

面向分布式光纤拉曼测温的新型温度解调方法

张明江^{1,2}, 李健^{1,2}, 刘毅^{1,2}, 张建忠^{1,2}, 李云亭^{1,2}, 黄琦^{1,2}, 刘瑞霞^{1,2}, 杨帅军^{1,2}

¹新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西太原 030024;

²太原理工大学物理与光电工程学院光电工程研究所, 山西太原 030024

摘要 为提高分布式光纤拉曼测温系统的测量速度和测量准确度,提出了一种自补偿光纤损耗及光纤色散的温度解调方法,并进行了实验验证。该方法对斯托克斯与反斯托克斯后向散射信号进行了损耗修正,避免了测温前对整条传感光纤进行定标处理的过程,减小了系统的运行时间;采用色散补偿平移算法对斯托克斯后向散射信号的位置进行修正,获得了与反斯托克斯后向散射信号相同位置处的斯托克斯后向散射信号的强度,降低了光纤色散对温度解调的影响,提高了系统的测温准确度。实验结果表明,当光纤传感距离为 5.8 km 时,温度波动由 9.01 °C 下降到 0.57 °C,测温准确度由 5.50 °C 优化至 0.87 °C。

关键词 光通信; 分布式光纤传感; 拉曼测温; 光纤色散补偿; 光纤损耗

中图分类号 TN29; TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0306002

Temperature Demodulation Method for Distributed Fiber Raman Temperature Measurement

Zhang Mingjiang^{1,2}, Li Jian^{1,2}, Liu Yi^{1,2}, Zhang Jianzhong^{1,2}, Li Yunting^{1,2},
Huang Qi^{1,2}, Liu Ruixia^{1,2}, Yang Shuaijun^{1,2}

¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education,
Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract To improve the measuring speed and the measuring accuracy of the distributed fiber Raman temperature measurement system, a temperature demodulation method of self-compensation for fiber loss and fiber dispersion is proposed, and the experimental verification is carried out. The loss between Stokes backscattering signal and anti-Stokes backscattering signal is modified by the proposed method, the calibration processing for the entire sensing fiber before temperature measurement is avoided, and the system operating time is reduced. The dispersion compensation shift algorithm is applied to correct the position of the Stokes backscattering signal. The intensity of Stokes backscattering signal can be obtained at the same position of the anti-Stokes backscattering signal, which eliminates the influence of fiber dispersion on temperature demodulation and improves the accuracy of temperature measurement. The experimental results indicate that the temperature fluctuation is declined from 9.01 °C to 0.57 °C when the fiber sensing distance is 5.8 km, and the temperature accuracy is optimized from 5.50 °C to 0.87 °C.

Key words optical communications; distributed fiber sensing; Raman temperature measurement; fiber dispersion compensation; fiber loss

OCIS codes 060.2370; 060.2330; 060.4510

收稿日期: 2016-10-31; 收到修改稿日期: 2016-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(61377089)、山西省科技攻关项目(20140321003-1)、山西省青年科技研究基金面上青年基金(201601D021069)

作者简介: 张明江(1976—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事分布式光纤传感技术、超宽带雷达测距技术、半导体激光器非线性动力学特性及应用方面的研究。E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

1 引 言

分布式光纤拉曼测温系统是利用光纤中的自发拉曼散射效应和光时域反射技术^[1]实现的,是一种分布式、可实时测量空间温度场分布的新型传感测温技术。与传统的电子温度传感器相比,分布式光纤拉曼测温系统具有抗电磁干扰、耐高压、测量精度高、结构简单、灵敏度高等优点^[2-4],广泛应用于电力电缆、煤矿地下气化系统、石油化工等领域的温度监测^[5-9]。

在分布式光纤拉曼测温系统中,温度解调方法至关重要。目前,用于分布式光纤拉曼测温系统的温度解调方法有3种:1)利用反斯托克斯信号的功率进行自解调^[10-11];2)将瑞利光通道作为参考通道,利用反斯托克斯信号和瑞利信号的功率比值进行温度解调^[12];3)将斯托克斯信号通道作为参考通道,利用反斯托克斯信号和斯托克斯信号的功率比值进行温度解调^[13-16]。与方法1)、2)相比,方法3)解决了光源扰动和光纤异常损耗对测温结果的影响,同时也有利于对信号进行处理和得到探测系统的响应^[17]。然而,上述3种解调方法都无法完全消除光纤损耗和光纤色散对温度解调和测温准确度的影响。

在传统的解调算法中,将斯托克斯信号和反斯托克斯信号的衰减系数看作是相等的,因此使用这2种信号解调温度时会出现测量误差。为了消除这种由于信号衰减系数不同而造成的测温误差,一般需在测温前对整条传感光纤进行定标处理。常规的定标方法为:先将整条传感光纤放置在恒定的温度场 T_0 中进行定标^[18-20],采集散射信号功率基准数据 ϕ_{s0} 和 ϕ_{a0} ;然后将光纤重新铺入待测温度场中进行分布式温度测量;最后将散射信号功率基准数据以及测温阶段的斯托克斯信号的功率 ϕ_s 和反斯托克斯信号的功率 ϕ_a 代入解调算法中,解调得到温度信息。这种定标方法不仅可以消除斯托克斯信号和反斯托克斯信号由于信号衰减系数的不同而造成的测温误差,还可以消除光纤中的一些固有参数对测温结果的影响。但是,当更换系统中任一器件或调整激光器功率时均需重新定标,因此传感光纤的使用灵活性较差。Soto等^[21]将传感光纤设计成一个环路装置,用光开关控制其脉冲输入方向,以消除光纤损耗并解调温度信息,但是该装置结构复杂,且同样的传感距离需要较长的传感光纤。

根据光纤的色散效应,斯托克斯信号与反斯托克斯信号的波长不同时,其在光纤中的传播速度也不同,因此同一位置散射回来的2种后向散射信号到达光电探测器的时间不同,导致数据采集卡采集到的两路信号并非来自同一位置。该信号错位现象会引入测量误差,且传感距离越长测量误差越大,最终导致测温结果产生误差。为了降低光纤色散对测温精度的影响,传统方法是在测温区域加入不同长度的匹配光纤,使两路通道传输时间保持一致,消除了因两路信号的速度不同而造成的位置误差;但该方法只能对某一具体长度进行补偿,而由色散引起两路信号的时间差是处处存在的,因此该方法具有一定的局限性。Wang等^[22]利用光速修正来消除光纤色散,将系统在7 km传感光纤上的测温精度范围从 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内提高至 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内;但该方法需要在测温前测量传感光纤的折射率以修正斯托克斯信号与反斯托克斯信号的速度差。Yang等^[23]通过分3段Hermite插值算法消除了色散,在1 km传感距离上将系统的测量误差降低到 ± 0.015 以内,但该方法只对同一类型的传感光纤进行了修正。

针对上述光纤损耗及光纤色散对温度解调和测温准确度的影响以及现有解调方法的测量速度较低、使用灵活性较差的问题,本文提出了一种面向分布式光纤拉曼测温的自补偿光纤损耗及光纤色散的温度解调方法。该方法对斯托克斯与反斯托克斯后向散射信号进行了损耗修正,避免了测温前对整条传感光纤进行定标处理的过程,降低了系统运行的时间;然后采用平移算法对斯托克斯后向散射信号的位置点进行修正,以获得与反斯托克斯后向散射信号相同位置处的斯托克斯后向散射信号的强度,从而降低了光纤色散的影响,提高了系统测温准确度。

2 实验装置及测温原理

采用自补偿光纤损耗及光纤色散的分布式光纤拉曼测温实验装置示意图如图1所示。激光器产生的窄脉宽光脉冲信号进入多模光纤(MMF),其后向拉曼散射光经波分复用装置(WDM)耦合至雪崩光电探测器(APD)。由于反斯托克斯信号很弱,采用APD以及信号放大器进行光信号和电信号之间的转换和信号放大,并利用高速数据采集卡(DAC)和计算机进行数据采集和温度解调。

实验中,将距离多模传感光纤入射端 200 m 处的一段长度为 70 m 的光纤绕制成参考光纤环 1,放置在高精度恒温槽 1 中;将参考光纤环 1 后的另一段长度为 70 m 的光纤绕制成参考光纤环 2,放入高精度恒温槽 2 中。将长度为 10.0,3.0,1.5,2.0 m 的待测光纤置于恒温槽中(间隔分别为 3.0,1.5,2.0 m),按图 1 右下角示意图布置成探测区段。恒温槽的温度调节范围为 45~65 ℃,每隔 5 ℃ 设置一个温度测量点。在分布式光纤拉曼测温系统中,各个核心器件的性能参数如表 1 所示。

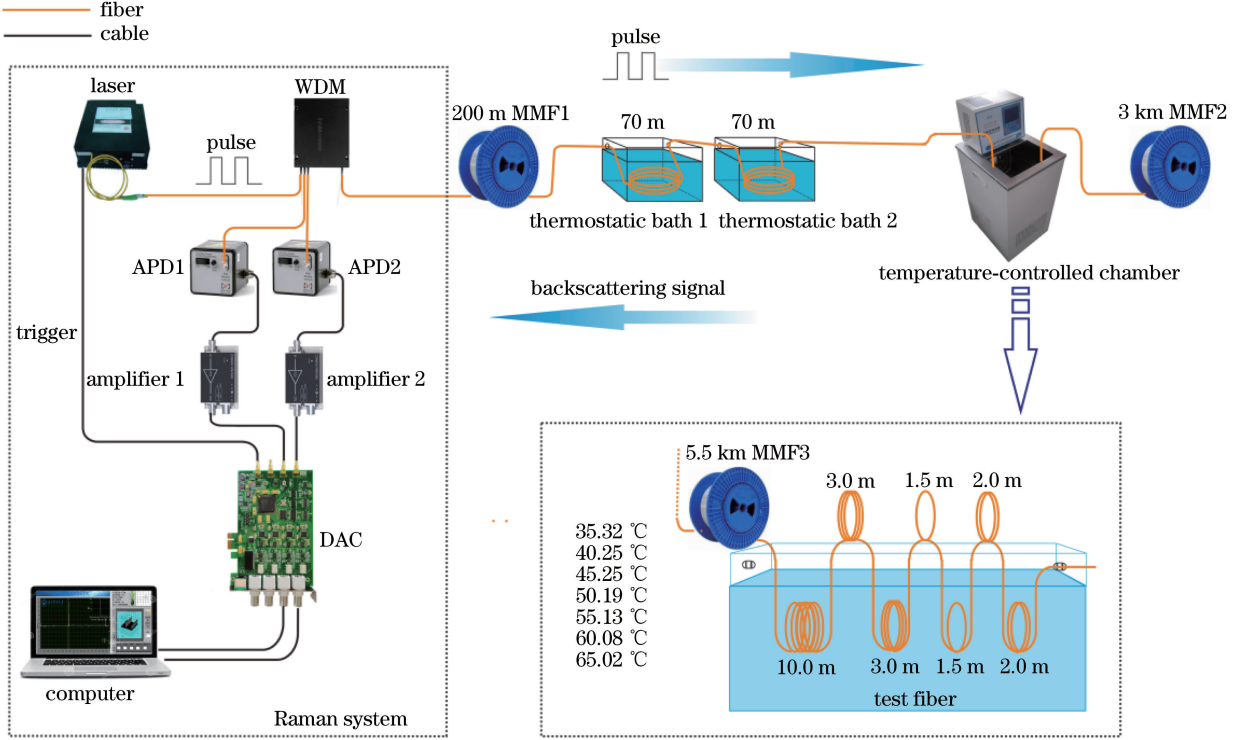


图 1 分布式拉曼测温系统实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental setup of distributed Raman temperature measurement system

表 1 分布式拉曼测温系统中核心器件的性能参数

Table 1 Performance parameters of key devices used in distributed Raman temperature measurement system

Key device	Performance parameter
Laser	Center wavelength: 1550.1 nm, pulse width: 10 ns
WDM	Operating wavelength: 1550, 1450, 1663 nm
APD	Response range: 900-1700 nm
Amplifier	Bandwidth: 100 MHz
DAC	Channel: 4, sampling rate: 100 MSa/s
MMF	Common multimode fiber
Temperature-controlled chamber	Temperature fluctuation: 0.005-0.020 ℃

拉曼散射原理为:入射的光量子与光纤物质分子产生非弹性碰撞时会发生能量交换,光量子可以释放或吸收声子,表现为产生一个波长较长的斯托克斯信号和一个波长较短的反斯托克斯信号^[24-25],由于反斯托克斯信号对温度敏感,所以系统将斯托克斯信号通道作为参考通道,将反斯托克斯信号通道作为信号通道,利用反斯托克斯信号与斯托克斯信号的功率比值来解调温度信息。传感光纤 L 处的反斯托克斯和斯托克斯后向散射信号返回到传感光纤入射端时的功率比值可表示为

$$\frac{\phi_a}{\phi_s} = \frac{K_a}{K_s} \left(\frac{V_a}{V_s} \right)^4 \exp\left(\frac{-h\Delta v}{kT}\right) \exp[-(\alpha_a - \alpha_s)L], \quad (1)$$

式中 ϕ_a 、 ϕ_s 分别为反斯托克斯和斯托克斯后向散射信号返回到传感光纤入射端时的功率, K_a 、 K_s 为与光纤散射截面有关的系数, V_a 、 V_s 分别为反斯托克斯散射信号和斯托克斯散射信号的频率, h 为普朗克常数,

$\Delta\nu = 13.2$ THz为拉曼声子频率, k 为玻尔兹曼常数, T 为开尔文绝对温度, α_a 、 α_s 分别为反斯托克斯和斯托克斯后向散射信号在光纤中的衰减系数, L 为光纤中发生自发拉曼散射的位置。可见, 当 K_a 、 K_s 、 V_s 、 V_a 、 α_s 、 α_a 以及 L 一定时, 在光纤入射端探测到的后向自发拉曼散射强度只与探测位置处的温度 T 有关。

3 光纤损耗及光纤色散补偿算法

3.1 光纤损耗补偿算法及温度解调算法

由于斯托克斯信号和反斯托克斯信号衰减系数的不同会造成测量误差, 将传感光纤置于同一温度场中, 得到这两种信号的功率比值随传感距离的增大而减小, 如图 2(a) 所示。为补偿这一误差, 在传感光纤中设置了两段参考光纤环, 分别为参考光纤环 1 (放置在高精度恒温槽 1 中) 和参考光纤环 2 (放置在高精度恒温槽 2 中)。首先计算反斯托克斯信号和斯托克斯信号的衰减系数之差, 光纤损耗补偿算法的步骤如下。

1) 将参考光纤环 1、2 的位置和温度分别设置为 L_1 、 L_2 和 T_1 、 T_2 , 采集卡采集到的参考光纤环 1、2 的反斯托克斯后向散射信号的功率比值为

$$\frac{\phi_{a1}}{\phi_{a2}} = \frac{\exp[h\Delta\nu/(kT_2)] - 1}{\exp[h\Delta\nu/(kT_1)] - 1} \exp[-(\alpha_o + \alpha_a)(L_1 - L_2)], \quad (2)$$

式中 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2} 分别为采集卡采集到的参考光纤环 1、2 的反斯托克斯后向散射信号的功率, α_o 为入射信号的衰减系数。

2) 对(2)式取对数后可得

$$\alpha_o + \alpha_a = \frac{\ln(\phi_{a1}/\phi_{a2}) - \ln\left\{\frac{\exp[h\Delta\nu/(kT_2)] - 1}{\exp[h\Delta\nu/(kT_1)] - 1}\right\}}{L_2 - L_1}. \quad (3)$$

3) 对参考光纤环 1、2 的斯托克斯后向散射信号的功率比值取对数后可得

$$\alpha_o + \alpha_s = \frac{\ln(\phi_{s1}/\phi_{s2}) - \ln\left\{\frac{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT_2)]}{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT_1)]}\right\}}{L_2 - L_1}, \quad (4)$$

式中 ϕ_{s1} 、 ϕ_{s2} 分别为采集卡采集到的参考光纤环 1、2 的斯托克斯后向散射信号的功率。

4) 将(3)式与(4)式相减, 得到 $\alpha_a - \alpha_s$, 对其进行指数运算后代入(1)式, 消去衰减系数, 得到损耗补偿后的反斯托克斯信号与斯托克斯信号的功率比值为

$$\frac{\phi_a}{\phi_s} = \frac{K_a}{K_s} \left(\frac{V_a}{V_s}\right)^4 \exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT}\right) \times \exp\left\{\left\{\frac{\ln\left(\frac{\phi_{a1}}{\phi_{a2}}\right) - \ln\left(\frac{\phi_{s1}}{\phi_{s2}}\right) - \ln\left\{\frac{\exp[h\Delta\nu/(kT_2)] - 1}{\exp[h\Delta\nu/(kT_1)] - 1}\right\} + \ln\left\{\frac{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT_2)]}{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT_1)]}\right\}}{L_1 - L_2}\right\} L\right\}. \quad (5)$$

从(5)式可以看出, 反斯托克斯信号和斯托克斯信号的功率比值不含衰减系数 α_a 和 α_s 。当光纤外部温度场相同时 (除去恒温槽内的待测光纤), 损耗补偿后的反斯托克斯信号与斯托克斯信号的功率比值曲线基本处于同一水平线上, 消除了由于信号衰减系数不同造成的测量误差, 如图 2(b) 所示。

为消去与光纤散射截面有关的系数 K_s 、 K_a 、 V_s 和 V_a , 解调算法只需将整条传感光纤中的反斯托克斯信号和斯托克斯信号的功率比值除以参考光纤环 1 中的这两种信号的功率比值即可。详细的温度解调算法步骤如下。

1) 采集卡采集到的参考光纤环 1 中反斯托克斯信号与斯托克斯信号的功率比值为

$$\frac{\phi_{a1}}{\phi_{s1}} = \frac{K_a}{K_s} \left(\frac{V_a}{V_s}\right)^4 \exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT_1}\right) \exp[-(\alpha_a - \alpha_s)L_1]. \quad (6)$$

2) 将(5)式除以(6)式并化简后可得

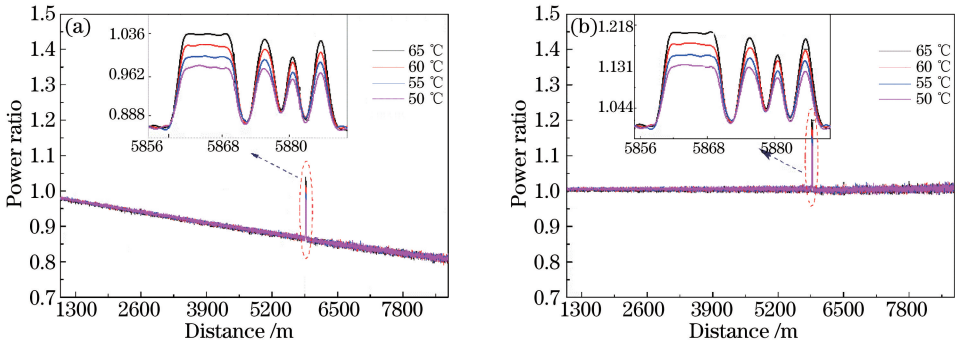


图 2 反斯托克斯信号与斯托克斯信号的功率比值。(a)损耗补偿前;(b)损耗补偿后

Fig. 2 Power ratio of anti-Stokes signal to Stokes signal. (a) Before loss compensation; (b) after loss compensation

$$\frac{1}{T} = \frac{\ln\left(\frac{\phi_a}{\phi_s} / \frac{\phi_{a1}}{\phi_{s1}}\right) - \frac{\left\{ \ln\left(\frac{\phi_{s1}}{\phi_{s2}}\right) - \ln\left\{ \frac{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT_2)]}{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT_1)]} \right\} - \ln\left(\frac{\phi_{a1}}{\phi_{a2}}\right) + \ln\left\{ \frac{\exp[h\Delta\nu/(kT_2)] - 1}{\exp[h\Delta\nu/(kT_1)] - 1} \right\} \right\}}{L_1 - L_2} (L_1 - L) - \frac{1}{T_1}}{-h\Delta\nu/k} + \frac{1}{T_1} \quad (7)$$

从(7)式可以看出,除温度 T 外,其他变量均已知,故可以直接利用损耗补偿后的斯托克斯信号与反斯托克斯信号的功率比值来解调出光纤各点的温度信息。

综上所述,在温度解调算法中,参考光纤环 1 中的两种信号的功率比值不仅可以用于补偿因光纤衰减系数的不同而造成的测量误差,还可以用于消去光纤中一些固有参数对解调结果的影响。参考光纤环 2 辅助参考光纤环 1 共同补偿因斯托克斯信号与反斯托克斯信号衰减系数的不同而造成的测量误差。采用上述温度解调算法,无需在测温前对整条传感光纤进行定标处理,直接对损耗补偿后的斯托克斯信号与反斯托克斯信号的功率比值进行计算即可解调出光纤沿线的温度信息。

3.2 光纤色散补偿算法及采集结果

在分布式光纤拉曼测温系统中,传感光纤尾端的光纤折射率与空气折射率的不同导致强烈的菲涅耳反射现象。采集卡接收到的斯托克斯信号幅度与反斯托克斯信号幅度如图 3(a)所示,在传感光纤的尾端出现明显的菲涅耳反射峰。将反射峰放大后,斯托克斯信号与反斯托克斯信号的反射峰发生错位,两者相差约 3 m,该现象是由光纤色散引起的。因此,根据斯托克斯信号与反斯托克斯信号的菲涅耳反射峰位置的差值和两路信号的色散值随距离的线性变化^[22],对斯托克斯信号的位置进行平移处理,以获得与反斯托克斯后向散射信号相同位置处的斯托克斯后向散射信号的强度。

平移算法步骤为:1) 使用 LabView 编程自动计算出斯托克斯和反斯托克斯后向散射信号在光纤尾端

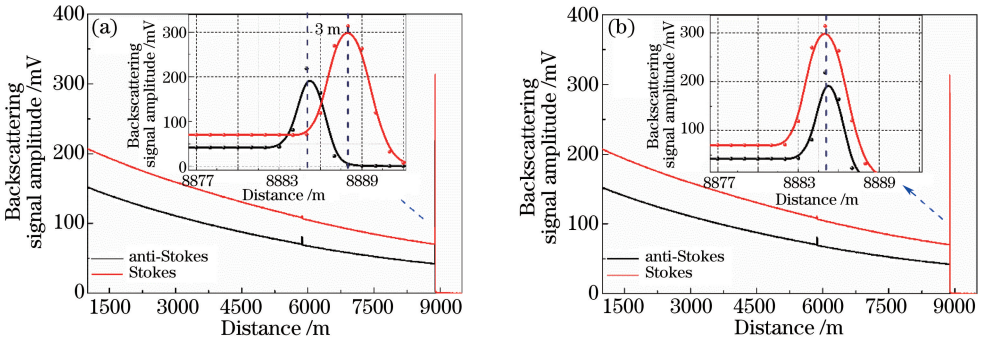


图 3 反斯托克斯与斯托克斯后向散射信号的幅度。(a)色散补偿前;(b)色散补偿后

Fig. 3 Anti-Stokes and Stokes backscattering signal amplitude. (a) Before dispersion compensation; (b) after dispersion compensation

由于菲涅耳反射出现的强峰位置,分别记为 $L_{1\max}$ 和 $L_{2\max}$;2) 计算 $L_c = |L_{1\max} - L_{2\max}|$;3) 将斯托克斯后向散射信号的数据点位置进行平移,平移算法可表示为

$$\phi_s(L) = \phi_s\left(L + \frac{L_c}{L_{2\max}}L\right), \quad (8)$$

式中 $\phi_s(L)$ 为光纤 L 处的后向斯托克斯散射信号的功率。从图 3(b)可以看出,经色散补偿后,可得到与反斯托克斯后向散射信号相同位置处的斯托克斯信号的强度,且信号的形状没有发生畸变。

4 测温实验结果及分析

对所搭建的自补偿光纤损耗及光纤色散的分布式拉曼测温系统进行光纤温度测量实验。实验使用的传感光纤长度为 8 km,将传感光纤置于室温环境下(27.85 °C),并将探测光纤环放置在恒温槽中进行分布式测温,整体温度分布如图 4 所示。系统在测温前未进行定标处理,直接对斯托克斯信号与反斯托克斯信号进行损耗补偿,利用修正后的斯托克斯信号与反斯托克斯信号的功率比值可以准确探测到室温下传感光纤的温度和恒温槽内探测光纤环的温度。

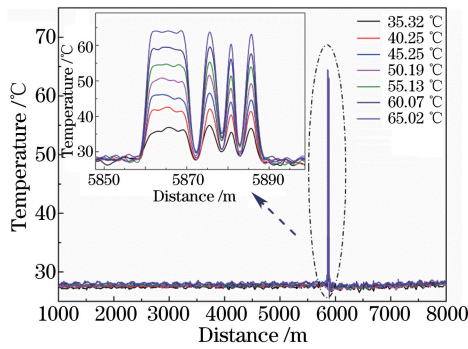


图 4 分布式测温结果

Fig. 4 Distributed temperature measurement result

温度分布、测温准确度及温度波动范围如图 5 所示。由图 5(a)可知,在 10 m 的探测光纤环温度分布曲线中,起始端出现一个明显的温升峰。当恒温箱温度为 65.02 °C 时,温升峰的峰值温度为 71.72 °C,与实际温度相差 5.50 °C,误差为 10.3%,且整体温度的波动范围为 9.01 °C,该测量误差是由斯托克斯信号与反斯托克斯信号的错位造成的。由于温度解调结果是通过同一位置处两种散射信号的功率比计算得到的,如果两路信号来自传感光纤的不同散射位置,温度解调结果必定出现误差,只有消除这两路信号的错位才能获得准确的温度。为消除光纤色散引起的信号错位,解调过程中需要对斯托克斯信号进行平移处理,使其平移点对应的散射位置与反斯托克斯信号的散射位置一致。由图 5(b)可知,在 10 m 的探测光纤环温度分布曲线中,前端的温升峰已消失,且温度波动范围较色散补偿前明显缩小。由图 5(c)、(d)可以看出,当恒温箱温度为 65.02 °C 时,系统测温准确度由 5.50 °C 优化至 0.87 °C,使测量误差由 8.5% 下降至 1.3%,温度波动范围由 9.01 °C 下降至 0.57 °C。

5 结 论

提出了一种面向分布式光纤拉曼测温的自补偿光纤损耗及光纤色散的温度解调方法。首先对斯托克斯与反斯托克斯后向散射信号进行损耗修正,系统可以直接利用修正后的信号功率比值曲线解调温度信息,无需在测温前进行定标处理,降低了系统运行时间;然后采用色散补偿算法对斯托克斯后向散射信号的位置进行修正,以获得与反斯托克斯后向散射信号相同位置处的斯托克斯后向散射信号的强度,从而消除光纤色散,提高测温精度。此补偿色散的方法适用于全部类型的传感光纤,使用灵活性较强。实验结果表明,传感光纤在 5.8 km 位置处的温度波动范围由 9.01 °C 下降到 0.57 °C,测温准确度由 5.50 °C 优化至 0.87 °C,测温准确度得到提高。随着测量距离的增大,光纤色散产生的信号错位现象越发严重,测温误差也会越来越大,更能体现这种解调方法的优越性。另外,由于该色散补偿平移算法是对整条传感光纤中的斯托克斯散射信

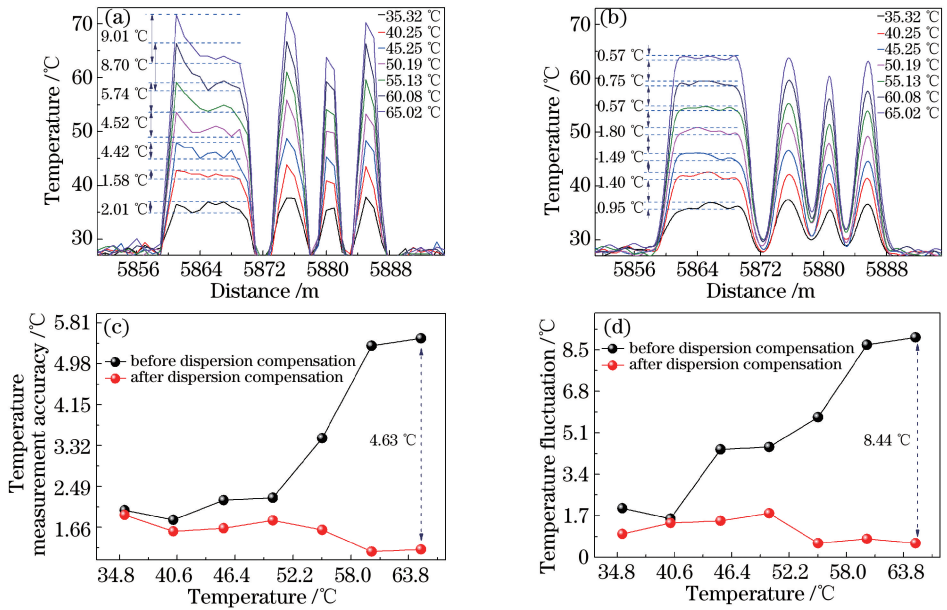


图 5 (a)色散补偿前的温度分布;(b)色散补偿后的温度分布;(c)色散补偿前与色散补偿后的测温准确度;
(d)色散补偿前与色散补偿后的温度波动范围

Fig. 5 (a) Temperature distribution before dispersion compensation; (b) temperature distribution after dispersion compensation; (c) temperature accuracies before and after dispersion compensation;
(d) temperature fluctuation ranges before and after dispersion compensation

号进行修正,因此即使出现多个位置的温度变化也同样能消除信号的错位,实现温度修正。该研究为提高分布式光纤拉曼测温系统的测温准确度和测量速度提供了一种新的解调方法。

参 考 文 献

- [1] Tu G J, Zhang X P, Zhang Y X, *et al.* The development of an Φ -OTDR system for quantitative vibration measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1349-1352.
- [2] Fu Xinghu, Xie Haiyang, Yang Chuanqing, *et al.* Research on the temperature sensing characteristics of triple cladding quartz specialty fiber based on cladding mode resonance[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 024211.
付兴虎, 谢海洋, 杨传庆, 等. 基于包层模谐振的三包层石英特种光纤温度传感特性[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 024211.
- [3] Bi Weihong, Yang Xipeng, Li Jingyang, *et al.* Forward and backward Raman amplification of Brillouin scattering signal in Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205007.
毕卫红, 杨希鹏, 李敬阳, 等. 布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205007.
- [4] Yu Xiangdong, Zhang Zaixuan, Zhu Haizhong, *et al.* A temperature compensating circuit for distributed optical fiber Raman temperature sensor[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1440-1444.
余向东, 张在宣, 祝海忠, 等. 一种应用于分布式光纤拉曼温度传感器的温度补偿电路[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1440-1444.
- [5] Qin Z G, Chen L, Bao X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(7): 542-544.
- [6] Fernandez A F, Rodeghiero P, Brichard B, *et al.* Radiation-tolerant Raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, 52(6): 2689-2694.
- [7] de Jong S A P, Slingerland J D, van de Giesen N C. Fiber optic distributed temperature sensing for the determination of air temperature[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(1): 335-339.
- [8] Yilmaz G, Karlik S E. A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 125(2): 148-155.
- [9] Leung C K Y, Wan K T, Inaudi D, *et al.* Review: Optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. Materials and Structures, 2015, 48(4): 871-906.

- [10] Sun B N, Chang J, Lian J, *et al.* Accuracy improvement of Raman distributed temperature sensors based on eliminating Rayleigh noise impact[J]. *Optics Communications*, 2013, 306: 117-120.
- [11] Hwang D, Yoon D J, Kwon I B, *et al.* Novel auto-correction method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 9747-9754.
- [12] Park J, Bolognini G, Lee D, *et al.* Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(17): 1879-1881.
- [13] Saxena M K, Raju S J, Arya R, *et al.* Empirical mode decomposition-based detection of bend-induced error and its correction in a Raman optical fiber distributed temperature sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1243-1252.
- [14] Saxena M K, Raju 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: 345-355.
- [15] Soto M A, Nannipieri T, Signorini A, *et al.* Raman-based distributed temperature sensor with 1 m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2557-2559.
- [16] Cangialosi C, Ouerdane Y, Girard S, *et al.* Development of a temperature distributed monitoring system based on Raman scattering in harsh environment[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, 61(6): 3315-3322.
- [17] Zhao Jian. Study on spatial resolution of distributed optical fiber temperature sensor[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2015: 14-17.
赵 健. 分布式光纤温度传感器空间分辨率研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2015: 14-17.
- [18] Pradhan H S, Sahu P K. Characterisation of Raman distributed temperature sensor using deconvolution algorithms[J]. *IET Optoelectronics*, 2015, 9(2): 101-107.
- [19] Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan, *et al.* Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(1): 100-105.
王 玮, 周邦全, 张在宣, 等. 分布式光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度[J]. *光学学报*, 1999, 19(1): 100-105.
- [20] Zhang Zaixuan, Jin Renzhu, Guo Ning, *et al.* New type distributed optical fiber Raman photons temperature sensors system[J]. *Physics Experimentation*, 2003, 23(1): 3-8.
张在宣, 金仁洙, 郭 宁, 等. 新型分布式光纤拉曼光子温度传感器系统[J]. *物理实验*, 2003, 23(1): 3-8.
- [21] Soto M A, Signorini A, Nannipieri T, *et al.* High-performance Raman-based distributed fiber-optic sensing under a loop scheme using anti-stokes light only[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(9): 534-536.
- [22] Wang W, Chang J, Lü G, *et al.* Wavelength dispersion analysis on fiber-optic Raman distributed temperature sensor system[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(3): 256-261.
- [23] Yang Rui, Li Xiaoyan, Gao Xiang. Correct the measurement error of distributed Raman optical fiber temperature measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(10): 1006006.
杨 睿, 李小彦, 高 翔. 分布式喇曼光纤测温系统中修正测量误差的方法[J]. *光子学报*, 2015, 44(10): 1006006.
- [24] Samson P J. Analysis of the wavelength dependence of Raman backscatter in optical fibre thermometry[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(3): 163-165.
- [25] Culshaw B, Kersey A. Fiber-optic sensing: A historical perspective[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9): 1064-1078.