

基于NLM的喇曼光时域反射温度降噪方法

田翔¹,张伟²,张峰³,刘远志¹,闫子恒⁴,杜斌^{4*},何俊⁴

(1.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳518000;2.中海油田服务股份有限公司深圳作业公司,广东深圳518000;
3.中海油田服务股份有限公司油田技术事业部,河北廊坊065201;4.深圳大学物理与光电工程学院,广东深圳518060)

摘要:为实现油气井下温度场的高精度测量,解决喇曼光时域反射技术远距离信噪比低的问题,提出一种基于非局部均值(NLM)的喇曼光时域反射温度降噪方法。该方法利用二维空间-时间温度数据构建温度图像,通过计算图像邻域间欧氏距离判断相似性,实现加权平均降噪。实验结果表明:在9.68 km测点处,解调精度从0.68 °C提升至0.11 °C,长时间温度波动从1.4 °C降低到0.55 °C,且在30~90 °C连续测温中实时性良好。

关键词:分布式光纤传感;光时域反射;自发喇曼散射;温度测量;非局部均值

中图分类号:TN256;TP212.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0041-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.007

NLM-based temperature denoising method for Raman optical time-domain reflectometry

TIAN Xiang¹, ZHANG Wei², ZHANG Feng³, LIU Yuanzhi¹, YAN Ziheng⁴, DU Bin^{4*}, HE Jun⁴

(1. Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation, Shenzhen Guangdong 518060, China; 2. Shenzhen Operation Company of China Oilfield Services Limited, Shenzhen Guangdong 518060, China; 3. Oilfield Technology Division of China Oilfield Services Limited, Langfang Hebei 065201, China; 4. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518060, China)

Abstract: To achieve high-precision measurement of downhole temperature fields in oil and gas wells and address the low signal-to-noise ratio problem of Raman optical time-domain reflectometry over long distances, a temperature denoising method based on Non-Local Means(NLM) for Raman optical time-domain reflectometry is proposed. This method constructs temperature images using two-dimensional spatial and temporal temperature data, evaluates similarity by calculating Euclidean distances between image neighborhoods, and achieves weighted-average denoising. Experimental results show that at a measurement point of 9.68 km, the demodulation precision improved from 0.68 °C to 0.11 °C, long-term temperature fluctuations decrease from 1.4 °C to 0.55 °C, and good real-time performance is maintained during continuous temperature measurements ranging from 30 °C to 90 °C.

Key words: distributed optical fiber sensing, optical time-domain reflectometry, spontaneous Raman scattering, temperature measurement, non-local means

0 引言

在油气能源探测与开采的整个生命周期内,有效

收稿日期:2024-12-11。

基金项目:国家自然科学基金项目(62205225)资助;广东省自然科学基金项目(2021A1515110320)资助;中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目(KJGG2021-0503)资助。

作者简介:田翔(1976—),男,湖北潜江人,本科,高级工程师,1998年毕业于江汉石油学院石油工程专业,现主要从事油气田勘探开发及管理工作。主要研究方向是油气藏提高采收率、油气田开发工程等。

***通信作者:**杜斌(1992—),男,博士,副研究员。主要研究方向为飞秒激光微加工及分布式光纤传感技术。



获取井下地层结构信息对能源开采效益提升具有至关重要的意义。然而,油气储藏层通常位于距离地面数公里的地底深处,其环境具有高温、高压、强腐蚀等复杂特点^[1-5]。传统的剖面监测设备由于成本高昂、检测距离受限以及信息获取滞后性强等问题,难以实现准确实时的地层信息获取^[6]。相比之下,基于光纤的分布式传感技术因其体积小、易于大规模集成、传感距离长、耐高温高压、抗腐蚀等优势,特别适用于井下温度、压力等物理参数的剖面监测应用^[1-2, 7]。其中,光纤喇曼分布式温度传感(RDTS)技术由于喇曼散射信号对温度具有单一敏感性,成为测井温度剖面应用中

田翔,张伟,张峰,等:基于NLM的喇曼光时域反射温度降噪方法

最具潜力的解决方案之一,已在油气勘探领域逐步推广应用^[8-11],且市场规模持续扩大^[1-2, 12-13]。

光纤 RDTs 技术通常基于喇曼光时域反射系统 (R-OTDR) 实现分布式温度测量,其原理是通过检测同一时刻(同一位置)喇曼散射反斯托克斯(Anti-Stokes)光子或斯托克斯(Stokes)光子的功率变化来反演温度分布^[1-2, 14-15]。然而,受限于背向传输喇曼信号微弱和光纤传输损耗的影响,远距离位置的喇曼散射光功率往往降至纳瓦量级,导致测量信号信噪比显著下降,进而影响系统性能,难以获取精确的温度信息。为此,研究者们提出了多种信号处理方法来提升测温精度。在色散补偿方面,王垚等人^[16]于2018年提出了一种色散补偿算法,通过对 Stokes 散射信号的位置进行修正,有效减小了因2束光传播速度差异引起的测量误差,从而提升了系统的测温精度和定位精度。在提高信噪比方面,增加背向散射喇曼迹线的平均次数是 RDTs 中最常用的数据处理手段之一。程碧钊等人^[17]于2019年进一步利用图形处理器(GPU)的 kernel 函数进行多线程累加优化,通过 50 000 次累加平均,将系统测量误差从 ± 1.1 °C降低至 ± 0.5 °C。尽管上述方法在一定程度上改善了系统性能,但常规方法对温度测量精度的提升效果仍有限,亟需探索更为高效的信号处理策略。

针对上述问题,本文提出一种基于非局域均值滤波(NLM)的R-OTDR温度降噪方法。该方法在不改变硬件系统结构的前提下,借鉴图像去噪的思想,通过信号处理手段进一步提升温度测量精度。

1 基于NLM的R-OTDR温度降噪方法原理

1.1 喇曼散射温度敏感基本原理

RDTs 技术基于 OTDR 原理和喇曼散射的温度敏感性实现温度测量。当泵浦光脉冲注入光纤时,会产生后向传输的喇曼散射光,包括 Anti-Stokes 光和 Stokes 光。其中, Anti-Stokes 光强度对温度敏感,而 Stokes 光受温度影响较小。两者的光功率^[28]可分别表示为

$$P_{as}(L, T) = P_0 K_{as} S v_{as}^4 N_{as}(T) \exp[-(\alpha_{as} + \alpha_0)L] \quad (1)$$

$$P_s(L, T) = P_0 K_s S v_s^4 N_s(T) \exp[-(\alpha_s + \alpha_0)L] \quad (2)$$

式中: P_0 为泵浦光功率, $P_{as}(L, T)$ 和 $P_s(L, T)$ 分别为位置 L 在温度 T 时的喇曼散射 Anti-Stokes 光和 Stokes

光功率, K_{as} 、 K_s 分别为 Anti-Stokes 光和 Stokes 光的散射系数(其与散射截面大小有关), S 是散射因子; v_{as} 和 v_s 分别为 Anti-Stokes 光和 Stokes 光的光频, α_{as} 和 α_s 分别为 Anti-Stokes 光和 Stokes 光在光纤中的传输损耗。 $N_{as}(T)$ 和 $N_s(T)$ 分别是温度相关的能级粒子数分布系数,服从玻尔兹曼分布定律^[11],其表达式为

$$N_{as}(T) = \frac{1}{\exp(h\Delta\nu/k_B T) - 1} \quad (3)$$

$$N_s(T) = \frac{1}{1 - \exp(h\Delta\nu/k_B T)} \quad (4)$$

式中: h 为普朗克常量, $\Delta\nu$ 为光频偏移量(约 13.2 THz), k_B 是玻尔兹曼常数。通过式(1)~式(4),将 P_s 和 P_{as} 进行比值处理,利用参考温度下的比值 $R(T_0) = P_{as}(T_0)/P_s(T_0)$ 和待测温度下的比值 $R(T) = P_{as}(T)/P_s(T)$,即可解算出相应的温度信息,如式(5)所示。

$$T = \left\{ \frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \left[\ln \frac{P_{as}(T)P_s(T_0)}{P_{as}(T_0)P_s(T)} \right] \right\}^{-1} = \left\{ \frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \left[\ln \frac{R(T)}{R(T_0)} \right] \right\}^{-1} \quad (5)$$

1.2 NLM 算法降噪原理

喇曼散射信号极其微弱(通常为纳瓦量级),且易受探测器噪声、光纤散射噪声等因素干扰,信噪比(SNR)严重制约了测温精度和测量距离,因此需要采用有效的降噪方法。

NLM 算法是一种利用图像自相似性的去噪方法,已被成功应用于分布式光纤传感信号的降噪^[29]。其核心思想是:在二维时空温度图像中,对于任意像素点,在其搜索窗口内寻找与当前像素邻域相似的区域,通过加权平均实现去噪。

NLM 算法原理示意图如图 1 所示。设以位置 p 为中心的参考邻域窗口为 $V(p)$,以位置 q 为中心的相似邻域窗口为 $V(q)$,两者之间的相似度由归一化高斯加

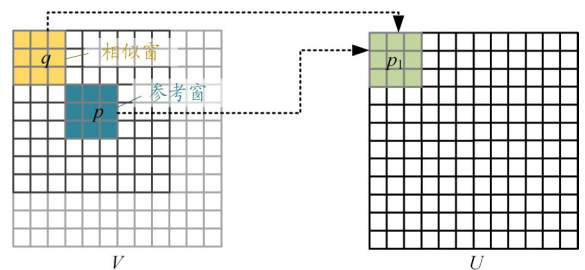


图1 NLM算法原理示意图

权的欧氏距离 $\|V(p) - V(q)\|^2$ 衡量,相应的相似度权重 $W(p, q)$ 可以表示为

$$W(p, q) = \frac{1}{Z(p)} \exp\left(-\frac{\|V(p) - V(q)\|^2}{g^2}\right) \quad (6)$$

式中: g 为平滑参数(滤波系数),用于控制高斯核函数的衰减速度,从而调节去噪强度; $Z(p)$ 为归一化权重系数,可表示为

$$Z(p) = \sum \exp\left(-\frac{\|V(p) - V(q)\|^2}{g^2}\right) \quad (7)$$

利用相似度权重 $W(p, q)$ 对原始信号 V 进行加权赋值,即可得到最终的降噪图像 U ,位置 p_i 处的去噪后信号 $U(p_i)$ 可表示为

$$U(p_i) = \sum W(p, q)V(q) \quad (8)$$

式中: $V(q)$ 为位置 q 处的初始未降噪信号。

NLM算法的优势在于充分利用了温度数据在空间和时间维度上的非局部自相似性,能够在有效抑制噪声的同时,较好地保留温度突变的细节特征和边缘信息。

1.3 基于NLM的温度解调流程

结合NLM算法的R-OTDR温度解调流程如图2所示,主要包含以下步骤:

1) 信号预处理。利用数据采集卡中的现场可编程门阵列(FPGA)对采集到的喇曼散射信号进行累加平均处理,获取初步降噪后的散射信号。

2) 距离补偿与对齐。采用埃尔米特(Hermite)插

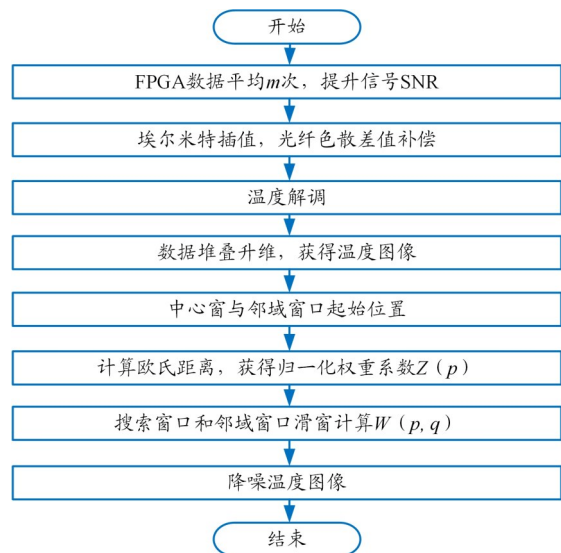


图2 结合NLM算法的R-OTDR温度解调流程

值算法对信号进行重采样,消除距离偏差,实现空间位置的精确对齐。

3) 温度解调。基于式(5)所述的解调算法,将处理后的光强信号转换为原始温度数据。

4) 数据升维。将解调得到的一维温度序列按时间轴进行堆叠,构建二维时空温度分布矩阵。

5) 参数设定。根据系统的采样点间隔和空间分辨率,确定搜索窗口及邻域窗口(参考块)的尺寸;同时选定当前待处理的中心像素点位置 p 及其对应的邻域窗口。

6) 相似度计算与权重生成。在设定的搜索窗口内滑动遍历,计算中心邻域窗口与各候选邻域窗口之间的高斯加权欧氏距离;依据距离差异计算相似度,并推导归一化权重系数 $Z(p)$ 及相似度权重 $W(p, q)$ 。

7) 加权融合与输出。利用计算得到的权重对搜索窗口内的所有像素点进行加权平均,更新中心点 p 的温度值;遍历整个二维数据矩阵,最终获得高信噪比的去噪温度场数据。

2 实验系统

用于分布式温度传感的R-OTDR系统实验装置如图3所示。该系统主要由以下组件构成:脉冲激光器(中心波长为1 550.8 nm,脉冲宽度为8 ns,重复频率为10 Hz~100 kHz)、喇曼波分复用器(R-WDM)、雪崩光电探测器(APD,带宽为100 MHz,响应波段为900~1 700 nm)、数据采集卡(DAQ,双通道12位,采样率为250 MS/s,内置FPGA)、计算机(PC)、自制恒温参考装置、多通道光开关、参考光纤以及待测光纤(FUT, 50/125 μm 渐变折射率多模光纤)。

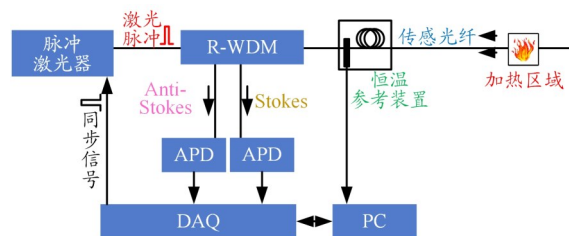


图3 R-OTDR光纤分布式温度传感系统结构

工作时,脉冲激光器发出的光脉冲经R-WDM耦合进入50/125 μm 渐变折射率多模传感光纤。R-WDM首先滤除后向散射信号中的瑞利散射及布里渊散射成分,随后将自发喇曼散射的Stokes分量和Anti-Stokes分量分离至2个独立通道。2路散射光分别由并行的APD接收,转换为模拟电信号并进行放大;经

田翔, 张伟, 张峰, 等: 基于NLM的喇曼光时域反射温度降噪方法

DAQ进行累加平均处理后,传输至PC。通过计算2路信号的强度比值,即可解调出光纤沿线的温度分布信息。

实验中,将置于自制恒温装置内的20 m传感光纤作为参考段用于系统校准;待测光纤则置于高精度恒温水浴(温度控制精度为 $\pm 0.008\text{ }^{\circ}\text{C}$)中,以表征系统的传感性能。

3 实验结果分析

3.1 系统标定与累加平均基础性能

为评估系统的基础性能,首先对喇曼散射信号的温度响应特性进行标定。实验将位于810 m处的20 m光纤置于高精度恒温水浴中,温度设定范围为30~75 $^{\circ}\text{C}$,步长为5 $^{\circ}\text{C}$;每个温度点稳定30 min后采集数据,累加平均次数设为10 000次。图4为噪声水平随累加平均次数的变化关系。可以看出,随着累加平均次数从1次逐步增加至20 000次(对应1、10、100、1 000、10 000、20 000次脉冲累加),系统的噪声水平分别为 6.8×10^{-3} 、 2.3×10^{-3} 、 7.78×10^{-4} 、 3.93×10^{-4} 、 3.41×10^{-4} 、 3.19×10^{-4} 。整体而言,噪声水平随平均次数增加呈逐渐降低趋势。当平均次数达到10 000次时(对应采集时间约1 s,激光重复频率为10 kHz),噪声下降曲线趋于平缓。

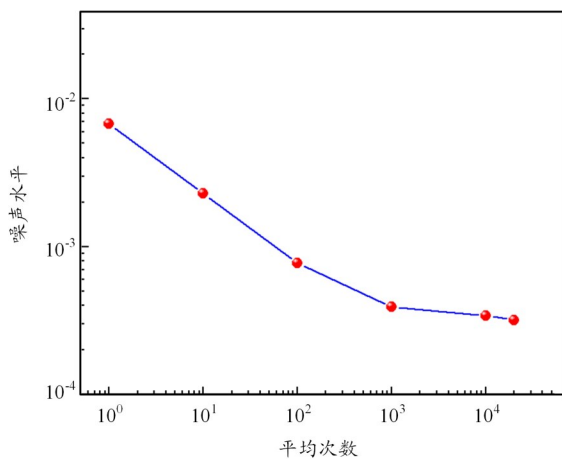
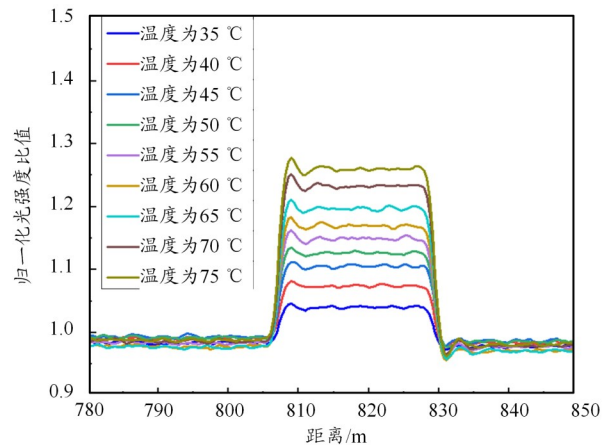


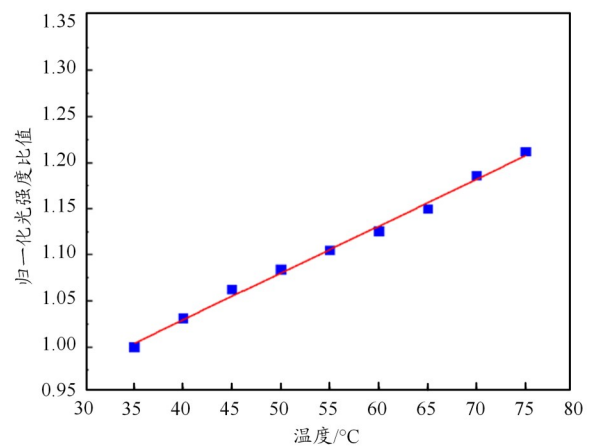
图4 噪声水平随累加平均次数的变化关系

这一现象的物理机制在于:随着累加次数增加,等效积分时间同步延长,系统随机游走噪声逐渐累积,导致累加平均对SNR的提升效率边际递减。因此,综合考虑测温响应速度与SNR增益,建议将累加平均次数设定为10 000~20 000次。在此范围内,系统噪声水平稳定于 3.19×10^{-4} ,SNR提升约13.5 dB,对应的最小温度响应时间为1 s。

本文采用双路解调法(Anti-Stokes/Stokes光强比值法)以消除光纤传输损耗对测温的影响。图5为归一化光强度比值(经标准化处理)随传输距离和温度的变化关系。



(a) 归一化光强度比值与距离的关系



(b) 归一化光强度比值与温度的关系

图5 归一化光强度比值随距离、温度的变化关系

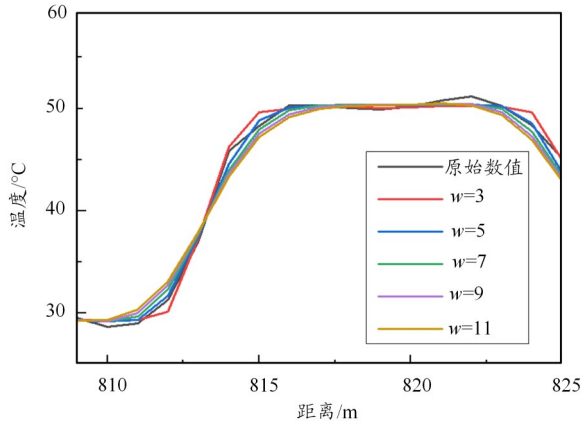
由图5(a)可知,置于恒温水浴中的光纤段,其归一化Anti-Stokes/Stokes光强度比值随温度升高呈现增大趋势。在传输距离780~805 m、830~850 m区间内,各温度下的标准化比值均接近1;而在805~830 m的恒温水浴区段,当温度从35 $^{\circ}\text{C}$ 升至75 $^{\circ}\text{C}$ 时,归一化比值从0.99线性上升至1.25。

由图5(b)可知,归一化光强度比值与温度呈良好线性关系,线性拟合决定系数 $R^2=0.995$ 。相较于传统的单路(Anti-Stokes或Stokes)解调法,双路解调法通过比值运算有效抵消了光纤传输损耗、光源波动等共模干扰,具有更优的线性度与对传输损耗的鲁棒性,更适用于高精度分布式温度传感应用。

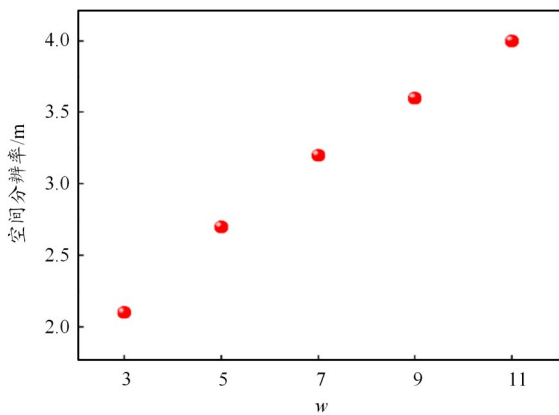
3.2 NLM算法参数优化

本文以恒温水浴中 50 °C 恒温段的温度分布信号为降噪对象, 通过调整 NLM 算法的邻域窗口尺寸, 优化系统温度传感性能, 结果如图 6 所示。

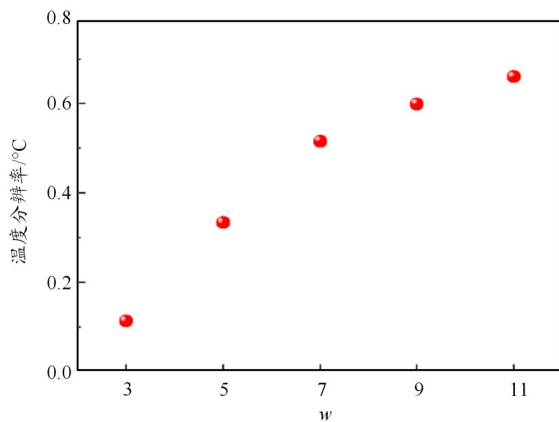
由图 6(a) 可知, 随着相似度窗口(搜索窗口)宽度 w 的增加, 温度测量曲线的平滑度逐渐提升, 高频噪声



(a) 不同邻域相似窗口宽度 w 下的温度分布



(b) 空间分辨率与相似窗口宽度 w 之间的变化关系



(c) 温度分辨率与相似窗口宽度 w 之间的变化关系

图6 不同邻域相似窗下非局部均值滤波去噪后的温度测量结果

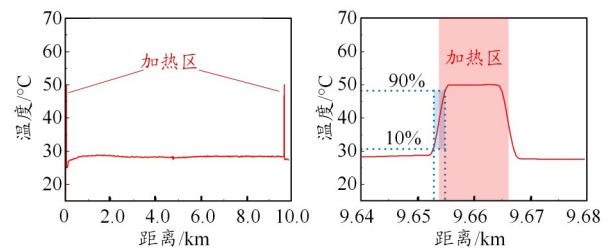
抑制效果增强。本文采用温度响应曲线上升沿 10%~90% 区间所对应的空间距离定义空间分辨率, 其与相似度窗口宽度 w 的关系如图 6(b) 所示。可以看出, 随着 w 增大, 空间分辨率由 2.1 m 劣化至 4.0 m。图 6(c) 展示了温度分辨率(以恒温段温度测量标准差表征)与相似度窗口宽度 w 的关系。随着相似度窗口宽度 w 增大, 恒温水浴段的温度分辨率从 0.11 °C 降低至 0.66 °C, 即测温精度有所下降。

综合空间分辨率与温度分辨率的权衡分析, 本文将相似度窗口宽度 w 的尺寸优化设定为 3。

3.3 远距离温度传感性能

实验采用总长度为 9.68 km 的渐变折射率多模传感光纤, 在距离起始端 30 m 与 9.66 km 处, 分别设置长度为 25 m 和 15 m 的光纤环, 并将其置于 50 °C 恒温水浴中作为温度参考段; 其余光纤段置于室温环境中。

图 7 为沿光纤分布的温度测量结果。经过对解调的温度进行分析, 结果表明: 处于恒温水浴中的光纤段解调温度与设定值(50 °C)吻合良好, 在光纤末端 9.66 km 处, 系统空间分辨率为 2.5 m (在温度从常温至高温的过渡区域以 10%~90% 的温度变化为空间分辨率); 相较于近端 0.81 km 处的最优空间分辨率(2.1 m), 远端分辨率劣化了 0.4 m, 表明长距离传输对空间定位精度存在轻微影响。



(a) 9.68 km 空间范围

(b) 位于 9.66 km 处加热区

温度场分布

内光纤温度分布

图7 非局部均值滤波算法处理后全光纤范围温度分布

为进一步验证 NLM 算法在远距离动态测温过程中的降噪性能, 本文开展了变温实验: 将水浴温度从 30 °C 线性升至 90 °C, 升温过程中连续采集温度数据, 总时长为 60 min, 期间设置 3 个恒温平台以评估稳态精度。图 8 为恒温水浴段传感光纤的 60 min 连续测温曲线对比。从图 8(a) 可以看出, 在 20~40 min 的恒温阶段, 经 NLM 算法处理后的温度曲线比原始数据(解调结果)波动明显减小。基于该段数据计算其测量标准差(作为解调精度的量化指标), 结果显示标准差由降噪前的 0.68 °C 降低至 0.11 °C, 表明 SNR 得到显著提

田翔, 张伟, 张峰, 等: 基于NLM的喇曼光时域反射温度降噪方法

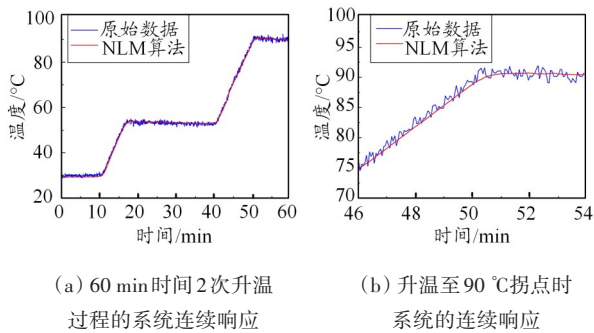


图8 水浴温度从30℃升温至90℃时系统的连续响应

升。从图8(b)可以看出,在46~54 min的升温过程中,通过对比降噪前后曲线的拐点位置并分析其动态重合度,可得算法处理后的响应时间与原始数据基本一致。上述分析表明,NLM算法在有效抑制噪声的同时,未引入明显的相位延迟或动态响应迟滞,可满足动态温度场下的实时、高精度测温需求。

3.4 与传统方法对比

为评估系统的长期稳定性,本文对比了传统小波阈值去噪算法与NLM算法在长距离测温中的性能。图9为位于9.68 km处的传感光纤在80℃恒温水浴中连续工作2 h的温度解调结果。

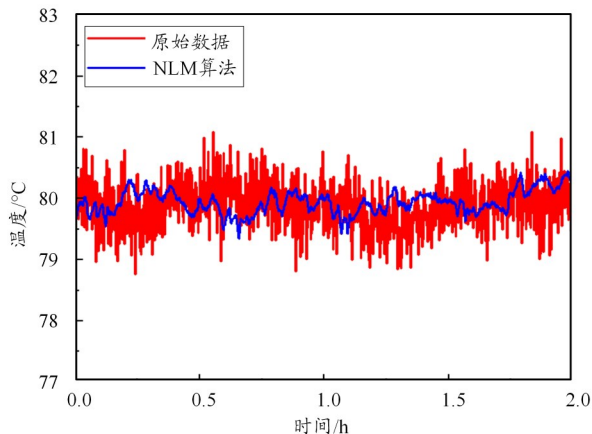


图9 在距离9.68 km处80℃恒温水浴中连续2 h测试稳定性

从图9可知,在80℃高温条件下,经NLM算法处理后,温度解调结果的长期波动范围从1.40℃降低至0.55℃,噪声抑制效果显著。此外,在长时间高温试验过程中,分布式温度传感器的测温曲线未出现基线漂移或精度下降现象,表明系统具有良好的热稳定性。

实验结果证明,基于NLM算法的解调方案在保持高测温精度的同时,能够有效抑制长时运行中的噪声累积,满足远距离分布式温度传感系统对长期稳定性的要求。

4 结束语

本文提出了一种基于NLM的R-OTDR温度降噪方法,在不改变R-OTDR系统的情况下,通过利用一维温度数据之间高度的相似性和冗余性降低温度噪声。实验中,优化平均次数为20 000次时,信号SNR提升约13.5 dB。在9.68 km的远距离测温过程中,与传统的温度解调方法相比,NLM算法解调精度从0.68℃提升至0.11℃,保持了类似的响应速度,在温度80℃时波动性从1.4℃下降到0.55℃,同时空间分辨率可以保持2.5 m。此降噪方法有效提高了光纤RDTS系统的温度探测性能,在能源开发油气勘探井下温度剖面当中有望有进一步应用。

参考文献:

- [1] 张旭萃, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 3-65.
- [2] 介瑞敏, 肖春, 刘旭, 等. 喇曼分布式光纤温度传感: 技术发展与应用综述[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 222-247.
- [3] Bos J, Klein J, Froggatt M, et al. Fiber optic strain, temperature and shape sensing via OFDR for ground, air and space applications[C]. California San Diego, California: SPIE, 2013: 887614.
- [4] 史开源. 水平井生产剖面解释方法研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
- [5] 李海涛, 罗红文, 向雨行, 等. DTS/DAS技术在水平井压裂监测中的应用现状及展望[J]. 新疆石油天然气, 2021, 17(4): 62-73.
- [6] 吴木旺, 郑永建, 隆腾屹, 等. 基于分布式光纤温度监测的气井产出剖面解释——以中国南海永乐区多层合采探井为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2245-2251.
- [7] 邹剑, 万芬, 王秋霞, 等. 光纤DTS监测在海上油田热采井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(2): 247-252.
- [8] 刘大卫. 基于分布式光纤传感技术的天然气管道泄漏监测研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [9] 廖鑫羽. 基于分布式光纤测温系统的油罐监测技术研究[J]. 石油化工自动化, 2019, 55(2): 11-13.
- [10] 韦展彪. 基于分布式光纤传感的自来水管泄漏检测系统的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [11] 闫宝强. 面向隧道火灾监测的高精度可视化分布式光纤喇曼温度传感技术[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [12] Sharma J, Santos O, Ogunsanwo O, et al. Fiber-optic DAS and DTS for monitoring riser gas migration[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2023, 220: 111157.
- [13] Ukil A, Braendle H, Krippner P. Distributed temperature sensing: review of technology and applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 885-892.
- [14] 苟恰, 郭清华. 分布式光纤测温系统温度与定位补偿算法研究[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(4): 83-86, 98.
- [15] 毛燕婷, 代志勇, 张晓霞, 等. 脉冲编码光时域反射计技术[J]. 激光杂志, 2013, 34(5): 42-43.

- [16] 王焱, 江毅, 马维一. 分布式光纤喇曼测温系统中解调算法的优化[J]. 光学技术, 2018, 44(6): 646-650.
- [17] 程碧钊, 王东, 王宇, 等. 提升R-OTDR系统实时性能方法研究[J]. 光学技术, 2019, 45(6): 701-706.
- [18] Soto M A, Signorini A, Nannipieri T, et al. Impact of loss variations on double-ended distributed temperature sensors based on Raman anti-Stokes signal only[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1215-1222.
- [19] 冯玉祥, 刘志凯, 黄闽南, 等. 单光路喇曼分布式光纤测温系统[J]. 光学精密工程. 2024, 32(17): 2645-2653.
- [20] Chen Y, Ramos R T, Hartog A H, et al. Accurate single-ended distributed temperature sensing[C]//SPE. Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE, 2008: 116655.
- [21] Soto M A, Sahu P K, Faralli S, et al. Distributed temperature sensor system based on Raman scattering using correlation-codes[J]. Electronics Letters. 2007, 43(16): 862-864.
- [22] Saxena M K, Raju S D V S, Arya R, et al. Raman optical fiber distributed temperature sensor using wavelet transform based simplified signal processing of Raman backscattered signals[J]. Optics and Laser Technology, 2015, 65: 14-24.
- [23] Saxena M K, Raju S D V S, Arya R, et al. Optical fiber distributed temperature sensor using short term Fourier transform based simplified signal processing of Raman signals[J]. Measurement, 2014, 47(1): 345-355.
- [24] Brinatti Vazquez G D, Martinez O E, Kunik D. Distributed temperature sensing using cyclic pseudorandom sequences[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1686-1691.
- [25] Li Jian, Zhang Qian, Xu Yang, et al. High-accuracy distributed temperature measurement using difference sensitive-temperature compensation for Raman-based optical fiber sensing[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36183-36196.
- [26] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 10870.
- [27] 张倩, 王涛, 赵婕茹, 等. 基于局部均值分解的布里渊光时域分析传感系统降噪算法[J]. 光学学报. 2021, 41(13): 78-86.
- [28] 许扬, 李健, 张明江. 喇曼分布式光纤温度传感仪的研究进展[J]. 应用科学学报. 2021, 39(5): 713-732.
- [29] Wu Minfeng, Chen Yunfei, Zhu Peibin, et al. NLM parameter optimization for ϕ -OTDR signal[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(17): 6045-6051.