

激光与光电子学进展

提高分布式温度传感器测温准确度的降噪方法

孙苗¹, 汤玉泉^{2*}, 杨爽², 赵晓虎^{2,3}, 张志荣², 庄飞宇³¹合肥师范学院物理与材料工程学院, 安徽 合肥 230601;²中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;³合肥师范学院电子信息系统仿真设计安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 为了减小拉曼散射光波长相关损耗、光电探测器附加噪声及散射光中的瑞利噪声对分布式光纤温度传感器测温误差的影响,通过分析分布式光纤温度传感系统的解调原理提出了一种反斯托克斯光降噪方法。将光纤按照环形结构铺设,以每次测量的反斯托克斯光信号中菲涅耳反射峰后的基底噪声平均值作为动态本底噪声,利用两段处于不同温度的光纤消除动态本底噪声后的瑞利噪声。反斯托克斯光降噪解调法从原理上避免了参考斯托克斯光引入的测温误差,消除了本底噪声和瑞利噪声导致的测温误差。实验结果表明,修正的分布式光纤温度传感系统的最大测温误差从 5.4 °C 降低到 0.6 °C,测温准确度有明显提高。

关键词 光纤光学; 分布式光纤传感系统; 拉曼散射; 环形结构; 噪声抑制; 测温误差

中图分类号 TN253;O437.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1906003

Noise Reduction Method to Improve Temperature Measurement Accuracy of Distributed Temperature Sensor

Sun Miao¹, Tang Yuquan^{2*}, Yang Shuang², Zhao Xiaohu^{2,3}, Zhang Zhirong², Zhuang Feiyu³¹College of Physics and Materials Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, Anhui, China;²Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Material, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;³Anhui Province Key Laboratory of Simulation and Design for Electronic Information System, Hefei Normal University, Hefei 230601, Anhui, China

Abstract To reduce temperature measurement error caused by the wavelength-related loss of Raman scattering light and extra noise of photodetector and Rayleigh noise in scattering lights of the Raman-distributed temperature sensor system, an anti-Stokes optical noise reduction method developed by analyzing the demodulation principle of distributed optical fiber temperature-sensing system in this paper. The optical fiber is laid according to the ring structure. The average value of the base noise following the Fresnel reflection peak in each measured anti-Stokes optical signal is taken as the dynamic background noise. Two sections of the optical fiber at different temperatures are used to eliminate the Rayleigh noise after the dynamic background noise. In theory, the anti-Stokes light noise reduction demodulation method prevents the temperature measurement error introduced by the reference Stokes light and eliminates the temperature measurement error caused by background noise and Rayleigh noise. The experimental results demonstrate that the maximum temperature measurement error of the modified distributed optical fiber temperature-sensing system is decreased from 5.4 °C to 0.6 °C, and the temperature measurement accuracy is significantly improved.

Key words fiber optics; distributed optical fiber sensing system; Raman scattering; ring structure; noise suppression; temperature measurement error

收稿日期: 2022-05-13; 修回日期: 2022-05-23; 录用日期: 2022-06-15

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0722, KJ2021A0909)、电子信息系统仿真设计安徽省重点实验室重点项目(2020ZDSYSZD03)、安徽省大学生创新创业训练项目(14098086)、中国科学院合肥物质科学研究院院长基金青年“火花”项目(YZJJ2020QN3)

通信作者: *laserway@aiofm.ac.cn

1 引言

分布式光纤温度传感(DTS)系统具有易操作、抗电磁干扰、适用于恶劣环境、全分布式测量等优点,被广泛应用于输油管道、火灾预警、高压电缆及大坝结构健康监测等领域^[1-7]。激光脉冲在光纤中传输时会发生拉曼散射效应,产生斯托克斯拉曼散射光和反斯托克斯拉曼散射光,结合光时域反射技术测量得到各个散射点的位置和温度变化情况就能实现对空间温度场的实时连续测量。

相比斯托克斯光,反斯托克斯光对温度变化非常敏感,DTS系统通常用斯托克斯光作为参考光、用反斯托克斯光作为信号光,利用散射光强度比值法解调温度。但反斯托克斯光和斯托克斯光的波长不同,在光纤中传输时存在波长相关损耗及由光纤弯曲、应力变化或环境温度变化产生的附加损耗。温度解调时若忽略反斯托克斯光和斯托克斯光的损耗差异,解调温度值与真实温度值会存在偏差^[8]。双光源修正法和双端环路修正法可以减小波长相关损耗导致的测温误差。但双光源修正法需要两个光源,且光源切换过程中的光强波动会带来新的误差^[8],双端环路修正法则需增加一个光开关实现反斯托克斯光信号的双向采集^[9-12],增加了系统成本和复杂度。此外,DTS系统中还存在因斯托克斯光和反斯托克斯光传输速度不同导致的定位误差及测温误差,该误差在长距离传感时更加明显^[13],且参考斯托克斯光的强度随测量温度的变化而变化,使反斯托克斯光与斯托克斯光强度比值偏小或偏大,给温度解调带来新的误差^[14]。

由于光纤中的拉曼散射光信号较弱,比入射光强度高小80~90 dB,有效的信号完全被淹没在噪声中,因此,需要在有效抑制噪声的条件下对微弱信号进行放大以提取出拉曼散射光信号^[15]。通常采用光电探测器和放大器对拉曼散射光信号进行光电转换和放大,但光电探测器和放大器工作时附加了额外的噪声。累加平均算法、最小均方(LMS)自适应滤波算法、小波去噪算法能有效滤除噪声,但处理后的信号中仍存在部分光电探测器和放大器的本底噪声^[16-19]。此外,激光脉冲在光纤中不仅会发生拉曼散射,还会发生瑞利散射。DTS系统中常用的波分复用器(WDM)隔离度为35~40 dB,瑞利散射光的强度比反斯托克斯光强度高约30 dB,波分复用器无法完全滤除瑞利散射光,而用于温度解调的反斯托克斯光信号中含有瑞利散射光,增大了测温误差。反斯托克斯光自解调法只用反斯托克斯光解调温度^[20],从原理上避免了色散及斯托克斯光温度响应导致的测温误差,但同时消除光电探测器和放大器本底噪声、瑞利噪声的修正方法报道较少。在工程应用中,用于传感的光缆内有多条光纤,将光缆末端的两条光纤相互熔接成环形结构的单根光纤,对光缆的每个测量点均由两段不同的光纤进行测量。单端环形

结构的DTS系统只用一个光电探测器和放大器,通过数据处理代替光开关,结构简单、成本较低且易于实现。

本文从DTS系统的温度解调原理出发,研究了单端环形光纤结构的DTS系统反斯托克斯光温度自解调法,并提出了同时消除本底噪声和瑞利噪声的温度修正方法。实验结果表明,光纤温度在35~90 °C范围时,反斯托克斯光自解调法具有较高的测温准确度,有效减小了系统的测温误差,消除本底噪声后测温误差从5.4 °C降低到了3.9 °C,消除瑞利噪声后测温误差进一步降低到了0.6 °C。

2 基本原理

2.1 温度解调原理

激光器发出的脉冲光在光纤中传输时,脉冲光与光纤分子相互作用,产生斯托克斯拉曼散射光和反斯托克斯拉曼散射光。每个激光脉冲产生的背向拉曼散射光经波分复用器进入光电探测器和放大器进行光电转换和放大,采集卡接收到的反斯托克斯光和斯托克斯光背向散射光强可表示为

$$I_{AS} = MK_{AS}S\nu_{AS}^4S_eR_{AS}(T)\exp[-(\alpha_0 + \alpha_{AS})l], \quad (1)$$

$$I_S = MK_S S\nu_S^4S_eR_S(T)\exp[-(\alpha_0 + \alpha_S)l], \quad (2)$$

式中: M 为放大器的放大倍数; K_{AS} 、 K_S 为与光纤散射截面有关的系数; S 为光纤背向散射因子; ν_{AS} 、 ν_S 为散射光子的频率; S_e 为入射到光纤激光脉冲的光通量; T 为光纤所处环境的温度; l 为光纤中发生拉曼散射的位置; α_0 、 α_{AS} 、 α_S 分别为入射光、反斯托克斯光、斯托克斯光的平均传输损耗; $R_{AS}(T)$ 、 $R_S(T)$ 为背向散射光的温度调制函数; $R_{AS}(T) = \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1\right]^{-1}$;

$$R_S(T) = \left[1 - \exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT}\right)\right]^{-1}; h$$

为拉曼声子频率; k 为玻尔兹曼常数。可以发现,反斯托克斯光的强度、斯托克斯光的强度是温度的函数,当温度发生变化时,参考斯托克斯光也会发生变化,从而引入光噪声,导致温度解调误差增大。

单端环形光纤结构的DTS系统,每个测量点都由两段不同的光纤进行温度测量。当传感光纤的长为 L 时, $z(0 < z < L/2)$ 为光纤上的任意一点, $L - z$ 处的环境与 $z(0 < z < L/2)$ 处的环境具有一致性。根据式(1),对光纤 $z(0 < z < L/2)$ 和 $L - z$ 处的反斯托克斯光强求几何平均值,得到

$$J(z, T) = [I(z, T) \times I(L - z, T)]^{1/2} = MK_{AS}S\nu_{AS}^4S_eR_{AS}(T)A, \quad (3)$$

式中, $A = \exp\left\{\int_0^L [\alpha_0(l) + \alpha_{AS}(l)] dl\right\}^{1/2}$ 为衰减因子,

与距离 z 和温度 T 的变化无关。用一段长为 l_0 、环境温

度为 T_0 的温控光纤(参考光纤)对激光器输出光功率进行校正,则

$$J(l_{\text{ref}}, T_0) = [I(l_{\text{ref}}, T_0) \times I(L - l_{\text{ref}}, T_0)]^{1/2} = MK_{\text{AS}} S_{\text{AS}}^4 S_e R_{\text{AS}}(T_0) A, \quad (4)$$

式中, $l_{\text{ref}}(0 < l_{\text{ref}} < l_0)$ 为参考环形光纤上的任意一点。为提高测量精度,取参考光纤上反斯托克斯光强的平均值作为参考光强度,记为 $J_{\text{ref}}(T_0)$ 。联立式(3)与式(4),得到温度 T 的解调结果为

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{h\Delta\nu} \ln \left\{ \frac{J_{\text{ref}}(T_0)}{J(z, T)} \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_0}\right) - 1 \right] + 1 \right\}. \quad (5)$$

单端环形光纤结构的 DTS 系统利用反斯托克斯光自解调法测量温度,避免了参考斯托克斯光引入的光噪声,消除了由散射光波长差异导致的波长相关损耗、环境变化及外部扰动导致的衰减变化,相比散射光强度比值法的测温误差更小。

2.2 本底噪声消噪原理

DTS 系统利用铟镓砷(InGaAs)光电探测器和放大器将微弱的拉曼背向散射光信号转换成电信号并放

大时会引入额外的噪声。由于放大器的噪声主要为白噪声和闪烁噪声,可以利用累加平均法进行降噪处理。InGaAs 光电探测器噪声主要包括散粒噪声、相对强度噪声和跨阻热噪声。其中:散粒噪声与光功率成正比;相对强度噪声与光功率的平方成正比;热噪声与光功率无关。无光信号输入时,光电探测器的散粒噪声与相对强度噪声均为 0,输出本底噪声主要为本底暗电流噪声和本底热噪声,可表示为

$$\sigma_g^2 = 2e\Delta f R^2 I_{\text{dark}} + 4k\Delta f TR, \quad (6)$$

式中: σ_g^2 为本底噪声; e 为电子电量; Δf 为光电探测器的检测带宽; R 为跨阻; I_{dark} 为暗电流。可以发现,本底暗电流噪声与暗电流有关,本底热噪声与温度有关,跨阻 R 不变时暗电流也受温度影响。通常情况下,DTS 系统通过减去光电探测器的固定基底噪声得到拉曼背向散射光强度,忽略了温度对本底噪声的影响,进而导致测温误差。因此,记每次测量的反斯托克斯光信号中菲涅耳反射峰后的本底噪声平均值为动态本底噪声 I_G ,利用消除动态本底噪声的反斯托克斯光信号进行温度解调,可表示为

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{h\Delta\nu} \ln \left\{ \left[\frac{[I(l_{\text{ref}}, T_0) - I_G] \times [I(L - l_{\text{ref}}, T_0) - I_G]}{[I(z, T) - I_G] \times [I(L - z, T) - I_G]} \right]^{1/2} \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_0}\right) - 1 \right] + 1 \right\}. \quad (7)$$

2.3 瑞利噪声抑制方法

由于波分复用器无法滤除全部的瑞利背向散射光,反斯托克斯光中含有部分瑞利噪声,导致解调温度值与实际温度值之间存在偏差,可通过抑制瑞利噪声减小测温误差。当脉冲激光器的参数、探测器所处的环境以及光纤的种类确定后,瑞利噪声可以看作常数,DTS 系统测量的反斯托克斯光强包含反斯托克斯光强的真实值和部分瑞利噪声^[12],可表示为

$$I_m = I_r + I_R, \quad (8)$$

式中: I_m 、 I_r 分别为反斯托克斯光强的测量值、真实值; I_R 为瑞利噪声。由于瑞利噪声对温度变化不敏感,不随光纤长度的变化而变化,因此,可利用两段不同温度的光纤求解 DTS 系统中的瑞利噪声。

将光纤 I 和光纤 II 分别放置在温度为 T_0 和 T_1 的环境中,其余光纤放置在室温,则光纤 I 上 $z_1(0 < z_1 < z_2)$ 点、 $L - z_1$ 点及光纤 II 上 $z_2(z_1 < z_2 < L/2)$ 和 $L - z_2$ 处的反斯托克斯光强可表示为

$$\begin{cases} I_{m,z_1} = I_{r,z_1} + I_R \\ I_{m,L-z_1} = I_{r,L-z_1} + I_R \\ I_{m,z_2} = I_{r,z_2} + I_R \\ I_{m,L-z_2} = I_{r,L-z_2} + I_R \end{cases}. \quad (9)$$

联立式(3)和式(9)可解出反斯托克斯光中的瑞利噪声 I_R 。将瑞利噪声 I_R 代入式(7),得到单端环形光纤结构消除本底噪声和瑞利噪声后 DTS 系统的解调温度为

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{h\Delta\nu} \ln \left\{ \left[\frac{[I(l_{\text{ref}}, T_0) - I_G - I_R] \times [I(L - l_{\text{ref}}, T_0) - I_G - I_R]}{[I(z, T) - I_G - I_R] \times [I(L - z, T) - I_G - I_R]} \right]^{1/2} \left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_0}\right) - 1 \right] + 1 \right\}. \quad (10)$$

3 实验装置

为对比反斯托克斯光与斯托克斯光强比值法、反斯托克斯光解调法的测温误差,实验中的 DTS 系统使用双通道光电探测器和采集卡,对反斯托克斯光和斯托克斯光进行采集。反斯托克斯光解调法只使用一个光电探测器和放大器即可完成温度的解调,系统结构简单且

成本较低。DTS 系统的实验装置如图 1 所示。激光器的中心波长为 1550 nm,峰值功率为 30 W,产生的激光脉冲宽度为 10 ns,重复频率为 20 kHz。 1×3 波分复用器的光隔离度为 35~40 dB。传感光纤为普通多模光纤,环形结构放置,长度为 3687 m。高性能双通道铟镓砷光电探测器(APD)的 3 dB 带宽为 80 MHz,高速数据采集卡(DAC)为双通道 14 位,采样率为 100 MSa/s。

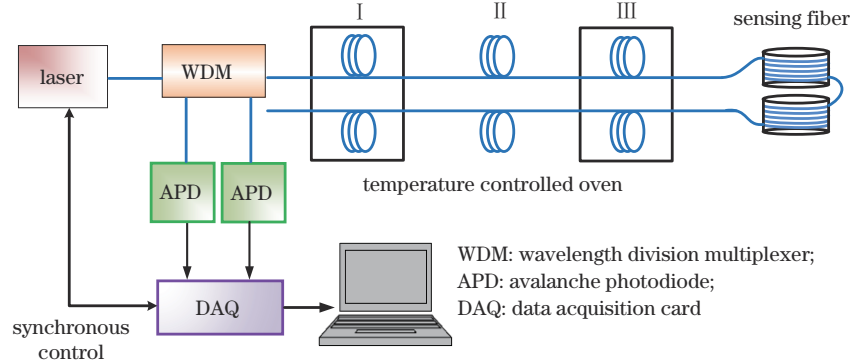


图1 分布式温度传感系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the distributed temperature sensing system

激光器发出的脉冲光通过 1×3 波分复用器耦合进入传感光纤产生自发拉曼散射效应, 背向反斯托克斯光和斯托克斯光再通过波分复用器滤波进入光电探测器和放大器进行光电转换和放大。激光器同步触发采集卡对信号采集并完成 65535 次累加平均后传输至计算机进行处理。

将传感光纤以环形结构放置, 分为 I、II、III 三部分: 光纤 $0 \sim 90$ m 和 $3597 \sim 3687$ m 段 90 m 长的光纤作为参考光纤 I 放置在水浴箱; 光纤 $160 \sim 250$ m 和 $3437 \sim 3527$ m 段 90 m 长的光纤作为测温光纤 III 放置在恒温箱; 传感光纤 II 和其余光纤放置在室温环境中。其中, 水浴箱和恒温箱温控精度都为 ± 0.5 °C, 水浴箱的温控范围为 $5.0 \sim 100.0$ °C, 恒温箱的温控范围为 $5.0 \sim 250.0$ °C。

4 实验结果与讨论

4.1 测温误差

实验中设置传感光纤 I 所在的水浴箱温度为 35 °C, 测温光纤 III 所在的恒温箱温度分别为 50 °C 和 75 °C, 其余光纤在室温中。待温度稳定后, 光纤中的斯托克斯光和反斯托克斯光的强度如图 2(a) 所示。可以发现: 斯托克斯光强度和反斯托克斯光强度随光纤长度的

增加逐渐减小, 光纤长度为 1881 m 处的阶梯为光纤熔接损耗; 当光纤所处环境温度升高时, 斯托克斯光强度和反斯托克斯光强度随温度的升高而增大, 且相比反斯托克斯光, 斯托克斯光强度的增量较小。将恒温箱温度从 35 °C 逐渐升高到 90 °C, 每次上升 5 °C, 待温度稳定后测量光纤上 180 m 位置处的斯托克斯光强度和反斯托克斯光强度, 归一化结果如图 2(b) 所示。可以发现: 在 $35 \sim 90$ °C 范围内, 反斯托克斯光强度和斯托克斯光强度随温度的升高而线性增加; 当温差为 55 °C 时, 反斯托克斯光强度增大了 40.8% , 斯托克斯光强度增大了 12.2% 。

实验中的测温误差为加热光纤段内各点测量温度的平均值与真实温度的偏差。DTS 系统分别采用散射光强度比值法和反斯托克斯光自解调法解调温度, 温度解调结果及测温误差如图 3 所示。可以发现: 测温光纤 III 所在恒温箱温度为 35 °C 时, 散射光强度比值法和反斯托克斯光自解调法的解调温度分别为 35.8 °C 和 35.6 °C; 恒温箱温度为 40 °C 时, 散射光强度比值法和反斯托克斯光自解调法的解调温度分别为 39.7 °C 和 40.1 °C; 随着恒温箱温度的升高, 解调温度逐渐分离, 测温误差逐渐增大; 当恒温箱温度为 90 °C 时, 散射光强度比值法和反斯托克斯光自解调法的测温误差分别为 9.8 °C 和 5.4 °C, 达到最大值。反斯

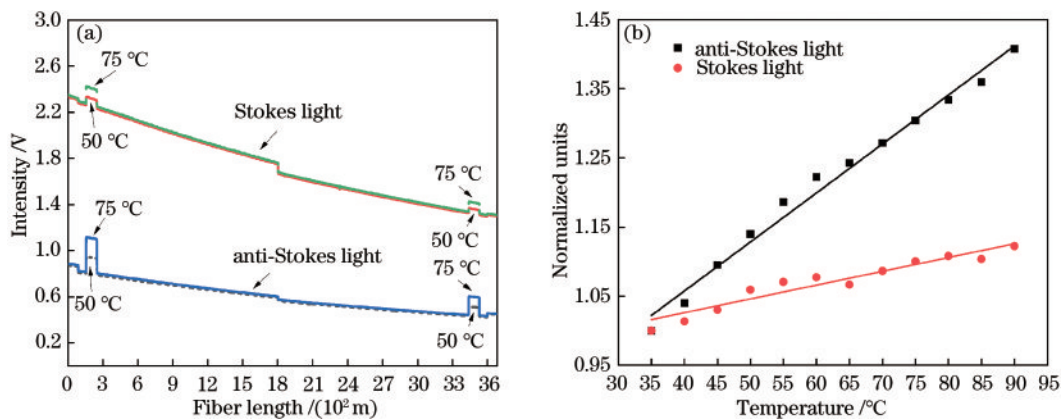


图2 拉曼散射光的强度。(a) 传感光纤上的光强分布; (b) 不同温度下的归一化散射光强

Fig. 2 Intensity of Raman scattered light. (a) Light intensity distribution on the sensing fiber; (b) normalized scattered light intensity at different temperatures

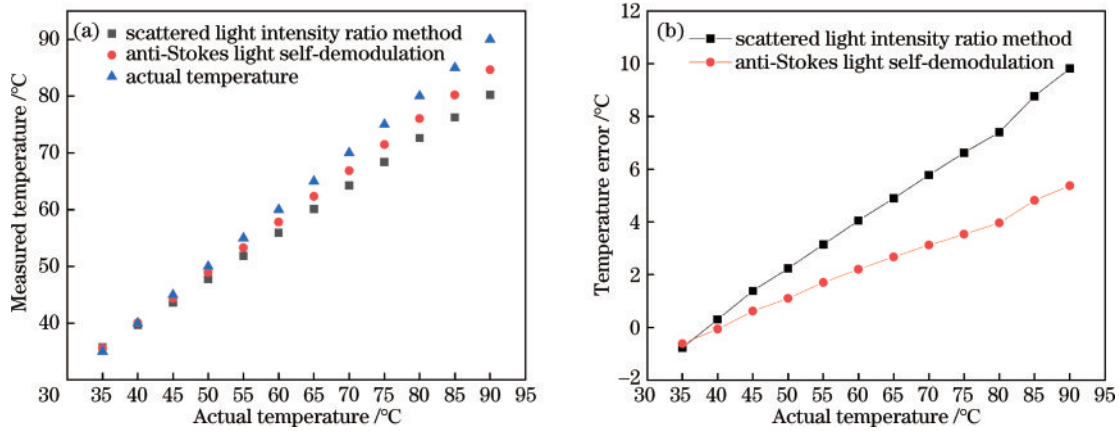


图 3 环形光纤结构 DTS 系统的测量结果。(a)测温结果;(b)测温误差

Fig. 3 Measurement results of the DTS system with a ring fiber structure. (a) Temperature measurement result; (b) temperature measurement error

托克斯光自解调法测得的误差明显小于散射光强度比值法,原因是参考斯托克斯光强随温度升高而增大,恒温箱温度越高,斯托克斯光强越大,而反斯托克斯光自解调法不受斯托克斯光强影响,测温误差较小。

4.2 本底噪声的抑制结果

光电探测器和放大器的本底噪声与温度有关,而光电探测器工作发热导致温度升高,使反斯托克斯光中的本底噪声不是固定值,因此,DTS系统需要通过抑制本底噪声进行温度修正。本底噪声的强度如图 4 所示。可以发现,光电探测器的动态本底噪声随工作时间的变化出现波动。以光电探测器和放大器开机进入正常工作时的本底噪声(0.0105 V)作为固定本底噪声,将固定本底噪声与实时测量的动态本底噪声分别代入式(7),得到的温度解调结果如图 5 所示。可以发现:当恒温箱温度为 40 °C 时,消除固定本底噪声和动态本底噪声的测温误差最小,均为 0.2 °C;随着恒温箱温度的升高,光电探测器和放大器工作时间增长,动态本底噪声逐渐偏离固定本底噪声;当恒温箱温度为 90 °C 时,消除固定本底噪声的测温误差达到最大值,为 4.5 °C,消除动态本底

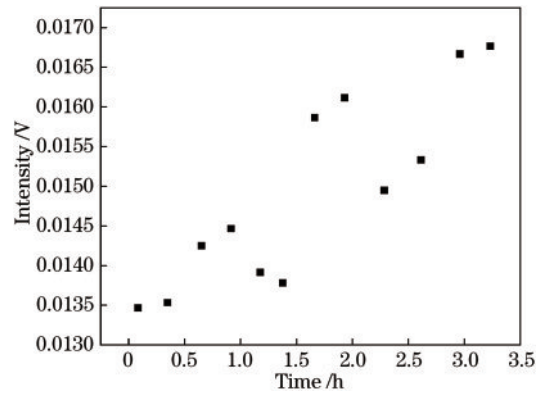


图 4 本底噪声的强度

Fig. 4 Intensity of the ground noise

声的测温误差最大值为 3.9 °C,测温误差减小了 1.5 °C。相比未消除本底噪声的温度解调结果,低温测量时测温误差相差不大,高温测量时测温误差明显减小,且消除动态本底噪声后的测温误差最小。原因是光电探测器和放大器的工作时间越长,动态本底噪声偏离固定本底噪声也越大。DTS 系统消除动态本底噪声后的信噪比

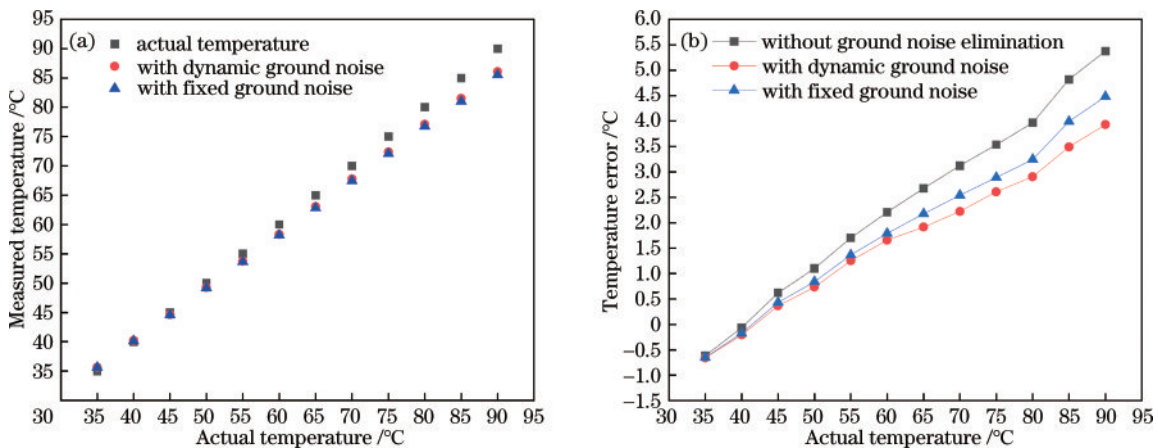


图 5 本底噪声修正前后不同温度对应的测量结果。(a)温度的测量结果;(b)测温误差

Fig. 5 Measurement results for different temperatures before and after the noise floor correction. (a) Measurement result of temperature; (b) temperature measurement error

大于消除固定本底噪声后的信噪比:当恒温箱温度为 50 °C 时,动态本底噪声校准前 DTS 系统的信噪比为 16.8 dB,校准后信噪比为 17.6 dB;当恒温箱温度为 75 °C 时,动态本底噪声校准前 DTS 系统的信噪比为 18.1 dB,校准后信噪比为 18.9 dB,增大了 0.8 dB。

4.3 瑞利噪声的抑制结果

由于波分复用器无法完全滤除瑞利背向散射光,用于温度解调的反斯托克斯光中含有部分瑞利噪声,导致测量温度值小于真实温度值,DTS 系统可消除瑞利噪声,进一步减小测温误差。设置水浴箱温度固定为 35 °C,恒温箱温度分别为 50、60、70、80 °C,利用式(9)计算出的瑞利噪声如图 6 所示。可以发现,温度或光纤长度增加时,瑞利噪声波动范围为 0.02~0.05 V,相比反斯托克斯光强的波动范围非常小。以 160~240 m 处光纤在 50、60、70、80 °C 时的瑞利噪声平均值(0.035 V)作为反斯托克斯光中的瑞利噪声,利用式(10)解调的温度及相应的测温误差如图 7 所示。可以发现,DTS 系统消除瑞利噪声后,测温误差大幅减小:当温度为 50 °C 时,测温误差为 0.2 °C;当温度为 90 °C 时,测温误差达到最大值,为 0.6 °C。相比未消除本底噪声、瑞利噪声的测量结果,测温误差最大减小了 4.8 °C;相比消

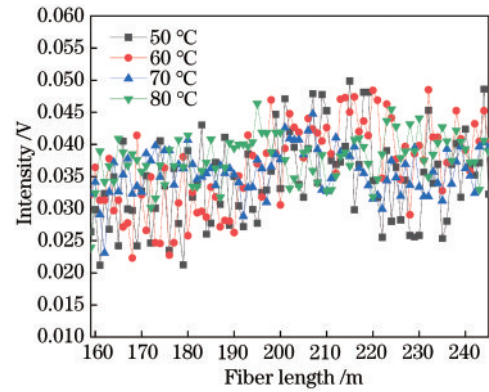


图 6 不同温度下计算的瑞利噪声

Fig. 6 Rayleigh noise calculated under different temperature

除本底噪声、未消除瑞利噪声的测量结果,测温误差最大减小了 3.3 °C;相比仅消除瑞利噪声的散射光强度比值法解调结果,测温误差提高了 0.2 °C^[12],且 DTS 系统只采用一个光电探测器、放大器和采集卡,系统结构简单、成本较低。此外:当恒温箱温度为 50 °C 时,DTS 系统消除瑞利噪声后的信噪比为 29.9 dB;恒温箱温度为 75 °C 时,DTS 系统的信噪比为 31.4 dB,消除瑞利噪声后,DTS 系统的信噪比提高了 12.3 dB。

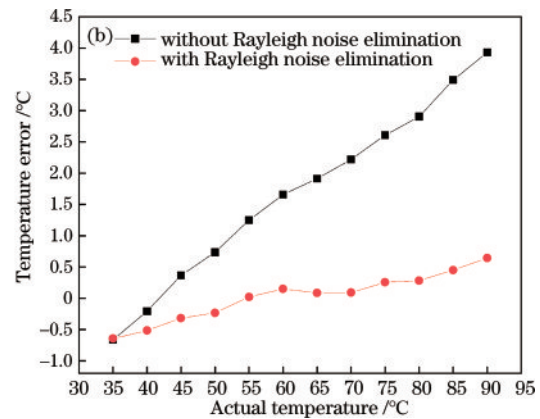
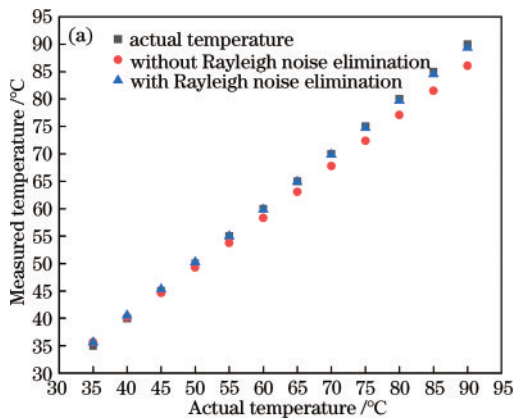


图 7 瑞利噪声修正前后的测量结果和测温误差。(a)温度的测量值;(b)测温误差

Fig. 7 Measurement results and temperature measurement errors before and after Rayleigh noise correction. (a) Measurement value of temperature; (b) temperature measurement error

为测量 DTS 系统的测温准确度,将恒温箱温度从 35 °C 逐渐升高至 90 °C,间隔为 5 °C,温度稳定后 DTS 系统连续测量光纤 III 上 200 m 处的散射光强度,每个温度值测量时间为 3 min,分别采用散射光强度比值法、反斯托克斯光自解调法及反斯托克斯光降噪解调法解调温度并求平均值,测温误差如图 8 所示。可以发现,温度较低时 3 种解调方法的测温误差相差不大,且随着温度升高,测温误差逐渐增大:温度为 90 °C 时散射光强度比值法的测温误差为 9.8 °C,测温准确度最低;反斯托克斯光自解调法的测温误差为 5.4 °C;反斯托克斯光降噪解调法的测温误差为 0.6 °C,测温准确度最高。

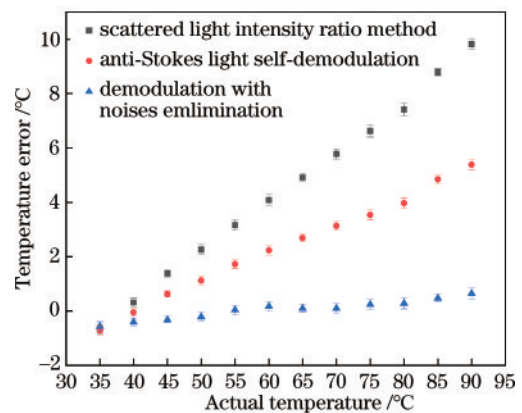


图 8 DTS 系统的测温误差

Fig. 8 Temperature measurement error of DTS system

5 结 论

分析了单端环形结构的 DTS 系统解调原理,理论分析和实验对比了散射光强度比值解调法和反斯托克斯光自解调法计算的测温误差及测温误差产生的原因,提出了同时消除本底噪声及瑞利噪声的方法。实验结果表明,相比散射光强度比值法,单端环形光纤结构的 DTS 系统采用反斯托克斯光自解调法测量温度,最大测温误差从 9.8 °C 减小至 5.4 °C,反斯托克斯光降噪解调法计算的最大测温误差降低至 0.6 °C,信噪比和测温准确度有明显提高。

参 考 文 献

- [1] Ren L, Jiang T, Jia Z G, et al. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology[J]. *Measurement*, 2018, 122: 57-65.
- [2] Di Francesca D, Girard S, Planes I, et al. Radiation hardened architecture of a single-ended Raman-based distributed temperature sensor[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, 64(1): 54-60.
- [3] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0100001.
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0100001.
- [4] 刘统玉, 王兆伟, 李振, 等. 激光/光纤传感技术研究及其在煤矿安全监测预警中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306016.
Liu T Y, Wang Z W, Li Z, et al. Advance of laser and fiber optic sensors for applications of coal mine safety monitoring and early warning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306016.
- [5] Liu Y P, Yin J Y, Fan X Z, et al. Distributed temperature detection of transformer windings with externally applied distributed optical fiber[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(29): 7962-7969.
- [6] Yan B Q, Li J, Zhang M J, et al. Raman distributed temperature sensor with optical dynamic difference compensation and visual localization technology for tunnel fire detection[J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2320.
- [7] 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.
- [8] Kwang S, Chung L. Auto-correction method for differential attenuation in a fiber-optic distributed-temperature sensor [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1845-1847.
- [9] 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.
- [10] Li J, Yu T, Zhang M J, et al. Temperature and crack measurement using distributed optic-fiber sensor based on Raman loop configuration and fiber loss[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 6802113.
- [11] Wang Z L, Zhang S S, Chang J, et al. Attenuation auto-correction method in Raman distributed temperature measurement system[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2013, 45(10): 1087-1094.
- [12] 孙苗, 汤玉泉, 杨爽, 等. 环形结构分布式温度传感器中瑞利噪声的抑制方法研究[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(11): 2070-2075.
Sun M, Tang Y Q, Yang S, et al. A Rayleigh noise elimination method in distributed temperature sensors with a loop configuration[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(11): 2070-2075.
- [13] Wang W J, Chang J, Lv G P, et al. Wavelength dispersion analysis on fiber-optic Raman distributed temperature sensor system[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(3): 256-261.
- [14] Chakraborty A L, Sharma R K, Saxena M K, et al. Compensation for temperature dependence of Stokes signal and dynamic self-calibration of a Raman distributed temperature sensor[J]. *Optics Communications*, 2007, 274(2): 396-402.
- [15] Li J, Li Y T, Zhang M J, et al. Performance improvement of Raman distributed temperature system by using noise suppression[J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(2): 103-113.
- [16] 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.
- [17] Wang Z L, Chang J, Zhang S S, et al. An adaptive Rayleigh noise elimination method in Raman distributed temperature sensors using anti-Stokes signal only[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2014, 46(6): 821-827.
- [18] 刘恒, 喻俊松, 万生鹏, 等. 基于 FPGA 的分布式拉曼光纤传感系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0506006.
Liu H, Yu J S, Wan S P, et al. Distributed Raman optical fiber sensing system based on FPGA[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0506006.
- [19] Yan B Q, Li J, Zhang M J, et al. Temperature accuracy and resolution improvement for a Raman distributed fiber-optics sensor by using the Rayleigh noise suppression method[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(1): 22-27.
- [20] Du H Z, Wu H, Zhang Z S, et al. Single-ended self-calibration high-accuracy Raman distributed temperature sensing based on multi-core fiber[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 34762-34769.