

文章编号 1004-924X(2024)17-2645-09

单光路拉曼分布式光纤测温系统

冯玉祥, 刘志凯, 黄闽南, 王一山, 吕立冬*

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要:针对常规拉曼分布式光纤测温系统中,拉曼 Stokes 和 anti-Stokes 散射光的走离效应导致位置校正困难,测温严重失真的问题,提出了基于单光路的拉曼分布式测温系统方案,建立散射光功率校正模型和温度标定算法,实现对被测光纤沿线温度的精确测量。根据拉曼散射光温度敏感原理,推导基于单路 Stokes 光及单路 anti-Stokes 光的温度解调公式。考虑到单光路温度解调严重受限于脉冲激光器和光电探测器稳定性的问题,设计温度标定单元并建立了信号光功率校正算法。搭建实验平台,对比分析传统双路、单路 Stokes 光及单路 anti-Stokes 光方案的测温性能。最后,讨论并总结基于单光路拉曼分布式光纤测温系统的优选方案。实验结果表明:在约 12 km 的光纤线路上,基于拉曼 anti-Stokes 光的方案的测温偏差为 $-0.3\sim 2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,均方根误差为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,空间分辨率为 6 m,与传统方案相比性能更优。基于信号功率校正的单光路拉曼 anti-Stokes 光的分布式光纤测温系统灵敏度高,能完全规避传统双光路系统的走离校正问题,具备很高的实用价值。

关键词: 光纤传感;拉曼散射;测温;光时域反射;分布式

中图分类号: TN216; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243217.2645

Single optical channel based Raman distributed optical fiber temperature measurement system

FENG Yuxiang, LIU Zhikai, HUANG Minnan, WANG Yishan, LYU Lidong*

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology,
Maanshan 243002, China)

* Corresponding author, E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn

Abstract: To address the issue of position correction and temperature distortion caused by walk-off effects in conventional Raman distributed optical fiber temperature measurement systems, a new single optical channel scheme is proposed. This scheme incorporates a model for scattered light power correction and a temperature calibration algorithm to ensure accurate temperature measurement along the fiber. First, temperature demodulation formulas for single Raman Stokes and anti-Stokes light are derived based on the temperature sensitivity principle of Raman scattering. Since temperature demodulation via a single optical channel is hindered by the stability of pulse lasers and photodetectors, a temperature calibration unit and signal power correction algorithm are developed. An experimental platform was then built to compare the temperature measurement performance of traditional dual-channel systems with single channel Raman Stokes and Raman anti-Stokes schemes. Experiments on a 12 km fiber demonstrated that the scheme using

收稿日期:2024-05-22;修订日期:2024-07-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51977001)

Raman anti-Stokes light achieves a temperature deviation of $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, with a root mean square error of $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a spatial resolution of 6 m , showing superior performance over traditional systems. This single channel system with signal power correction offers high sensitivity and eliminates the walk-off correction issue inherent in dual-channel systems, proving its practical value.

Key words: optical fiber sensor; Raman scattering; temperature measurement; optical time domain reflecting; distributed

1 引言

光纤具有无源、轻质、抗电磁干扰、柔韧性好、耐恶劣环境等特点,在传感领域备受关注。光脉冲在光纤中传输产生的自发拉曼散射光只对温度敏感,结合光时域反射技术,可准确测量光纤沿线各位置处的温度信息^[1-3]。目前,拉曼分布式光纤测温设备非常成熟,并在建筑火灾预警、电缆热点监测、变压器绕组测温等领域得到了广泛的应用。相比于光纤布里渊散射型分布式光纤传感器,其结构简单,对信号提取与处理模块要求不高,并且可以避免布里渊散射传感面临的温度和应变参量分离的难题^[4-6]。与光纤光栅传感相比,它的监测几乎无盲区覆盖整条光纤沿线,而后者则需在特定的位置单独布置光纤光栅,串接或并接的光纤光栅数量极为有限^[7]。此外,光纤光学干涉式温度传感器,如法布里-珀罗、萨格奈克干涉型或二者融合的干涉式传感器^[8],虽具有极高的温度灵敏度,但只能监测固定设置位置的对象,为点式传感,监测覆盖范围小。

近年来,对拉曼分布式光纤测温系统的研究朝长距离、高空间分辨率、高精度以及与其他传感机理融合等方向发展。单工循环编码解码法^[9]、Simplex 编码法^[7]等用于提高系统的测量距离,信号分段重构法^[10]用于提升测温的空间分辨率,误差修正法^[11]和动态校正法^[12]用于提高测温精度,拉曼散射测温机理与瑞利散射测振机理融合形成联合监测装置^[13-15]。然而,目前的拉曼分布式光纤测温系统主要采用拉曼 Stokes 散射光和 anti-Stokes 散射光结合的双路温度感知与解调方案,拉曼 Stokes 散射光和 anti-Stokes 散射光的波长相差近 200 nm ,导致光在被测光纤中传输的速率不同,进而产生走离效应。也就是说,对应相同长度的被测光纤,系统中的数据采集卡采集到的数据点不一样,导致拉曼 Stokes 光和 anti-

Stokes 光的时序数据点对应在光纤上的位置不同。根据距离一致的原则,通常通过数据拟合算法在相应位置补充数据点,使拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的数据时序(位置)对齐,从而进行温度解调并保证一定的测温精度^[16]。然而,拟合产生的数据点,毕竟不是真实的被测光纤沿线某具体位置的拉曼散射光的功率信息,在系统分辨率高的情况下,由于位置的偏移,测温误差可能很大^[11]。与双路测温方案相比,单光路拉曼分布式光纤测温方案有利于多光谱传感融合与集成,如将闲置的拉曼 Stokes 光用于光纤氢损测量及定位,监测通信光缆老化情况或氢泄漏^[17-18]。

本文研究基于单光路拉曼分布式光纤测温系统,从机理上避开传统双光路的拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光联合感知与解调方案的走离校正问题,基于温度敏感方程推导单路拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的温度解调公式,建立相应算法模型,同时考虑单路解调算法中,信号功率的不稳定因素对测温精度的影响,设计了温度标定单元,提出信号功率校正算法,从而保证测温精度。

2 原理

2.1 传统的双光路温度感知与解调原理

拉曼分布式光纤测温系统基于光纤中拉曼散射光的温度敏感原理,结合标定温度数据解调光纤沿线各位置处的温度信息。光脉冲在被测光纤中的拉曼 Stokes 散射光和 anti-Stokes 散射光的时域散射功率描述如下:

$$P_s(L, T) = P_0 K_s S v_s^4 R_s(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L], \quad (1)$$

$$P_a(L, T) = P_0 K_a S v_a^4 R_a(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L], \quad (2)$$

其中: $P_s(L, T)$ 和 $P_a(L, T)$ 对应温度为 T 时光纤

沿线任意位置 L 处的拉曼 Stokes 散射光和 anti-Stokes 散射光的功率, P_0 为激光脉冲功率相关因子, K_s 和 K_a 分别为拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的截面散射系数, S 为背向散射功率捕获因子, ν_s 和 ν_a 分别为拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的频率, $\alpha_0, \alpha_s, \alpha_a$ 分别为入射光、拉曼 Stokes 光、拉曼 anti-Stokes 光对应的光纤衰减系数, $R_s(T)$ 和 $R_a(T)$ 分别为温度 T 下拉曼 Stokes 光、拉曼 anti-Stokes 光的温度敏感函数, 表示为:

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

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

其中: h 为普朗克常量, $\Delta\nu$ 为光谱带宽 (约 13.2 THz); k_B 是玻尔兹曼常数。由式(1)和式(2)可知, 在标定温度 T_0 下, 光纤中的 Stokes 光和 anti-Stokes 光的时域散射信号功率分别为:

$$P_s(L, T_0) = P_0 K_s S \nu_s^4 R_s(T_0) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L], \quad (5)$$

$$P_a(L, T_0) = P_0 K_a S \nu_a^4 R_a(T_0) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L]. \quad (6)$$

为解调被测光纤沿线不同位置 L 对应的温度 T , 利用式(1)、式(2)、式(5)和式(6)可以得到:

$$\frac{P_a(L, T)/P_s(L, T)}{P_a(L, T_0)/P_s(L, T_0)} = \exp\left[-\frac{h\Delta\nu}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]. \quad (7)$$

由式(7)可得温度解调结果, 即:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \ln \left[\frac{P_a(L, T)/P_s(L, T)}{P_a(L, T_0)/P_s(L, T_0)} \right]. \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 双路(拉曼 Stokes 光、拉曼 anti-Stokes 光)的解调必然要求数据采集卡得到的拉曼 Stokes 光功率和拉曼 anti-Stokes 光功率(电压)对应相同的位置 L , 即式(8)中的位置信息应严格对齐。然而, 拉曼 Stokes 光和拉曼 anti-Stokes 光的波长相差约 200 nm, 使得二者对应的光纤折射率不同, 二者在被测光纤中的光速不同, 从而产生走离效应。因此, 利用式(8)进行光纤沿线的温度解调, 必须先进行位置的走离校正, 对齐位置后再解调温度信息。走离校正需要通过数据插值的方式增加或减少数据

点(位置点)数^[12], 所以插值方法得到的拉曼 Stokes 光或拉曼 anti-Stokes 光的功率信息并非真实的信息, 测温误差难以避免。若温度事件刚好发生在插值位置处, 则导致的测温偏差较大。

2.2 单路拉曼 Stokes 散射光测温原理

在实际测量中, 单光路解调待测光纤区域的温度以及脉冲激光器输出的脉冲功率可能随时发生变化, 于是式(1)可以改写成式(9):

$$P_s(L, T) = P'_0 K_s S \nu_s^4 R_s(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L], \quad (9)$$

其中: $P'_0 = RP_0$, $R = R_L \cdot G_{PD}$ 为一个变化系数, 表示脉冲激光器功率相对于标定曲线数据对应的脉冲功率变化比 R_L 及光电探测器增益的变化比 G_{PD} 的乘积。在式(8)的双路解调算法中, 待测的拉曼 Stokes 和 anti-Stokes 散射光功率相除, 可以完全抵消 R 。然而, 单光路解调明显不具备这种稳定性。于是, 本文在系统中设计了一个温度标定单元, 用于校正该变化系数 R , 以确保系统的稳定性。温度标定单元包含一段被测光纤和一个温度传感器, 选择被测光纤位置 L_c 处, 并由温度传感器获得其温度为 T_c 。由于温度传感器提供温度数据 T_0 和 T_c , 用于温度标定和数据校正, 其精度对系统性能至关重要, 所以实验中选择工业中最常用的 PT100, 其精度高达 0.1 °C。由式(1)和式(5)可得:

$$\frac{P_s(L_c, T_c)}{P_s(L_c, T_0)} = \frac{P'_0 R_s(T_c)}{P'_0 R_s(T_0)} = R \frac{1 - \exp(-h\Delta\nu/k_B T_0)}{1 - \exp(-h\Delta\nu/k_B T_c)}. \quad (10)$$

由此计算出变化系数:

$$R = \frac{P_s(L_c, T_c)}{P_s(L_c, T_0)} \cdot \frac{1 - \exp(-h\Delta\nu/k_B T_c)}{1 - \exp(-h\Delta\nu/k_B T_0)}. \quad (11)$$

这样, 由式(5)和式(9)可得温度解调公式:

$$\frac{P_s(L, T)}{P_s(L, T_0)} = R \cdot \frac{1 - \exp(-h\Delta\nu/k_B T_0)}{1 - \exp(-h\Delta\nu/k_B T)} \quad (12)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu} \ln \left\{ 1 - R \cdot \frac{P_s(L, T_0)}{P_s(L, T)} \left[1 - \exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{k_B T_0}\right) \right] \right\}. \quad (13)$$

2.3 单路拉曼 anti-Stokes 散射光测温原理

单路拉曼 anti-Stokes 散射光测温公式的推导与 Stokes 光测温公式类似。首先,获得温度标定数据 $P_a(L, T_0)$,而后,考虑到光纤沿线待测温度及系统发出的激光脉冲功率可能发生改变,根据式(6),待测的拉曼 anti-Stokes 散射光功率可改写为:

$$P_a(L, T) = P'_0 K_a S v_a^4 R_a(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L]. \quad (14)$$

温度标定单元中光纤位置 L_c 处,由温度传感器获得其温度为 T_c ,于是,由式(2)和式(6)得:

$$\frac{P_a(L_c, T_c)}{P_a(L_c, T_0)} = R \frac{R_a(T_c)}{R_a(T_0)} = R \cdot \frac{\exp(h\Delta v/k_B T_0) - 1}{\exp(h\Delta v/k_B T_c) - 1}, \quad (15)$$

$$R = \frac{P_a(L_c, T_c)}{P_a(L_c, T_0)} \cdot \frac{\exp(h\Delta v/k_B T_c) - 1}{\exp(h\Delta v/k_B T_0) - 1}. \quad (16)$$

然后,由式(6)和式(14)可得:

$$\frac{P_a(L, T)}{P_a(L, T_0)} = R \cdot \frac{R_a(T)}{R_a(T_0)} = R \cdot \frac{\exp(h\Delta v/k_B T_0) - 1}{\exp(h\Delta v/k_B T) - 1}. \quad (17)$$

由式(17)可解调出光纤沿线任意位置 L 处的温度信息:

$$\frac{1}{T} = \frac{k_B}{h\Delta v} \cdot \ln \left\{ \frac{R \cdot P_a(L, T_0)}{P_a(L, T)} [\exp(h\Delta v/k_B T_0) - 1] + 1 \right\}. \quad (18)$$

由上述温度解调公式可以看出,传统的双路温度解调算法,能直接抵消脉冲激光器输出功率及光电探测器增益变化的影响,具有较好的稳定性。但是,拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光的走离效应,使得采集卡得到数据的位置信息出现偏移,必须进行位置的走离校正。而基于单路拉曼 Stokes 光或 anti-Stokes 光的测温方案极易受脉冲激光器输出功率及光电探测器增益变化的影响,因此,必须设置温度标定单元,剔除标定位置处温度变化对散射功率变化的影响,从而得到变化系数 R ,以校正数据。

3 实验系统搭建及结果讨论

3.1 实验系统

实验系统如图 1 所示。计算机(PC)控制数据采集卡(DAQ)发出电脉冲触发脉冲激光器(PL)产生光脉冲,同时 DAQ 开始采集数据,PL 输出的激光波长为 1 550.12 nm,脉冲宽度为 60 ns,脉冲峰值功率为 33.0 dBm,脉冲重复率为 6 kHz。光脉冲进入波分复用器的 1 550 nm 端口,然后经 WDM 的公共端进入被测光纤,被测光纤选用多模光纤(MMF: OM1, 62.5/125 类型),长度约为 12 km。光脉冲在被测光纤中产生的背向拉曼 Stokes 和 anti-Stokes 散射光返回,经 WDM 的公共端时分别由 WDM 的 1 660 nm 端和 1 450 nm 端分离,再分别由两个雪崩光电探测器(APD1 和 APD2)转换成电压信号。数据采集卡采集这两路电压信号,用于后续温度解调。标定单元由温度传感器 PT100 和一圈直径约为 10 cm、长约 100 m 的光纤组成,雪崩光电探测器的带宽为 100 MHz,数据采集卡的采样率为 100 Ms/s。

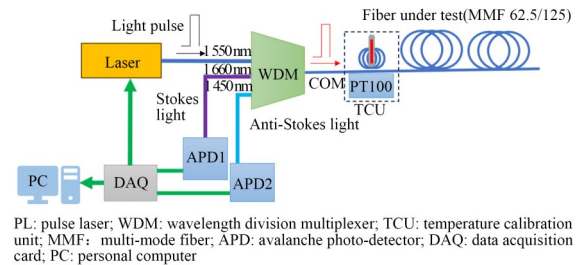


图 1 拉曼分布式光纤测温实验系统原理
Fig. 1 Schematic diagram of Raman distributed fiber temperature sensing experimental system

3.2 传统双路解调

数据采集卡的两个通道分别采集拉曼 Stokes 和 anti-Stokes 散射光的时域功率(电压)数据,每个通道输出的数据均是 50 000 次脉冲周期对应的数据均值。由于拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光波长相差约 200 nm,走离效应无法避免,如图 2 所示。

图 2(a)显示了走离校正前,拉曼 Stokes 光和 anti-Stokes 光对应的光纤末端反射峰错位的情况,从中可以看出,偏差为 5 个数据点。采用走离

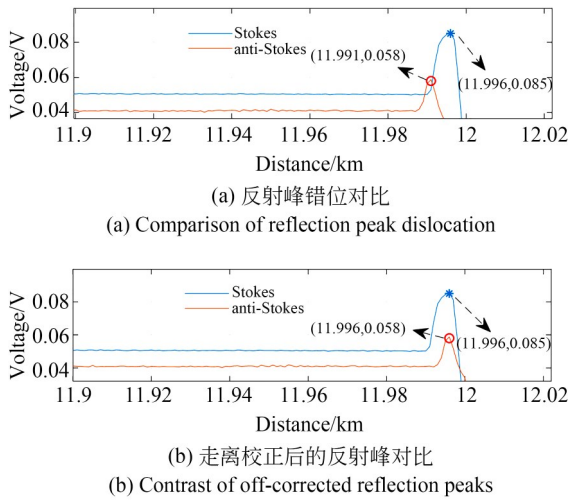


图 2 菲涅尔反射峰
Fig. 2 Fresnel reflection peaks

校正算法将各个数据点的位置对齐,具体包括:
(1)根据拉曼 Stokes 光和拉曼 anti-Stokes 光分别对应的光纤全程的数据点数之差,确定在后者对应的数据中插入的数据点数;(2)根据均匀插点的原则,确定在拉曼 anti-Stokes 光对应的数据中插点的位置,再将该位置前后两位置点对应的数据取均值,并作为该插入位置的数据值。走离校正效果如图 2(b)所示。由于走离校正算法补偿的数据点的值并非真实值,因此,理论上数据失真无法规避。

实验中,为了获取标定数据,被测光纤置于室温环境,采集得到标定数据 $P_s(L, T_0)$ 和 $P_a(L, T_0)$ 。室温为 $26.0\text{ }^\circ\text{C}$,即对应 T_0 为 299.15 K 。然后,将被测光纤末端约 45 m 的光纤放入恒温水槽中,将恒温水槽的水温从 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 加热至 $95\text{ }^\circ\text{C}$,温度间隔设置为 $10\text{ }^\circ\text{C}$,并获取相应的时域拉曼散射光功率数据。从图 3 可以看出,随着水温的升高,被测光纤的加热区域对应的拉曼 Stokes 和 anti-Stokes 散射光的功率不断增加。于是,根据相应的温度解调公式可以解调出被测光纤沿线的温度信息。

在传统的双路感知与温度解调方案中,先将 Stokes 光和 anti-Stokes 光对应的时域曲线进行走离校正,然后利用式(8)解调温度信息,结果如图 4 所示,具体数据如表 1 所示。

表 1 给出了被测光纤加热区设定的水温数据

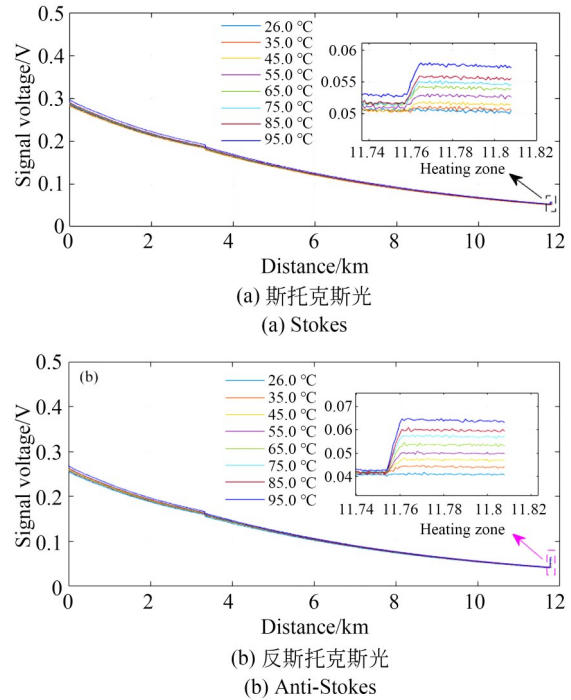


图 3 时域拉曼散射功率曲线
Fig. 3 Time domain Raman scattering power traces

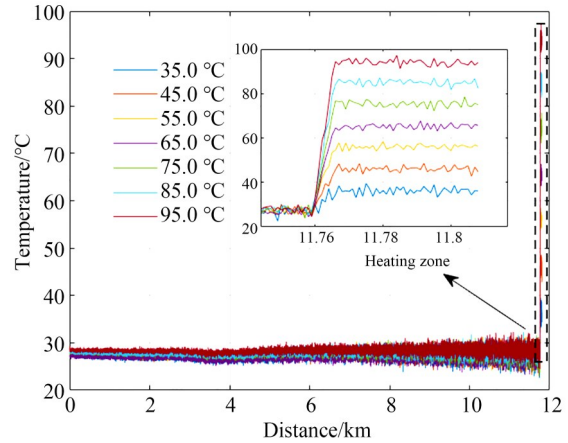


图 4 传统的双路测温方案的温度解调结果
Fig. 4 Results of temperature demodulation by traditional dual-channel based scheme

与实验系统测得的温度数据的对比,实验系统测得的数据为加热区域各位置温度数据的均值。结果表明,测温偏差在 $-0.9\sim+1.2\text{ }^\circ\text{C}$,温度测量范围的均方根误差为 $0.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。传统的双路测温方案具有很好的稳定性,只是走离校正及校正位置处的散射光功率需要进行插值计算,数据并非实际值,所以,该方法在理论上存在瑕疵,可能引起结果失真。

表 1 温度数据对比

Tab. 1 Contrast of temperature data (°C)

实际温度	测得温度	误差
35.0	36.2	+1.2
45.0	46.1	+1.1
55.0	56.1	+1.1
65.0	65.3	+0.3
75.0	75.3	+0.3
85.0	85.0	0.0
95.0	94.1	-0.9

3.3 单路拉曼 Stokes 散射光解调

基于图 3(a)中的时域拉曼 Stokes 散射光功率数据,利用温度标定算法计算变化系数 R ,校正各曲线对应的数据。然后,再结合式(13)得到光纤沿线各位置的温度数据,如图 5 所示,温度信息如表 2 所示。

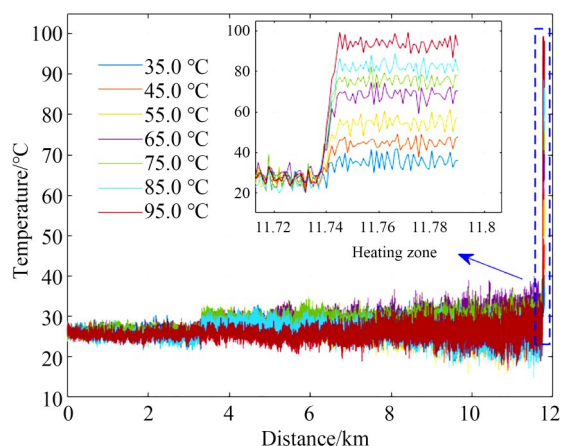


图 5 拉曼 Stokes 散射光数据对应的加热区的温度信息
Fig. 5 Temperature information within heating zone by Raman Stokes scattering data

表 2 拉曼 Stokes 散射光解调的温度数据对比

Tab. 2 Contrast of temperature data demodulated by Raman Stokes scattering light

实际温度/°C	变化系数 R	测得温度/°C	误差/°C
35.0	0.994 9	35.7	+0.7
45.0	0.997 9	44.5	-0.6
55.0	1.007 7	54.6	-0.4
65.0	1.013 0	68.3	+3.3
75.0	1.017 6	75.5	+0.5
85.0	1.024 3	82.1	-2.9
95.0	1.014 4	93.2	-1.8

从表 2 可以看出,加热区的温度从 35~95 °C,测温偏差为-2.9~+3.3 °C,均方根误差为 1.8 °C。测温误差偏大是拉曼 Stokes 散射光灵敏度偏低,信号不稳定造成的。

3.4 单路拉曼 anti-Stokes 散射光解调

基于图 3(b)中的时域拉曼 anti-Stokes 散射光功率数据,利用温度标定算法计算变化系数 R ,校正各曲线对应的数据。然后,再结合式(18)得到的光纤沿线各位置的温度数据,如图 6 所示,温度信息如表 3 所示。

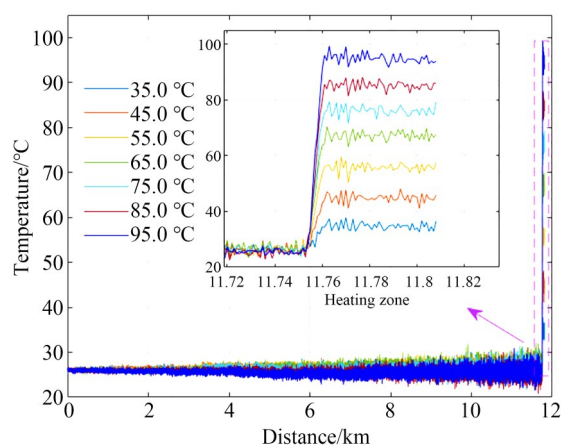


图 6 拉曼 anti-Stokes 散射光数据对应的加热区的温度信息

Fig. 6 Temperature information within heating zone by Raman anti-Stokes scattering data

表 3 Anti-Stokes 散射光解调的温度数据对比

Tab. 3 Contrast of temperature data demodulated by anti-stokes scattering light

实际温度/°C	比值 R	测得温度/°C	误差/°C
35.0	1.017 4	34.7	-0.3
45.0	1.018 8	44.8	-0.2
55.0	1.010 3	55.8	+0.8
65.0	1.015 0	67.2	+2.2
75.0	1.032 1	76.1	+1.1
85.0	1.029 4	85.1	+0.1
95.0	1.050 2	94.7	-0.3

由图 4~图 6 可以看出,在非加热区,随着光纤距离的增加,信噪比逐渐变差,导致传感精度降低。传感距离、传感精度严重依赖系统的信噪比,而信噪比受光脉冲的峰值功率、光电探测器噪声功率、脉冲宽度和数据平均次数等影响,在

工程应用中需要根据实际情况对这些因素加以权衡。从表 3 可以看出,加热区的温度从 35~95 °C,测温偏差为 -0.3~+2.2 °C,通过数据计算得出均方根误差为 1.0 °C。通过数据对比发现,测量温度相对实际温度呈现出整体偏高的走势,偏低的温度数据偏差较少,偏高的温度数据偏差大。加热温度在 55 °C 以下,测得的温度都低于实际值;而加热温度在 55 °C 以上,测得的温度出现正偏移,因此,可以通过二次温度修正进一步提高测温精度。经过重复性测试,该系统方案性能表现稳定,具备一定的推广价值。

3.5 空间分辨率分析

系统测温空间分辨率主要由光脉冲宽度决定。随着传感距离的增大,远端信号的信噪比不断降低,测量的空间分辨率也降低,对精细空间的温度测量有一定的影响。理论上,脉冲宽度为 60 ns,对应的空间分辨率为 6 m。测试中,将加温曲线上升区域中高度为 10%~90% 的区间对应的距离定义为空间分辨率。从常温段 26~95 °C 加温段的上升区间对应的空间分辨率如图 7 所示,空间分辨率为 6 m,与理论相符。

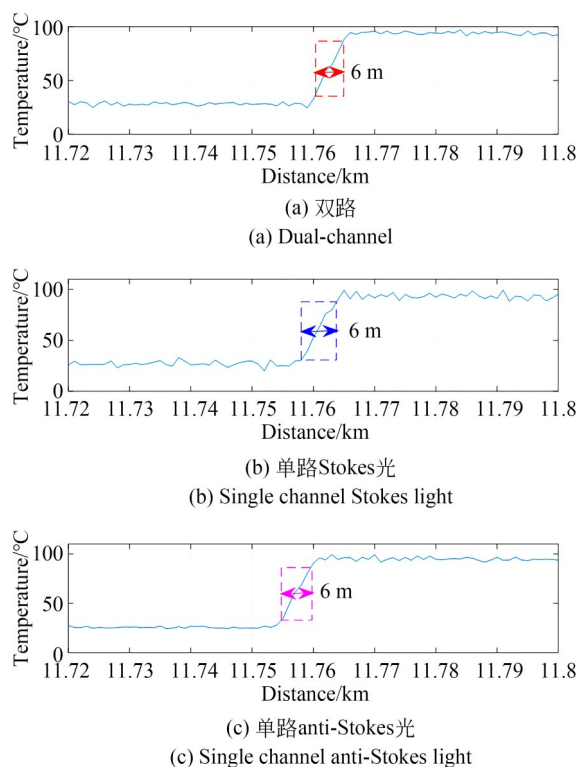


图 7 空间分辨率分析

Fig. 7 Spatial resolution analysis

4 结果讨论

通过推导双路解调温度与单路解调温度算法,基于本实验系统对 3 种方案进行了实验验证。针对脉冲激光器的脉冲不稳定和雪崩光电探测器的增益系数不稳定问题,在光纤前段设置标定单元,建立相应的散射功率校正算法,基于获取的拉曼反斯托克斯光的功率值和温度信息,校正拉曼散射光的功率数据,提高单光路测温方案的可靠性,提升了测温精度。单光路分布式光纤测温系统的测温精度虽然较传统的双路感知与解调系统在测温精度方面稍微逊色,但总体上依然具有较好的实用价值。特别是,它避开了双路温度解调原理中必须要纠正的走离效应,而走离校正算法补偿的数据点只能基于邻近位置点进行插值处理,数据失真无法规避。实验表明,基于拉曼 anti-Stokes 光的分布式光纤温度传感方案可进一步提升其测温精度;而且,该方案节省了一条信道及其对应的光电器件和数据模块,便于与瑞利散射谱、布里渊散射谱对应的传感机制融合,也可以利用闲置的拉曼 Stokes 光通道测量光纤氢损以评估线路老化情况或监测环境氩泄漏事件,发展新的联合传感系统。

5 结论

单光路拉曼分布式光纤测温系统源自于传统的双路拉曼 Stokes 光与拉曼 anti-Stokes 光联合感知与温度解调的机理,通过设置温度标定单元,建立温度标定及信号功率校正算法,可以从理论上克服单光路解调不稳定的问题。实验结果表明,在整个温度测量范围内,基于传统的双路、单路 Stokes 光、单路 anti-Stokes 光方案的测温均方根误差分别为 0.8, 1.8 和 1.0 °C,单光路测温方案具有实用价值。重要的是,单光路测温系统可以规避传统双路测温系统中存在的走离校正问题。总体上,虽然传统双路解调结果比单路精确一些,但两者效果很近似,都在允许误差范围内。单路 anti-Stokes 光拉曼分布式测温,可以节省一路测量通道及其对应的光电器件和数据模块,便于与其他散射机理的分布式传感功能融合,构建结构紧凑、低成本的联合监测系统。

参考文献:

- [1] FARAHANI M A, GOGOLLA T. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(8): 1379-1391.
- [2] KIKUCHI K, NAITO T, OKOSHI T. Measurement of Raman scattering in single-mode optical fiber by optical time-domain reflectometry [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(10): 1973-1975.
- [3] 王剑锋, 刘红林, 张淑琴, 等. 基于拉曼光谱散射的新型分布式光纤温度传感器及应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(4): 865-871.
WANG J F, LIU H L, ZHANG SH Q, *et al.* New type distributed optical fiber temperature sensor (DTS) based on Raman scattering and its' application [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(4): 865-871. (in Chinese)
- [4] HUANG L J, FAN X Y, HE H J, *et al.* Single-end hybrid Rayleigh Brillouin and Raman distributed fibre-optic sensing system [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4(3): 1.
- [5] WAIT P C, DE SOUZA K, NEWSON T P. A theoretical comparison of spontaneous Raman and Brillouin based fibre optic distributed temperature sensors [J]. *Optics Communications*, 1997, 144(1/2/3): 17-23.
- [6] SOTO M A, BOLOGNINI G, DI PASQUALE F. Optimization of long-range BOTDA sensors with high resolution using first-order bi-directional Raman amplification [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4444-4457.
- [7] SARKAR S, INUPAKUTIKA D, BANERJEE M, *et al.* Machine learning methods for discriminating strain and temperature effects on FBG-based sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(16): 876-879.
- [8] 高佳乐, 杨玉强, 牟小光, 等. 基于增强型游标效应的光纤温度传感器 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(24): 3531-3539.
GAO J L, YANG Y Q, MU X G, *et al.* Fiber-optic temperature sensor based on enhanced Vernier effect [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(24): 3531-3539. (in Chinese)
- [9] 余向东, 金尚忠, 张在宣, 等. 采用单工循环编码解码的分布式光纤喇曼温度传感器 [J]. *光子学报*, 2014, 43(7): 0706005.
YU X D, JIN SH ZH, ZHANG Z X, *et al.* A distributed optical fiber Raman temperature sensor with cyclic simplex coding [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(7): 0706005. (in Chinese)
- [10] 李硕, 王纪强, 高忠国, 等. 基于拉曼信号分段重构的分布式光纤测温空间分辨率提升研究 [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(10): 293-298.
LI SH, WANG J Q, GAO ZH G, *et al.* Research on spatial resolution improvement of distributed optical fiber temperature measurement based on Raman signal segmentation and reconstruction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(10): 293-298. (in Chinese)
- [11] 王青山, 王伟杰, 郭旭, 等. 分布式拉曼光纤温度传感器的误差修正方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 170602.
WANG Q SH, WANG W J, GUO X, *et al.* Error correction method for distributed fiber Raman temperature sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 170602. (in Chinese)
- [12] 孙苗, 杨爽, 汤玉泉, 等. 基于拉曼散射光动态校准的分布式光纤温度传感系统 [J]. *物理学报*, 2022, 71(20): 31-37.
SUN M, YANG S, TANG Y Q, *et al.* Distributed fiber optic temperature sensor based on dynamic calibration of Raman Stokes backscattering light intensity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(20): 31-37. (in Chinese)
- [13] LU L D, YONG M C, WANG Q S, *et al.* A hybrid distributed optical fiber vibration and temperature sensor based on optical Rayleigh and Raman scattering [J]. *Optics Communications*, 2023, 529: 129096.
- [14] DANG Y L, ZHAO Z Y, WANG X F, *et al.* Simultaneous distributed vibration and temperature sensing using multicore fiber [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 151818-151826.
- [15] ZHAO Z Y, DANG Y L, TANG M, *et al.* Enabling simultaneous DAS and DTS through space-division multiplexing based on multicore fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5707-5713.
- [16] 介瑞敏, 肖春, 刘旭, 等. 拉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.

- JIE R M, XIAO CH, LIU X, *et al.* Raman distributed optical fiber temperature sensing: review of technology and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(1): 222-247. (in Chinese)
- [17] 杨婷婷,赵彦,祁彦,等. 基于受激拉曼光谱的无标记分布式光纤氢传感器[J]. *光学快报*, 2019, 27(9):12869-12882.
- YANG F, ZHAO Y, QI Y, *et al.* Towards label-free distributed fiber hydrogen sensor with stimulated Raman spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12869-12882. (in Chinese)
- [18] CANGIALOSI C, GIRARD S, BOUKENTER A, *et al.* Effects of radiation and hydrogen-loading on the performances of Raman-distributed temperature fiber sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2432-2438.

作者简介:



冯玉祥(1998—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事分布式光纤传感技术及能源物联网方面的研究。E-mail:fyx08030912@163.com

通讯作者:



吕立冬(1982—),男,四川邻水人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感技术及其在电力行业方面的研究。E-mail:lvlidong@ahut.edu.cn