

基于阈值系数拟合的高精度拉曼 分布式光纤传感技术*

黄鑫¹⁾ 曹康怡¹⁾ 柴明渊¹⁾ 张炜怡¹⁾ 薛晓辉¹⁾²⁾³⁾
李健^{1)2)3)†} 张明江¹⁾²⁾³⁾

1) (太原理工大学物理与光电工程学院, 太原 030024)

2) (太原理工大学, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

3) (太原理工大学, 精密测量物理山西省重点实验室, 太原 030024)

(2025年10月21日收到; 2025年11月18日收到修改稿)

针对传统拉曼分布式光纤传感技术中由于米量级空间分辨率性能不足, 导致传感光纤沿线亚空间分辨率长度探测光纤区域内系统测量精度下降的技术瓶颈, 本研究提出一种基于一维寻峰方法的阈值系数拟合方法. 该方法通过提取探测光纤区域内分布式温升曲线的峰值系数和半高全宽 (full width at half maximum, FWHM), 然后建立拉曼散射阈值系数拟合模型及“FWHM-传感距离-探测光纤尺寸”的定量映射模型, 进而计算出最优拉曼散射阈值系数, 最终重构光纤沿线分布式温度场信号. 实验结果表明, 应用该技术后, 在 10 km 传感距离下, 系统在 30 cm 探测光纤上的测温误差相较于传统温度解调技术 (34.7 °C) 显著降低, 温度精度达到 1.5 °C. 此外, FWHM 与传感距离呈线性正相关, 且独立于温度变化, 该特性确保了该技术在不同环境温度下的稳定性和适应性. 本文通过纯算法方案重构光纤沿线拉曼散射信号, 无须增加额外器件, 为高精度分布式温度监测在长距离基础设施健康诊断等领域的应用提供了一种新方案.

关键词: 分布式光纤传感, 拉曼散射, 空间分辨率, 高精度

DOI: 10.7498/aps.75.20251440

CSTR: 32037.14.aps.75.20251440

1 引言

拉曼分布式光纤传感 (Raman distributed optical fiber sensing, RDOFS) 技术是一种利用传感光纤作为传感元件及传输信号介质获取沿光纤长度分布的温度场信息的温度测量方法^[1-5]. 该技术的物理基础是脉冲激光在光纤中激发的自发拉曼散射效应产生的反斯托克斯光分量强度受温度调制, 通过精确测量拉曼反斯托克斯光强度并结合光时域反射 (optical time domain reflection, OTDR) 定位技术, 可实现沿光纤路径上分布式温度变化及

其对应位置的精确测量^[6]. RDOFS 具备长距离监测、分布式测量、抗电磁干扰、易便捷安装等显著优势, 在需要大范围温度监测的安全监控领域得到了广泛应用^[7-12], 特别是在电力电缆监测^[13]、油气管道监测^[14,15]、火灾报警与消防安全^[16]、土木工程与结构健康监测^[17]及储罐监测^[18,19]等领域发挥了关键作用.

传统 RDOFS 受限于 OTDR 的物理定位原理, 即当探测光纤 (fiber under test, FUT) 长度小于系统标定空间分辨率对应的空间尺度 (通常为 1—3 m^[20]) 时, 将引发拉曼散射信号混叠效应^[21]. 具体表现为: 若 FUT 长度小于系统空间分辨率时,

* 国家自然科学基金 (批准号: 62475183, U23A20375, 62205234) 和国家重点研发计划 (批准号: 2023YFF0715700) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lijian02@tyut.edu.cn

其测量到的温度影响范围将显著大于实际的亚空间分辨率 FUT 长度, 这导致后向散射信号中同时混叠 FUT 区域与非 FUT 区域拉曼增益能量. 这种物理量覆盖失配引发最终导致系统反馈温度值偏离真实物理温度场分布, 因为采集的拉曼反斯托克斯信号实质是 FUT 区域与非 FUT 区域拉曼散射光的非相干叠加. 该物理机制的限制导致系统反馈温度值偏离真实物理温度场分布, 其温度精度可恶化至数十摄氏度量级^[20,21]. 因此, 传统 RDOFS 在亚米级 FUT 尺度温度精确监测的应用领域中受到显著制约.

为克服米级空间分辨率对传统 RDOFS 在亚米级 FUT 尺度下测温精度的限制, 国内外研究者提出了多种解决方案. 其中, 缩短探测脉冲宽度是提升 RDOFS 空间分辨率的直接途径^[22,23]. 然而, 该方法会导致脉冲能量显著衰减, 进而降低系统信噪比, 并最终限制传感距离. 例如, 2019 年 Ososkov 等^[23] 通过采用全光纤超短脉冲激光器作为探测源, 实现了空间分辨率为 10 cm、传感距离为 3.0 m 的 RDOFS 系统. 尽管该方案显著地提高了空间分辨率, 实现了亚米级尺度 FUT 区域的温度准确测量, 但其所实现的传感距离限制了系统的实际应用价值^[24].

鉴于上述通过缩短脉冲宽度提升分辨率所伴随的信噪比与传感距离制约, 为在维持高信噪比(从而保障长传感距离与高测温精度)的前提下进一步提升系统的空间分辨率, 研究者开发了多种前沿光学方法与技术^[25-28]. 受限于传感光纤非线性效应, 自发拉曼散射光强度难以通过无限提升探测光脉冲峰值功率来增强. 因此, 传统 RDOFS 系统存在高空间分辨率与高信噪比难以兼顾的技术瓶颈. 为克服此瓶颈, 有研究者提出了探测光脉冲编码技术. 该技术通过对探测光源进行调制, 以抑制光纤中的非线性效应, 从而提高入射光通量. 例如, 2020 年, Sun 等^[28] 使用一种基于遗传算法计算单序列非周期编码调制探测光信号, 结合快速后处理技术实现具有高实时性的长距离、高空间分辨率的 RDOFS, 并在实验中实现了 39.0 km 传感距离上 1.0 m 的空间分辨率. 此外, 采用具有更大模场面积的特种光纤能够承载更高的入射功率, 可在保持高空间分辨率的同时提升系统信噪比^[29-31]. 例如, 2018 年 Liu 等^[30] 使用一种能渐变折射率少模光纤技术在 25.0 km 的传感距离上实现了 1.13 m

的空间分辨率. 2022 年, Wu 等^[31] 使用了一种低传输损耗的低水峰特种光纤结合去噪神经网络算法提升系统信噪比, 在 24.0 km 的传感距离上实现了 1.0 m 的空间分辨率, 1.77 °C 的温度精度.

作为表征系统测温不确定度的关键参数, 温度分辨率不仅从根本上决定了测量的精确性, 更极大地制约了 RDOFS 系统在精准温控与早期预警等场景中的实际应用效果. 为突破这一限制, 国内外研究者已发展了多种旨在提升系统温度分辨率的技术方案. 2019 年, Yan 等^[16] 旨在解决因波分复用器隔离度不足, 导致反斯托克斯光信道中存在瑞利散射残留这一系统误差问题, 提出了一种结合校准与测量的修正算法. 该算法在消除拉曼后向散射光中瑞利噪声的同时, 也抑制了由光源功率与探测器响应波动引入的不确定性. 经实验验证, 在 9.1 km 传感距离下, 该方法使系统温度分辨率相较于传统解调方法优化了 1.5 °C. 除系统优化外, 研究者们还提出了 Simplex 编码技术, 在不产生非线性效应和不影响空间分辨率的前提下增加入射光能量, 获得更强的散射光信号, 提高系统温度分辨率. 2018 年, Dai 等^[32] 利用归零 Simplex 编码与双序列调制激光器, 有效地解决了 RDTs 系统中因 EDFA 放大导致的脉冲畸变问题. 该系统使用 100 ns 脉冲, 经 12.7×10^4 次叠加平均后, 在 50 km 传感距离下将温度分辨率提升至 1.8 °C. 除了上述方法外, 近些年来, 一系列新型算法如图像处理 and 机器学习算法等也被用于 RDTs 系统的性能提升. 例如, 2016 年 Soto 等^[33] 将图像和视频处理中使用的非局部平均算法引入到 RDTs 系统的信号处理中. 通过将连续测量的 1D 温度迹线堆叠成 2D 图像并进行处理, 成功将系统在 8.86 km 处的信噪比提升了 13.6 dB. 这一信噪比增益直接转化为了温度分辨率的数量级提升, 将光纤末端温度分辨率从 0.5 °C 显著优化至 0.022 °C. 2021 年, Zhang 等^[34] 将深度学习引入 RDTs 系统以提升温度分辨率. 他们构建了一个包含 20 个卷积层的一维去噪卷积网络, 利用批归一化层加速收敛, 并通过 ReLU 层引入非线性. 通过大量模拟数据进行训练, 该模型在 10 km 的 SMF 实验中, 成功将温度分辨率从原始数据的 6.4 °C 优化至 0.7 °C.

然而, 受限于 OTDR 技术的物理定位原理^[35], 上述技术方案在千米级传感距离上, 难以实现对亚米级尺度 FUT 区域的精确温度测量. 基于此, Zhang

研究组^[36-39]使用混沌光源替代传统激光源, 该方案通过对拉曼散射信号进行重构并与参考信号执行相关运算, 解调 FUT 的温度变化信息. 最终在 1.4 km 的传感距离上实现了 10.0 cm 的空间分辨率. 尽管所述新型 RDOFS 技术在维持高信噪比的同时提升了空间分辨率, 但当待测 FUT 的物理尺寸小于该技术的空间分辨极限时, 仍会观察到显著的测温偏差^[39].

为突破拉曼分布式光纤技术中亚空间分辨率区域温度测量精度下降的瓶颈问题, 实现对传感光纤上亚空间分辨率尺度 FUT 温度的精准测量, 本文提出一种基于一维寻峰算法的阈值系数拟合技术, 旨在解决 RDOFS 中对亚空间分辨率尺度 FUT 区域的温度测量失真问题. 该技术通过预校准实验建立不同 FUT 空间尺度下的温升曲线峰值强度与阈值系数的拟合模型, 然后分析了不同 FUT 空间尺度下, 温升曲线峰值位置与半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 的关系, 建立“FWHM-传感距离-FUT 尺寸”的定量映射. 最终提取实际温升曲线的 FWHM 和峰值位置, 基于定量映射关系确定 FUT 的空间尺度, 选择对应拟合模型计算最优阈值系数以重构温升曲线. 实验结果表明, 在 10 km 传感距离下, 该技术在 30 cm FUT 上减少了传统温度解调技术的测温误差 (34.7 °C), 将温度精度提升至 1.5 °C.

2 阈值拟合技术补偿原理及方法

2.1 阈值系数拟合补偿原理

传统 RDOFS 基于自发拉曼反斯托克斯散射光强度对温度变化的响应特性与 OTDR 空间定位原理, 获得光纤路径上离散点温度变化及其位置的分布式测量, 该技术测温原理可表述为反斯托克斯光强随温度变化遵循确定的函数关系, 其数学表达式为

$$P(T) = P_0 K_a S_b v_a^4 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L] R_a(T), \quad (1)$$

式中, P_0 表示为激光入射强度; L 为传感光纤位置; T 为 L 位置处的温度; K_a 为散射截面面积; S_b 为拉曼散射系数; v_a 为拉曼散射光频率; α_0 为入射光脉冲的损耗系数; α_a 为拉曼反斯托克斯散射光损耗系数.

在传统基于单路解调的 RDOFS 系统中, 为建

立反斯托克斯散射光强与温度之间的定量关系, 必须将整段传感光纤均匀置于一个已知且恒定的参考温度 (T_0) 环境中进行定标. 在此定标条件下测得的反斯托克斯光强可表述为如下函数关系:

$$P(T_0) = P_0 K_a S_b v_a^4 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L] R(T_0). \quad (2)$$

$R_a(T)$ 表示温度为 T 时, 拉曼后向反斯托克斯散射信号的温度系数, 其表达式如下:

$$R_a(T) = \frac{1}{\exp(h\Delta v/k_B T) - 1}. \quad (3)$$

联立 (1) 式—(3) 式, 待测点的温度解调结果 T 可表示为

$$T = \left\{ \frac{k_B}{h\Delta v} \ln \left\{ \frac{P(T)}{P(T_0)} \left[\exp\left(\frac{h\Delta v}{k_B T_0}\right) - 1 \right] + 1 \right\} \right\}^{-1}, \quad (4)$$

其中, h 为普朗克常数, Δv 为拉曼散射光频移量, k_B 为玻尔兹曼常数. 由于传统拉曼分布式光纤温度解调过程并未考虑到传感光纤激发的散射信号的叠加效应, 即当待测 FUT 长度小于系统空间分辨率对应的空间尺度时, FUT 区域与非 FUT 区域的后向散射信号发生非相干叠加, 导致拉曼反斯托克斯光强度发生显著失真, 使得解调温度偏离真实值. 此现象的数学表征如 (5) 式所示:

$$P(T+T_f) = P_0 K_a S_b v_a^4 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L] R_a(T+T_f), \quad (5)$$

$$T_s = \left\{ \frac{k_B}{h\Delta v} \ln \left\{ \frac{P(T+T_f)}{P(T_0)} \left[\exp\left(\frac{h\Delta v}{k_B T_0}\right) - 1 \right] + 1 \right\} \right\}^{-1}, \quad (6)$$

其中, $P(T+T_f)$ 表示失真的拉曼反斯托克斯光; T_f 表示散射信号中所包含的非 FUT 区域的温度; T_s 表示由失真光强解调得到的温度值. (6) 式揭示了拉曼反斯托克斯光强失真导致温度解调偏差的物理机制, 理论分析与文献报道均表明, 由此机制引发的误差范围可达数十摄氏度量级^[3]. 实验研究表明其误差范围可达数十摄氏度量级, 如此显著的测温偏差, 使得传统单路解调 RDOFS 技术难以满足诸如电气设备热点精准定位、微泄漏监测等对温度精度要求极高的精细化监测应用需求.

为克服传统单路解调在空间分辨率不足时面临的信号叠加失真问题, 本文提出并采用阈值系数拟合技术. 该技术的核心原理在于: 在温度解调算法中, 引入一个动态可调的温度依赖型权重系数 (即阈值系数 Q). 此系数旨在精确补偿因空间混叠效应而损失或混淆的拉曼反斯托克斯散射光强有

效分量. 通过这种补偿机制, 能够有效地重构 FUT 区域的真实温度场分布, 从而突破系统固有空间分辨率的限制, 最终实现对 FUT 区域内亚空间分辨率尺度温度变化的精确测量. 该补偿与重构过程的核心数学关系由 (7) 式和 (8) 式定量地描述, 其中 T_f 为散射信号中所包含的非 FUT 区域的温度:

$$T = \left\{ \frac{k_B}{h\Delta\nu} \ln \left\{ \frac{P(T + T_f) \cdot Q}{P(T_0)} \left[\exp \left(\frac{h\Delta\nu}{k_B T_0} \right) - 1 \right] + 1 \right\} \right\}^{-1}, \quad (7)$$

$$Q = P(T)/P(T + T_f). \quad (8)$$

在 RDOFS 系统中, 亚空间分辨率尺度 FUT 的温度信息主要蕴含于解调所得温升曲线的峰值幅值与 FWHM 中. 当 FUT 长度与入射光脉冲宽度固定时, 由空间分辨率不足引起的测温误差集中体现为温升峰值强度的衰减; 而 FWHM 则由 FUT 空间尺度与光脉冲宽度的卷积效应共同决定. 基于上述物理约束, 如图 1 所示, 本文提出的基于一维寻峰算法的阈值系数拟合技术, 首先采用一维寻峰算法对传感光纤进行全局扫描, 精确定位亚空间分辨率尺度 FUT 区域, 同步提取其温升曲线 FWHM、峰值强度及空间位置信息. 通过预校准实验建立不同 FUT 区域长度下温升曲线峰值强度与阈值系数

的拟合模型与“FWHM-传感距离-FUT 尺寸”的定量映射模型, 将实时采集的温升曲线 FWHM 及位置坐标输入 FWHM 映射模型, 确定当前 FUT 的实际长度; 基于该长度匹配对应的阈值系数拟合模型, 对失真的温升峰值进行强度补偿, 利用补偿后的峰值重构 FUT 区域真实温度场分布. 通过补偿由系统空间分辨率限制导致的温升峰值偏差, 显著地提升了亚空间分辨率尺度 FUT 的测温精度. 寻峰算法通过识别数据序列中的局部极大值初步确定候选峰的位置与高度, 进而采用插值拟合提升获取到的峰 FWHM 精度. 为了排除噪声背景影响, 峰值识别主要依据最小峰突度准则, 该准则能确保仅识别出显著高于局部背景的可靠信号峰. 同时, 通过设定最小峰间距离, 避免将单个宽峰的顶部波动误判为多个独立峰, 从而保证了峰位置与 FWHM 测量结果的准确性. 所有关键参数均根据数据的信噪比特征进行优化设定.

2.2 阈值系数拟合技术温度补偿步骤

基于上述分析, 阈值系数拟合技术针对温度补偿的技术包括以下 4 个步骤:

1) 应用一维寻峰算法沿传感光纤进行全局扫描, 精确定位所有在亚空间分辨率尺度 FUT 区域,

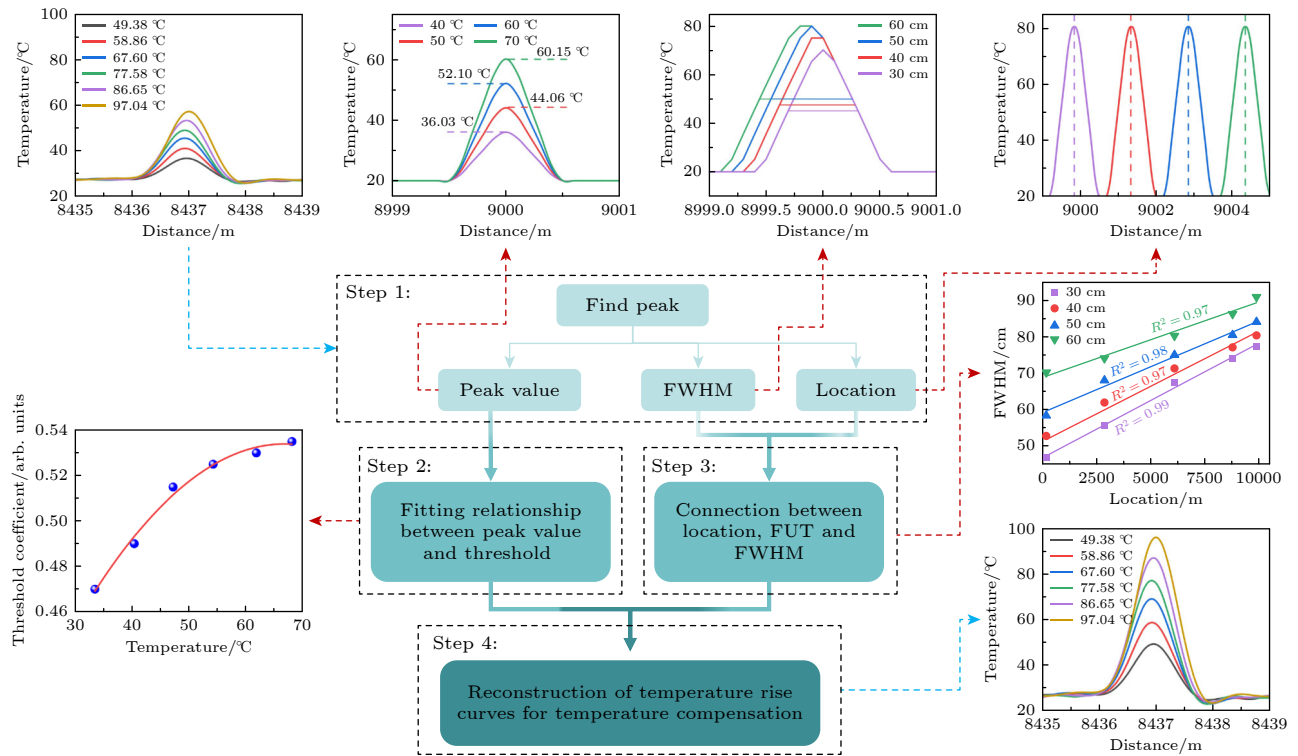


图 1 面向拉曼分布式光纤传感技术的阈值系数解调模型

Fig. 1. Threshold coefficient demodulation model for Raman-based distributed fiber optic sensing technology.

并同步提取 FUT 区域对应的三个核心特征参数, 温升曲线峰值 (peak value), FWHM 以及峰值的空间位置信息 (location);

2) 基于提取到的温升曲线峰值数据, 研究并建立其与阈值系数之间的定量关系, 利用模型对原始失真温升曲线峰值进行预校准, 确定阈值系数与温升曲线峰值的拟合函数模型;

3) 分析并建立“FWHM-传感距离-FUT 尺寸”的定量映射模型, 量化传感系统中传感距离与 FUT 长度对 FWHM 的影响;

4) 将实时采集的温升曲线 FWHM 及位置坐标输入“FWHM-传感距离-FUT 尺寸”的定量映射模型, 确认 FUT 区域长度, 选择最优的阈值系数拟合模型; 应用所选模型计算相应阈值系数实现温度的有效补偿, 重构 FUT 区域真实温度分布.

3 FWHM 与 FUT 长度关系讨论

为了证明上文提出的“FWHM-传感距离-FUT 尺寸”的定量映射模型的有效性, 接下来将以理论推导与实验仿真的方式验证 FWHM 与 FUT 长度之间的定量关系. 本方案提出的拉曼后向散射模型如图 2 所示. 设脉冲对应的空间尺度为 τ , FUT 长度为 x , FUT 区域温度为 T_p , 非 FUT 区域温度为 T_b . 后向散射峰值强度为探测信号与脉冲响应卷积, 可表示为

$$I = u \otimes h(T) = \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T)], \quad (9)$$

其中, u 为探测信号; $h(T)$ 为对应温度的脉冲响应函数, 可得温度峰值时 (图 2(a) 中 D 点) 后向散射强度 I_{peak} 与非 FUT 区域 (图 2(a) 中 B 点) I_{base} 为

$$I_{\text{peak}} = \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T_p)], \quad (10)$$

$$I_{\text{base}} = \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T_b)]. \quad (11)$$

峰高为

$$I_{\text{peak}} - I_{\text{base}} = \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T_p)] - \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T_b)], \quad (12)$$

则半峰高的强度 I_{half} 为

$$I_{\text{half}} = \frac{1}{2} [I_{\text{peak}} - I_{\text{base}}] \\ = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T_p)] - \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T_b)] \right\}. \quad (13)$$

峰半高时 (图 2(a) 中 C 点与 E 点), 实际后向散射信号强度 I_{hp} 可以通过 I_{half} 与 I_{base} 计算获得, 如 (14) 式所示, 而脉冲在 FUT 中传输后向散射的强度为单调递增后递减, 因此确认各个位置的强度就能确定 I_{half} 的位置即确认 FWHM 的长度.

$$I_{\text{hp}} = I_{\text{half}} + I_{\text{base}} \\ = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T_p)] + \sum_{i=1}^{\tau} [u_i \otimes h(T_b)] \right\}. \quad (14)$$

设 FUT 区域起点为零点, 由 (14) 式及图 2(b) 可得当后向散射强度为 I_{hp} 时, 脉冲进入 FUT 区域位置为 $\tau/2$, 离开 FUT 区域位置为 $\tau/2 + x$, 该强度所在位置之间的长度即为寻峰函数获得的半高全宽, 在数值上即为 FUT 长度.

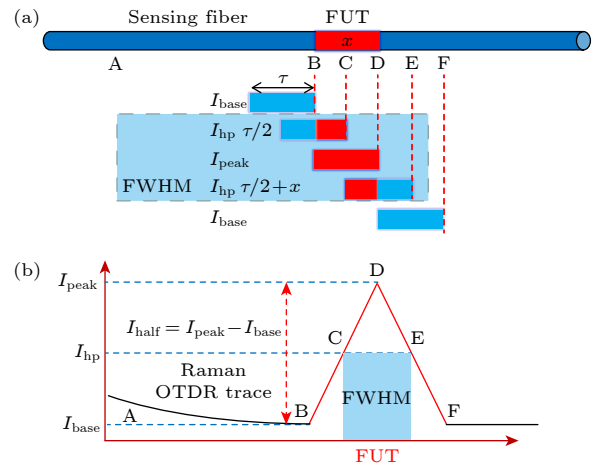


图 2 脉冲在 FUT 区域的传输及散射模型 (a) 脉冲在 FUT 区域的传输模型; (b) 脉冲在 FUT 区域的散射模型
Fig. 2. Propagation and scattering models of pulses in the FUT region: (a) Propagation model of pulses in the FUT region; (b) scattering model of pulses in the FUT region.

4 实验装置

基于阈值系数拟合技术的 RDOFS 实验装置如图 3 所示, 系统主要由激光器 (laser)、半导体光放大器 (semiconductor optical amplifier, SOA)、掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA)、波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM)、雪崩光电探测器 (avalanche photodiode, APD)、高速数据采集卡 (data acquisition card, DAC)、脉冲发生器 (pulse generator)、多模传感光纤 (multimode fiber, MMF) 及高精度温度室控制器 (temperature chamber controller, TCC)

构成. 激光器输出中心波长为 1550 nm 的连续激光, 经 SOA 调制产生周期性光脉冲信号; 该脉冲信号进入 EDFA 进行功率放大后, 注入 WDM 的 1550 nm 端口并耦合至 MMF 中激发拉曼后向散射光信号. WDM 滤出波长为 1450 nm 的拉曼后向反斯托克斯光信号并传输至 APD 转换成电信号, 随后被 DAC 采集并数字化, 最终传输至计算机进行温度解调与阈值系数补偿处理. 脉冲发生器通过生成同步的周期性电脉冲信号, 精确控制 SOA 的调制时序与 DAC 的数据采集触发时序, FUT 设置在 TCC 中以精确控制 FUT 区域温度.

5 实验结果

为进一步验证上述理论的可行性, 即通过温升曲线峰值、阈值系数与 FUT 真实温度的映射关系重构失真温升曲线, 并补偿峰值温度偏差, 进行了相应实验验证. 图 3 展示了在相同温度下温升曲线峰值、FWHM 随 FUT 长度变化的定量关系. 实验中采用 10 km 多模光纤作为传感介质, 设置入射

光脉冲宽度为 3 ns, 重复频率为 9 kHz, FUT 区域设置在传感光纤 9.9 km 处, 长度分别为 30, 40, 50 和 60 cm, 通过 TCC 将温度稳定控制在 80 °C.

图 4 展示了在恒定温度条件下, 温升曲线峰值强度与 FWHM 随 FUT 长度变化的定量响应规律. 如图 4(a) 所示, 不同长度 FUT(30, 40, 50 和 60 cm) 对应的温度解调结果分别为 51.88 °C, 57.21 °C, 61.85 °C 和 64.26 °C. 结果表明, 随着 FUT 长度的增加, 温升曲线峰值强度呈现明显的非线性衰减特性, 该现象源于更长 FUT 区域产生的拉曼散射光子量提升, 从而抑制了非 FUT 信号的干扰, 减弱了温升曲线失真程度. 图 4(b) 进一步揭示了 FWHM 与 FUT 区域长度之间的关系. 观察到 FWHM 与 FUT 长度在 30—60 cm 内呈显著线性正相关, 拟合优度 (R^2) 等于 0.986, 证实 FWHM 可作为表征和量化亚空间分辨率尺度 FUT 区域长度的关键特征参数.

为验证温升曲线 FWHM 特征的温度无关性及基于 FWHM 的 FUT 长度识别方法在变温环境下的可靠性, 设计了相应验证实验. 实验系统采用

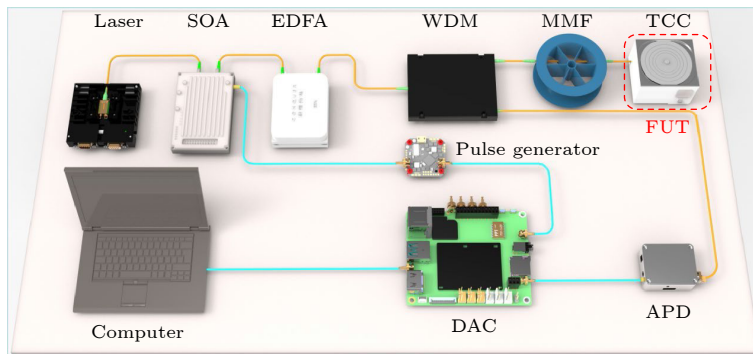


图 3 基于阈值系数拟合方法的 RDOFS 实验装置

Fig. 3. RDOFS experimental setup based on threshold coefficient fitting method.

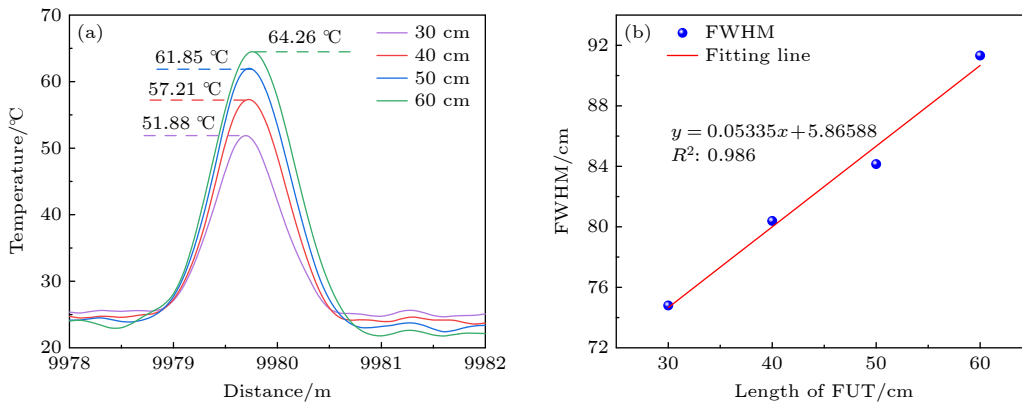


图 4 基于相同温度下不同长度 FUT 的分布式温度解调结果 (a) FUT 温度解调结果; (b) FWHM 随 FUT 长度变化关系

Fig. 4. Distributed temperature demodulation results based on different lengths of FUTs at the same temperature: (a) FUT temperature demodulation results; (b) FWHM variation with the lengths of FUTs.

10.0 km 传感光纤, 在距入射端 10.0 km 处设置三种典型亚空间分辨率尺度的 FUT 区域 (长度分别为 30, 40 和 50 cm), 通过 TCC 将 FUT 区域温度从 60 °C 逐步升高至 90 °C, 并同步记录温升曲线及其 FWHM 特征参数.

图 5 展示了不同长度 FUT 在不同探测温度下的解调结果及 FWHM 与温度的变化关系. 图 5(a)—(c) 分别观测到固定长度 FUT 区域的解调温度测量误差随设定温度升高而系统性增大: 对于 30 cm FUT, 误差从 64.27 °C 设定温度时的 23.60 °C 增至 91.86 °C 时的 36.70 °C; 40 cm FUT 误差由 63.37 °C 时的 16.34 °C 增至 91.23 °C 时的 29.08 °C; 50 cm FUT 误差由 63.62 °C 时的 13.99 °C 增至 91.59 °C 时的 23.64 °C. 结果表明, 相同 FUT 长度下测量误差与设定温度呈正相关, 且同温区内较短 FUT (如 30 cm) 的测温误差显著大于较长 FUT (如 50 cm), 误差幅度差值达 13.06 °C (在 91 °C 附近). 进一步验证了 FUT 长度对测温精度的决定性影响. 图 5(d) 定量地分析了不同 FUT 长度下温升

曲线 FWHM 的温度稳定性特征. 实验数据显示: 30 cm FUT 长度的 FWHM 平均值为 74.7 cm, 其温度变化导致的不确定度为 1.4 cm; 40 cm FUT 的 FWHM 均值为 80.1 cm, 不确定度 1.9 cm; 50 cm FUT 的 FWHM 均值为 85.0 cm, 不确定度 1.4 cm. 通过 Pearson 相关性分析计算 30, 40, 50 cm FWHM 与温度变化关系相关性, 计算出相关系数 $|r| < 0.2$, 显著系数 $p > 0.05$, 证实 FWHM 作为空间特征参数具有显著的温度无关性, 同时其统计波动范围 (< 1.9 cm) 远小于不同 FUT 长度间的基线差异 (≥ 5.4 cm), 为基于 FWHM 的亚空间分辨率区域长度识别奠定了重要的实验基础.

图 6 展示了在不同传感距离 (163, 2800, 6100, 8790 和 9898 m) 位置亚空间分辨率尺度 FUT 区域的温升曲线 FWHM 变化关系. 实验中, 各位置 FUT 区域均通过 TCC 精确控温于 80 °C 并分别设置 30, 40, 50 和 60 cm 四种典型长度进行对比测试. 在传感距离增加过程中, 各固定长度 FUT 区域的温升曲线 FWHM 均呈现规律性扩展, 具

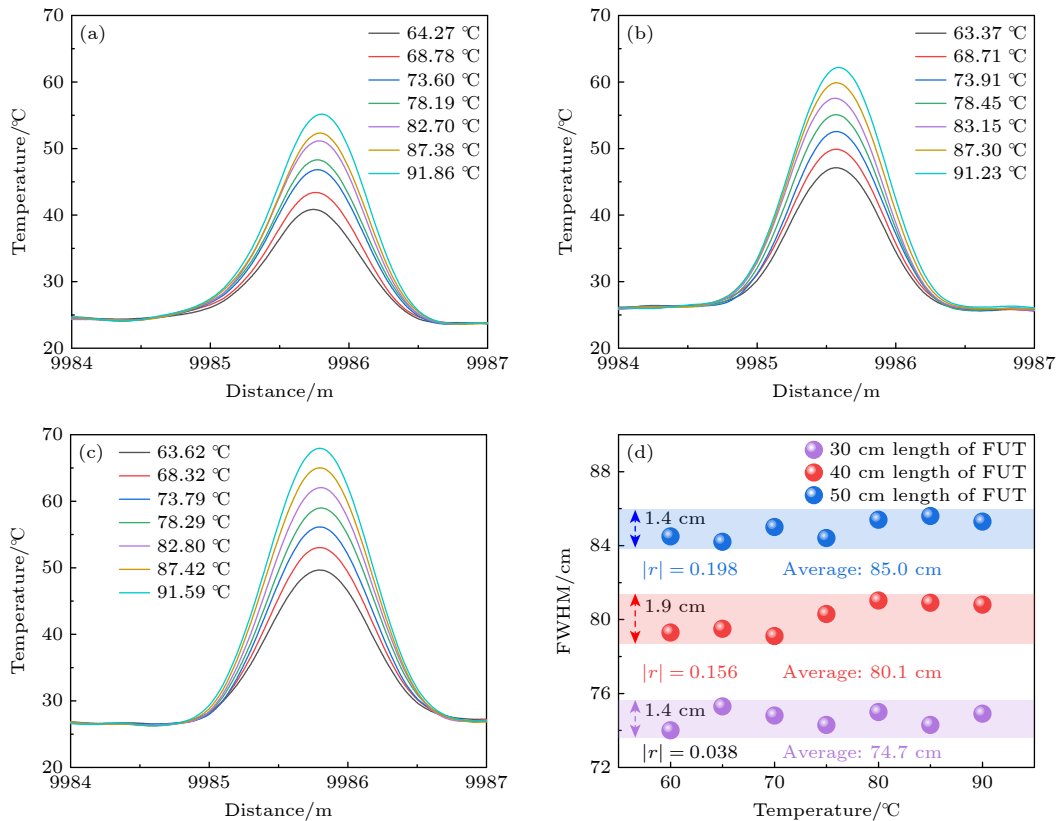


图 5 不同长度 FUT 在不同探测温度下的解调结果 (a) 30 cm FUT 的温度解调结果; (b) 40 cm FUT 的温度解调结果; (c) 50 cm FUT 的温度解调结果; (d) FWHM 与温度的变化关系

Fig. 5. Demodulation results of different length FUTs at different detection temperatures: (a) Temperature demodulation results of 30 cm FUT; (b) temperature demodulation results of 40 cm FUT; (c) temperature demodulation results of 50 cm FUT; (d) variation of FWHM with temperature.

体表现为: 30 cm FUT 的 FWHM 从 46.7 cm 增至 77.4 cm; 40 cm FUT 从 52.7 cm 扩展至 80.4 cm; 50 cm FUT 由 58.3 cm 增长至 84.1 cm; 60 cm FUT 自 70.2 cm 上升至 91.0 cm. 在相同 FUT 长度条件下, FWHM 与传感距离存在显著线性正相关 ($R^2 > 0.97$). 该现象由多模光纤的模间色散脉冲展宽效应主导: 温升曲线的 FWHM 本质上由入射脉冲宽

度与色散展宽脉冲的卷积过程决定. 随着传感距离增大, 模间色散导致的脉冲时域持续展宽, 最终引起 FWHM 的线性增长, 此物理机制构成成长距离 RDOFS 空间分辨率核心限制因素. 该结果证实一维寻峰阈值系数拟合技术, 可以通过寻峰算法定位亚空间分辨率尺度 FUT 空间位置并提取 FWHM, 建立“FWHM-传感距离-FUT 尺寸”定量映射模型以确定 FUT 长度, 据此选择最优阈值系数对原始温升曲线峰值进行校准, 最终重构真实温度场.

为构建 30 cm FUT 区域的阈值系数与温升曲线峰值的阈值系数拟合模型, 在传感光纤 9.9 km 处设置 30 cm FUT 进行预校准实验, 在 40—90 °C 温度区间以 10 °C 步长设置温度梯度, FUT 区域被放置于 TCC 内, 以确保温度场的均匀性和稳定性.

图 7(a) 显示原始分布式温度探测结果存在显著的系统性偏差, 基于拉曼散射信号中非 FUT 区域干扰的物理机制分析, 拉曼反斯托克斯散射信号中的温度信息包含非 FUT 区域的干扰, 致使解调重构的温升曲线发生失真, 测量峰值温度显著低于 TCC 设定温度. 图 7(b) 显示了 30 cm FUT 的

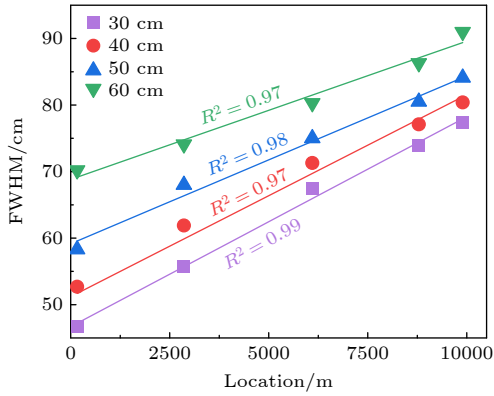


图 6 FWHM 与传感光纤位置的变化关系

Fig. 6. Variation of FWHM with respect to sensing fibre position.

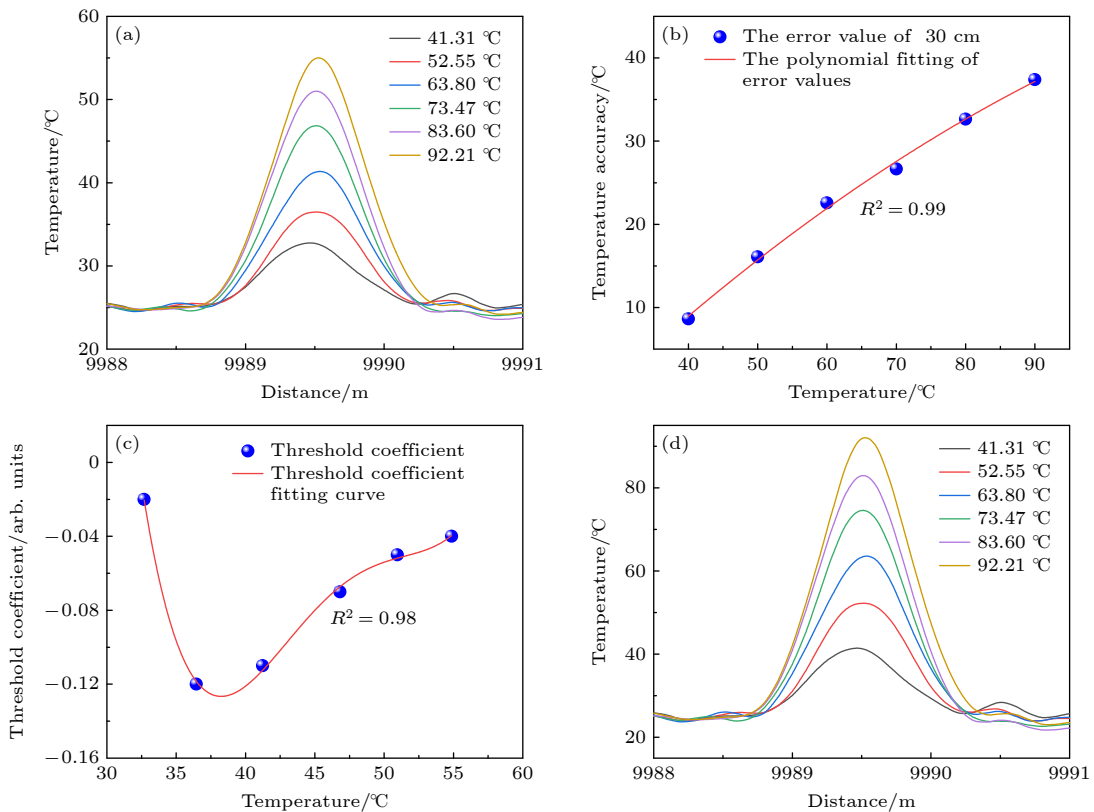


图 7 30 cm 长度 FUT 的预校准实验结果 (a) 原始分布式温度探测结果; (b) 温度精度实验结果; (c) 阈值系数拟合实验结果; (d) 校准后的实验结果

Fig. 7. Pre-calibration experimental results of 30 cm length FUT: (a) Raw distributed temperature detection results; (b) temperature accuracy experimental results; (c) experimental results of threshold coefficient fitting; (d) post-calibration experimental results.

温度精度实验结果, 理论分析表明在亚空间分辨率尺度内的 FUT 温度精度随着实际温度增高而变大. 这是因为在 FUT 长度与系统脉冲宽度不变条件下, FUT 与非 FUT 空间混叠比例固定, FUT 温升增强其产生的拉曼反斯托克斯光强, 而混叠的非 FUT 区域产生光强不变, 致使有效信号占比相对低温温升曲线降低, 这一物理机制直接造成解调温度误差从 8.62 °C 增大到 37.39 °C. 图 7(c) 呈现了为消除该误差建立的基于原始温升曲线峰值温度 (40 °C—90 °C) 与对应阈值系数的多项式拟合模型, 其中阈值系数由实际温度通过 (7) 式和 (8) 式确定, 模型可靠性良好 ($R^2 = 0.98$). 图 7(d) 显示的是图 7(a) 应用该模型补偿后的温升曲线, 证明该技术可有效地消除在亚空间分辨率长度内 FUT 的信号失真.

图 8 完整呈现了基于预校准实验所构建的阈值系数-温升峰值关系模型在亚空间分辨率尺度下 FUT 区域的温度解调结果. 图 8(a) 展示了 30 cm FUT 区域放置于温度控制在 48.71 °C, 58.60 °C, 67.94 °C, 78.78 °C 和 87.60 °C 的 TCC 环境中所测得的原始温升曲线. 随着设定温度升高, 测温误

差由 13.39 °C 恶化至 34.70 °C, 复现了图 7(a) 中观测到的误差增长规律. 图 8(b) 显示的是将图 8(a) 的温度解调结果峰值输入图 8(c) 的阈值系数拟合模型, 计算对应阈值系数映射. 图 8(c) 展示基于该系数通过 (6) 式重构的 FUT 温度场分布结果. 补偿后峰值温度与设定温度的偏差显著减小, 准确反映了亚空间分辨率尺度下 FUT 区域的真实温度场变化. 图 8(d) 对比了 30 cm FUT 区域原始温升曲线峰值温度与阈值补偿后的温度精度. 实验表明, 原始数据温度精度随温度升高呈系统性恶化, 而经阈值系数拟合模型补偿后, 测温误差显著降低, 温度精度提升至 1.5 °C. 验证了该技术在 10 km 传感距离上实现亚空间分辨率尺度 FUT 区域 (30 cm) 精准测温的有效性, 以及在 40 °C—90 °C 范围内的普适性.

为进一步验证阈值系数拟合补偿的有效性, 进行了传统 RDOFS 系统下的空间分辨率与温度检测精度对比实验. 实验采用 10.0 km 传感光纤, 设置了 10.0 m 长度的 FUT 区域, 将 TCC 设定温度设置为 50—90 °C, 步长为 10 °C, 测得结果如图 9 所示. 定义系统空间分辨率为 FUT 区域内温度上

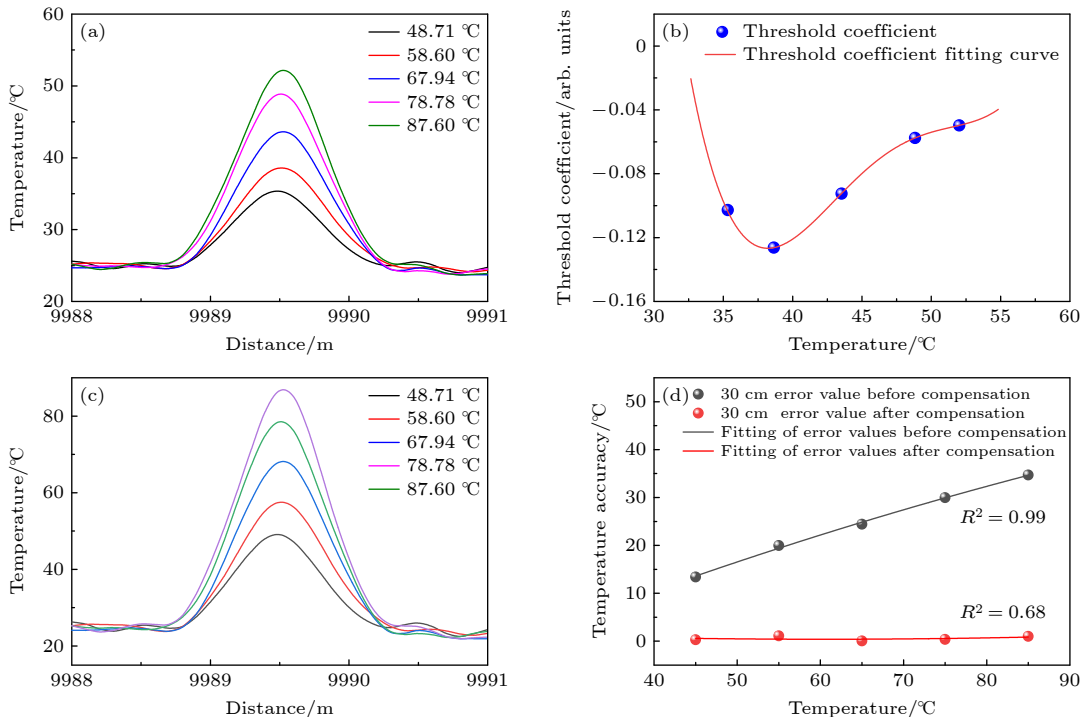


图 8 30 cm 长度 FUT 阈值补偿实验结果 (a) 30 cm 长度 FUT 原始温度解调结果; (b) 阈值系数计算结果; (c) 温度补偿后的实验结果; (d) 补偿前后系统温度精度对比结果

Fig. 8. Experimental results of 30 cm length FUT threshold compensation: (a) 30 cm length FUT original temperature demodulation results; (b) threshold coefficient calculation results; (c) experimental results after temperature compensation; (d) comparison results of system temperature accuracy before and after compensation.

升沿的 10%—90%，测得系统空间分辨率为 0.8 m。当 FUT 区域长度大于空间分辨率时，定义 FUT 区域中的所有待测温度点的测量均值为系统的检测温度。分别测得温度为 49.63 °C, 59.77 °C, 69.23 °C, 78.93 °C 和 87.46 °C。在传统 RDOFS 系统中没有发生 FUT 区域与非 FUT 区域的后向散射信号的混叠的条件下，在 10.0 km 的传感距离下，实验测得温度精度为 0.69 °C, 1.08 °C, 2.00 °C, 2.41 °C 和 2.10 °C，造成该误差的主要因素包括两个方面：一是 TCC 内部水温在实验过程中存在微小波动，未能完全保持恒定；二是用于标定的热电偶温度计自身存在一定的测量误差。上述实验结果表明，传统 RDOFS 的温度检测精度与亚空间分辨率区域下的经阈值系数拟合补偿后的温度精度结果相近，证明了本文提出技术的有效性，可广泛应用于土木工程结构裂缝区温度场监测以及核工业管路微泄漏点早期预警等关键场景。

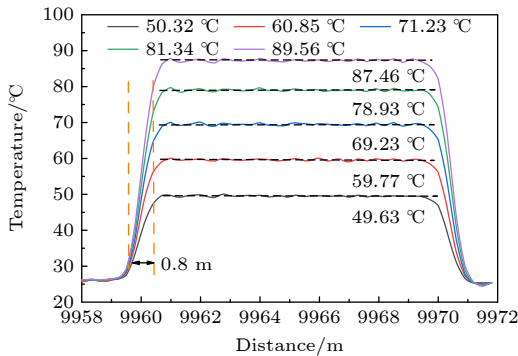


图 9 系统空间分辨率及该空间分辨率下的温度精度
Fig. 9. System spatial resolution and temperature accuracy at this spatial resolution.

6 结 论

本文提出一种基于寻峰函数的阈值系数拟合技术，成功实现了在 30 cm 亚空间分辨率尺度内对光纤传感区域的精准温度测量，有效地克服了传统系统因空间分辨率不足导致光纤拉曼散射信号混叠引起的机理型误差。该技术首先利用一维寻峰函数提取传感光纤沿线温升曲线的峰值、FWHM 及峰值位置信息。在此基础上，建立了传感距离、FUT 尺寸与温升曲线 FWHM 之间的定量映射模型，并构建了阈值系数随温度峰值变化的拟合函数模型。研究发现，FWHM 与传感距离呈显著线性正相关，同时 FWHM 具有显著的温度无关性。最终，

结合阈值系数-温升峰值拟合模型以及“FWHM-传感距离-FUT 尺寸”映射模型，实现了基于最优阈值系数的分布式温度解调结果补偿。在 10 km 传感距离上对 30 cm FUT 区域的补偿实验表明，该技术可显著地降低测温误差，将温度精度提升至 1.5 °C 以内。本方案通过纯算法创新，在无需改造系统硬件的条件下，实现了亚空间分辨率尺度温度场的精准重构。其核心优势在于结构简洁、成本低廉且工程适配性强，可广泛应用于土木工程结构裂缝区温度场监测以及核工业管路微泄漏点早期预警等关键场景。

参考文献

- [1] Zhou X, Wang F, Yang C Y, Zhang Z J, Zhang Y X, Zhang X P 2023 *Sensors* **23** 7116
- [2] Li J, Zhang M J 2022 *Light: Sci. Appl.* **11** 128
- [3] Li J, Zhou X X, Xu Y, Qiao L J, Zhang J Z, Zhang M J 2022 *Photonics Res.* **10** 205
- [4] Zhou Z X, Sha Y S, Zhang D W, Liu H, Han Y S, Yang X Y, Liao F, Feng X W, Zhu J J, Zheng X F, Cui Z F, Qu J, Yuan Y S, Xu X F, Tao T B 2021 *Opt. Fiber Technol.* **66** 102667
- [5] Zhang X P, Zhang Y X, Wang L, Yu K L, Liu B, Yin G L, Liu K, Li X, Li S N, Ding C Q, Tang Y Q, Shang Y, Wang Y S, Wang C, Wang F, Fan X Y, Sun Q Z, Xie S R, Wu H J, Wu H, Wang H P, Zhao Z Y 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0106001 (in Chinese) [张旭苹, 张益昕, 王亮, 余颀隼, 刘波, 尹国路, 刘琨, 李璇, 李世念, 丁传奇, 汤玉泉, 尚盈, 王奕首, 王晨, 王峰, 樊昕昱, 孙琪真, 谢尚然, 吴慧娟, 吴昊, 王花平, 赵志勇 2024 *光学学报* **44** 0106001]
- [6] Wang X, Jiang J F, Wang S, Liu K, Liu T G 2021 *Photonics Res.* **9** 521
- [7] Wang Y P, Zhong H J, Shan R Y, Liang W F, Peng Z W, Meng Y J, Liao C R, Fu C L 2024 *Laser Optoelectron. Prog.* **61** 0106002 (in Chinese) [王义平, 钟华健, 单荣毅, 梁文发, 彭振威, 孟彦杰, 廖常锐, 付彩玲 2024 *激光与光电子学进展* **61** 0106002]
- [8] Liang Z H, Deng K W, Ma Y L, Wang M H, Liu D B, Wu H Q, Wang Y S 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0106020 (in Chinese) [梁智洪, 邓凯文, 马云龙, 王明华, 刘德博, 吴会强, 王奕首 2024 *光学学报* **44** 0106020]
- [9] Yu T, Ren C G, Jia Y B, Li J, Zhang J Z, Xu Y 2021 *IEEE Sens. J.* **21** 373
- [10] Silva L C B, Segatto M E V, Castellani C E S 2022 *Opt. Fiber Technol.* **74** 103091
- [11] Tangudu R, Sahu P K 2022 *IETE Tech. Rev.* **39** 553
- [12] Zhu W H, Wu H T, Chen W X, Zhou M T, Yin G L, Guo N, Zhu T 2022 *Sensors* **22** 9942
- [13] Duan R 2022 *IEEE Access* **10** 57242
- [14] Xu Y, Li J, Zhang M J, Yu T, Yan B Q, Zhou X X, Yu F H, Zhang J Z, Qiao L J, Wang T, Gao S H 2020 *IEEE Sens. J.* **20** 7870
- [15] Kim H Y, Lee J H, Kim T K, Park S J, Kim H M, Jung I D 2023 *Case Stud. Therm. Eng.* **42** 102747
- [16] Yan B Q, Li J, Zhang M J, Zhang J Z, Qiao L J, Wang T 2019 *Sensors* **19** 2320
- [17] Yan J F, Shi B, Zhu H H, Wang B J, Wei G Q, Cao D F

- 2015 *Eng. Geol.* **186** 100
- [18] Silva M S P E, Alves H P, de Oliveira H J B, Leão L H V, do Nascimento J F, Martins-Filho J F 2023 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **72** 7003908
- [19] Liu T, Wang H H, Wang X, Wang Y H, Zeng S K, Wang Y R 2023 *Opt. Fiber Technol.* **75** 103177
- [20] Chen P C, Zhang T, Yang J H, Dong X P D 2023 *IEEE Sens. J.* **23** 17593
- [21] Li J, Zhang Q, Xu Y, Zhang M J, Zhang J Z, Qiao L J, Promi P M M 2019 *Opt. Express* **27** 38163
- [22] Gasser J, Warpelin D, Bussieres F, Extermann J, Pomarico E 2022 *Opt. Express* **30** 6768
- [23] Ososkov Y Z, Chernutsky A O, Dvoretzkiy D A, Sazonkin S G, Kudelin I S, Orekhov I O, Pnev A B, Karasik V E 2019 *Opt. Spectrosc.* **127** 664
- [24] Jie R M, Xiao C, Liu X, Zhu C, Rao Y J, Liu B 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0106011 (in Chinese) [介瑞敏, 肖春, 刘旭, 朱琛, 饶云江, 刘波 2024 *光学学报* **44** 0106011]
- [25] Zhang F, Li J, Li L L, Cao K Y, Xue X H, Zhang M J 2025 *Infrared Laser Eng.* **54** 20240582 (in Chinese) [张帆, 李健, 李璐磊, 曹康怡, 薛晓辉, 张明江 2025 *红外与激光工程* **54** 20240582]
- [26] Lin Q C, Cheng L H, Lü J, Zhang T F, Liang H, Guan B O 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0106013 (in Chinese) [林全聪, 程凌浩, 吕杰, 张天放, 梁浩, 关柏鸥 2024 *光学学报* **44** 0106013]
- [27] Chai D D, Zhang H J, Gao Y, Jin B Q 2022 *IEEE Sens. J.* **23** 2204
- [28] Sun X Z, Yang Z S, Hong X B, Zaslawski S, Wang S, Soto M A, Gao X, Wu J, Thévenaz L 2020 *Nat. Commun.* **11** 5774
- [29] Wang M, Wu H, Tang M, Zhao Z Y, Dang Y L, Zhao C, Liao R L, Chen W, Fu S N, Yang C, Tong W J, Shum P P, Liu D M 2017 *Opt. Express* **25** 4907
- [30] Liu Y P, Ma L, Yang C, Tong W J, He Z Y 2018 *Opt. Express* **26** 20562
- [31] Wu H, Du H, Zhao C, Tang M 2022 *Sensors* **22** 2139
- [32] Dai G Y, Fan X Y, He Z Y 2018 *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)* Hangzhou China, October 26-29 2018 p1
- [33] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L 2016 *Nat. Commun.* **7** 10870
- [34] Zhang Z S, Wu H, Zhao C, Tang M 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 654
- [35] Ren Y L, Li T F, Wang R G, Li H G, Ba D X, Dong Y K 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** 2402071
- [36] Wang C Y, Li J, Zhou X X, Cheng Z J, Qiao L J, Xue X H, Zhang M J 2023 *Light Sci. Appl.* **12** 213
- [37] Fan B W, Li J, Cheng Z J, Xue X H, Zhang M J 2024 *Photonics Res.* **12** 2365
- [38] Li J, Zhou X X, Yin Z T, Wang C Y, Xu Y, Zhang J Z, Zhang M J 2021 *Adv. Photonics Res.* **2** 2100047
- [39] Li J, Wang C Y, Cao K Y, Fan B W, Zhou X X, Xu Y, Cheng Z J, Zhang Q, Qiao L J, Xue X H, Zhang J Z, Zhang M J 2023 *APL Photonics* **8** 076105

High-accuracy Raman distributed fibre optic sensing technology based on threshold coefficient fitting*

HUANG Xin¹⁾ CAO Kangyi¹⁾ CHAI Mingyuan¹⁾ ZHANG Weiyi¹⁾
XUE Xiaohui¹⁾²⁾³⁾ LI Jian^{1)2)3)†} ZHANG Mingjiang¹⁾²⁾³⁾

1) (*College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

2) (*Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control Systems (Ministry of Education and Shanxi Province), Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

3) (*Shanxi Provincial Key Laboratory of Precision Measurement Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

(Received 21 October 2025; revised manuscript received 18 November 2025)

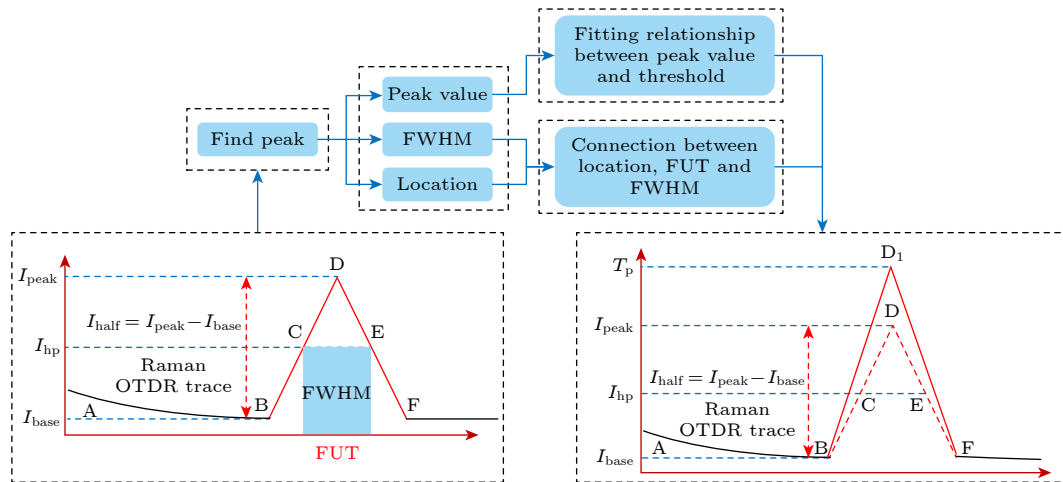
Abstract

In response to the technical issue in Raman distributed optical fiber technology, where the traditional meter-level spatial resolution is insufficient and causes a decrease in system measurement accuracy within sub-spatial resolution fiber segments of the sensing fiber, a threshold coefficient fitting technique based on a one-dimensional peak-seeking method is proposed in this study. Significant temperature measurement errors of up to tens of degrees Celsius are caused by the overlap of Raman scattering signals from non-detection regions when the detection fiber length is shorter than the system's spatial resolution. This severely limits the technology

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62475183, U23A20375, 62205234) and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFF0715700).

† Corresponding author. E-mail: lijian02@tyut.edu.cn

application in scenarios requiring precise temperature monitoring. To address the above bottleneck, a purely algorithmic approach is introduced, which can reconstruct the temperature field without modifying the hardware. The sensing fiber is globally scanned using a one-dimensional peak-finding algorithm to precisely locate sub-spatial resolution detection fiber regions. At the same time, the peak intensity, full width at half maximum (FWHM), and location are extracted from the temperature rise curve within the fiber under test (FUT). Through pre-calibration experiments, a quantitative fitting model is established between peak temperature rise curves and threshold coefficients, revealing a quantitative mapping relationship between FWHM and sensing distance, as well as length of FUT. The results indicate that FWHM exhibits a significant positive linear correlation with sensing distance, and this correlation is independent of temperature variation. This characteristic enables FWHM to serve as a reliable feature parameter for identifying and detecting the actual length of optical fibres. During real-time measurements, the detection fiber length is determined via the mapping model based on extracted FWHM and location. Then the corresponding threshold coefficient fitting model is selected to compensate for the distorted temperature rise peaks, thereby reconstructing the distributed temperature field. The experimental results demonstrate that over a 10 km sensing distance, the application of this technique significantly enhances the temperature measurement accuracy within the 30 cm detection fiber, achieving 1.5 °C compared with the baseline accuracy of 34.7 °C before compensation. The conclusions indicate that the proposed threshold coefficient fitting technique, through algorithmic innovation, effectively overcomes the technical limitation of reducing temperature measurement accuracy in sub-spatial resolution regions within Raman distributed fibre optics sensing. The constructed FWHM quantitative mapping model provides a critical basis for threshold compensation, ultimately enabling precise temperature monitoring of sub-metre regions in long-distance sensing contexts. This solution features a streamlined structure, low cost, and easy engineering integration. It provides a novel approach for long-term, high-precision temperature monitoring in fields such as power cable fault orientation, oil and gas pipeline micro-leakage early warning, and civil structural health monitoring.



Keywords: distributed fibre optic sensing, Raman scattering, spatial resolution, high temperature accuracy

DOI: [10.7498/aps.75.20251440](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251440)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251440](https://cstr.net.cn/urn:cn:cs:32037.14.aps.75.20251440)



基于阈值系数拟合的高精度拉曼分布式光纤传感技术

黄鑫 曹康怡 柴明渊 张炜怡 薛晓辉 李健 张明江

High-accuracy Raman distributed fibre optic sensing technology based on threshold coefficient fitting

HUANG Xin CAO Kangyi CHAI Mingyuan ZHANG Weiye XUE Xiaohui LI Jian ZHANG Mingjiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 040405 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251440

CSTR: 32037.14.aps.75.20251440

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251440>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于动态标定的拉曼分布式光纤测温系统研究

Research on Raman distributed fiber temperature measurement system based on dynamic calibration

物理学报. 2025, 74(7): 074203 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241652>

基于拉曼散射光动态校准的分布式光纤温度传感系统

Distributed fiber optic temperature sensor based on dynamic calibration of Raman Stokes backscattering light intensity

物理学报. 2022, 71(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220611>

非线性效应对前向受激布里渊散射分布式传感的影响

Influence of nonlinear effects on forward stimulated Brillouin scattering distributed sensing

物理学报. 2022, 71(15): 154206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220313>

结合高分辨率X射线光电子能谱和拉曼散射研究 $\text{Ge}_x\text{Ga}_8\text{S}_{92x}$ 玻璃结构

Structure of $\text{Ge}_x\text{Ga}_8\text{S}_{92x}$ glasses studied by high-resolution X-ray photoelectron spectroscopy and Raman scattering

物理学报. 2023, 72(1): 017101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221653>

基于拉曼-布里渊散射的海水盐度精细探测遥感方法

Method of remotely sensing seawater salinity fine detection based on Raman Brillouin scattering

物理学报. 2021, 70(22): 229201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210201>

高精度双斜坡辅助式混沌布里渊光纤动态应变传感

High-accuracy dual-slope-assisted chaotic Brillouin fiber dynamic strain measurement

物理学报. 2021, 70(10): 100704 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201892>