灵敏度,但系统复杂度高、测量时间长。基于FBG的方案通常表现出最高的灵敏度和极高的精度潜力,但高灵敏度的方案测量范围通常很窄,限制了其广泛应用,系统复杂度普遍较高,需要精密的激光器调谐或复杂的滤波器结构,频率稳定性在高灵敏度方案中可能成为挑战。基于SBS的方案展现了非常宽的测量范围,特别适合极端环境,具有良好的抗应变干扰潜力。但其灵敏度相对较低,系统结构复杂,通常需要高功率泵浦激光器、长距离传感光纤或特殊光纤,这使得成本提高,且频率稳定性对高精度测量构成限制。

OEO技术通过光-微波信号转换机制,将传统光学传感的波长分辨率提升至微波域的频率分辨率,实现传感高灵敏度、快速响应和强抗干扰能力,在高温环境监测、工业过程控制及分布式传感等领域展现出独特优势。此外,通过结构创新进一步突破模式跳变、交叉敏感度等瓶颈,显著提升系统的稳定性和实用性。然而随着材料科学、光子集成及智能算法的持续发展,该技术仍有几个方面可以优化:1) 现有方案的测量范围多局限于100℃内,难以满足极端环境的监测需求,需要探索新型功能材料以拓宽温度传感范围并增强灵敏度;2) 系统复杂度高,依赖分立光学器件,导致成本高昂且难以小型化,需要推动光子集成技术发展,通过芯片化设计降低系统复杂度与成本;3) 模式跳变问题尚未完全解决,长期稳定性仍需优化;4) 多参数交叉敏感问

表1 各种光纤温度传感方案对比

基本原理	技术方案	测量灵敏度	频率稳定性	测量时间/s	精度/℃	测量温差/℃	系统复杂度
光纤特性	注入锁定[11]	43.91 kHz/℃	5.4 kHz	60	0.12	220	高
	MZI[12]	3.7 MHz/℃	300 kHz	1 800	0.08	50	低
	游标效应[13]	210.25 kHz/℃	10 kHz	7 200	0.048	80	高
	微环谐振器[14]	10.02 GHz/℃	1.5 MHz	360	0.000 173	1.2	中等
FBG	PVA-FBG-FP[15]	1.811 8 GHz/℃	180 kHz	600	0.2	1	中等
	FP-FBG[16]	2.516 GHz/℃	30 kHz	1 200	0.011 9	0.6	高
	光注入[17]	1.02 GHz/℃	80 MHz	600	0.08	8	高
SBS	单通带微波光子滤波器[18]	1.007 45 MHz/℃	500 kHz	3 000	0.5	340	高
	双光纤差频[19]	1.364 MHz/℃	400 kHz	500	0.3	19.8	高

题仍需通过算法或结构设计进一步抑制，可结合人工智能算法优化信号处理流程，提升多参数解耦能力与抗噪声性能；5）拓展OEO传感网络在分布式监测、智能物联网及生物医疗等领域的应用场景，实现从实验室验证到实际落地的跨越。

5　总结

基于OEO的温度传感技术通过光-微波信号转换机制，将传统光学传感的波长分辨率提升至微波域频率分辨率，实现了高灵敏度、宽动态范围与强抗干扰能力的温度监测。该技术涵盖三大类方案：基于光纤特性的方案在灵敏度与复杂度间取得平衡；基于FBG的方案实现吉赫兹每摄氏度级超高灵敏度；基于SBS的方案在宽温域和抗应变干扰方面优势显著。然而，当前技术仍面临系统复杂度高、模式跳变、多参数交叉敏感等挑战，未来需通过光子集成芯片化、新型温敏材料开发及智能算法融合，进一步提升稳定性、扩展应用场景，推动实验室成果向工程化落地转化。

参考文献：

[1] 陈耀雯. 基于注入锁定光电振荡器产生低杂散微波信号研究[D]. 成都：电子科技大学，2023.
Chen Yaowen. Research on low spurious microwave signalgeneration based on iniection-locked optoelectronic oscillator[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2023.

[2] Kao K C，Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers，1966，113(7)：1151-1158.

[3] 潘时龙，张亚梅. 微波光子雷达及关键技术[J]. 科技导报，2017，35(20)：36-52.
Pan Shilong，Zhang Yamei. Microwave photonic radar and key technologies[J]. Science & Technology Review，2017，35(20)：36-52.

[4] Zou X，Liu X，Li W，et al. Optoelectronic oscillators (OEOs) to sensing，measurement，and detection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics，2016，52(1)：0601116.

[5] Shi T，Liang D，Wang L，et al. Microwave photonic prototype for concurrent radar detection and spectrum sensing over an 8 to 40 GHz bandwidth[J]. Advanced Photonics Nexus，2025，4(2)：026008.

[6] Yang B，Chi H，Yang S，et al. Broadband microwave spectrum sensing based on photonic RF channelization and compressive sampling[J]. IEEE Photonics Journal，2020，12(1)：5500109.

[7] Li B，Wu R. Tunable high-purity microwave frequency combs generation based on active mode-locking OEO[J]. IEEE Photonics Technology Letters，2023，35(6)：329-332.

[8] Li Z，Wang Z，Luo H，et al. Weak RF signal detection based on single-mode optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters，2023，35(6)：313-316.

[9] Lin C，Wang Y，Wang A，et al. Active mode lock optoelectronic oscillator based on the simulated Brillouin scattering effect[J]. Applied Optics，2022，61(24)：7071.

[10] Wang L，Xiao X，Xu L，et al. On-chip tunable parity-time symmetric optoelectronic oscillator[J]. Advanced Photonics Nexus，2023，2(1)：016004.

[11] Zhu Y，Jin X，Chi H，et al. High-sensitivity temperature sensor based on an optoelectronic oscillator[J]. Applied Optics，2014，53(22)：5084-5087.

[12] Wang Y，Zhang J，Yao J. An optoelectronic oscillator for high sensitivity temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters，2016，28(13)：1458-1461.

[13] Cheng Y，Wang Y，Song Z，et al. High-sensitivity optical fiber temperature sensor based on a dual-loop optoelectronic oscillator with the Vernier effect[J]. Optics Express，2020，28(23)：35264-35271.

[14] Xu L，Hu X，Zhang Y，et al. A highly sensitive and precise temperature sensor based on optoelectronic oscillator[J]. Optics Communications，2021，483：126625.

[15] Yin B，Wang M，Wu S，et al. High sensitivity axial strain and temperature sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator using PMFBG Fabry-Perot filter[J]. Optics Express，2017，25(13)：14106-14113.

[16] Yang Y，Wang M，Shen Y，et al. Refractive index and temperature sensing based on an optoelectronic oscillator incorporating a fabry - perot fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Journal，2018，10(1)：6800309.

[17] Lin J，Chen H，Dai W，et al. Fiber Bragg grating sensing system for temperature measurements based on optically injected DFB-LD with an OEO loop[J]. Optics Express，2024，32(11)：19388.

[18] Feng D，Kai L，Zhu T，et al. High-precision strain-insensitive temperature sensor based on an optoelectronic oscillator[J]. Optics Express，2019，27(26)：37532-37540.

[19] Zeng Z，Peng D，Zhang Z，et al. An SBS-based optoelectronic oscillator for high-speed and high-sensitivity temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters，2020，32(16)：995-998.

作者简介：

滕义超(1989—)，男，辽宁省鞍山市人，副教授，主要研究方向是微波光子传感；

张绍卓(2004—)，男，辽宁省鞍山市人，主要研究方向为光纤传感技术。