基于拉曼散射光动态校准的分布式光纤温度传感系统*

孙苗[1)] 杨爽[2)] 汤玉泉[2)†] 赵晓虎[2)3)] 张志荣[2)] 庄飞宇[3)]

1) (合肥师范学院物理与材料工程学院, 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, 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, 合肥 230601)

(2022 年 4 月 2 日收到; 2022 年 6 月 15 日收到修改稿)

分布式光纤温度传感 (distributed temperature sensor, DTS) 系统进行温度测量时, 参考光斯托克斯光强度随着温度的升高而增大, 使信号光反斯托克斯光与参考光斯托克斯光强度的比值减小, 测量温度小于真实温度, 降低系统的测温准确度. 本文提出并实验验证了一种新的动态校准法修正斯托克斯光信号, 可有效减小斯托克斯光导致的测温误差, 提高系统的测温准确度. 该方法根据参考光纤中的实时斯托克斯光强分布, 模拟出对应的整条光纤在参考温度环境中的斯托克斯光强度曲线, 实现斯托克斯光的温度响应修正. 实验结果表明, 与传统温度解调方法相比, 分布式光纤温度传感系统进行斯托克斯光动态校准后测温准确度最高提升 4.3 ℃. 与瑞利噪声抑制法联用后, 测温准确度提高 8.9 ℃. 本研究为 DTS 系统进行高温环境温度监测提供了一种新的解决方案.

关键词: 分布式光纤温度传感, 斯托克斯散射光, 校准, 测温准确度

PACS: 07.60.Vg, 42.79.–e, 42.87.–d **DOI:** 10.7498/aps.71.20220611

1 引 言

分布式光纤温度传感 (distributed temperature sensor, DTS) 系统利用光纤中的拉曼散射效应实现了空间温度场分布的实时连续测量. 与传统温度检测方法相比, DTS 系统具有抗电磁干扰、长距离大范围温度监测等优势, 被广泛用于道路隧道安全、油气管道泄露、火灾监测预警等领域[1–7].

光在光纤中传输时发生拉曼散射效应, 产生斯托克斯光和反斯托克斯光. 与斯托克斯光相比, 反斯托克斯光对温度变化非常敏感, DTS 系统常以斯托克斯光为参考光、反斯托克斯光为信号光, 采用散射光强度比值法和光时域反射技术对各个散射点进行温度解调和定位, 以消除光源扰动以及光纤损耗对测量温度的影响[8]. 为提高 DTS 系统的测温准确度, 研究者们做了大量的分析和研究工作, 主要集中于光纤色散[8–10]、噪声抑制[11–18] 和损耗补偿[19–23] 等方面, 但忽略了参考光斯托克斯光强度的温度响应对测温准确度的影响.

DTS 系统对光纤所处环境进行温度测量时, 光纤中的散射光强度随着被测区域温度的升高而

* 安徽省高校自然科学研究重点项目 (批准号: KJ2019A0722, KJ2021A0909)、光电探测科学与技术安徽高校联合重点实验室项目 (批准号: 2019GDTCZD01)、电子信息系统仿真设计安徽省重点实验室重点项目 (批准号: 2020ZDSYSZD03)、安徽省大学生创新创业训练项目 (批准号: 14098086) 和中国科学院合肥物质科学研究院院长基金青年“火花”项目 (批准号: YZJJ2020QN3, YZJJ2022QN02) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: laserway@aiofm.ac.cn

© 2022 中国物理学会 Chinese Physical Society

增强. 当环境温度升高 300 ℃ 时, 反斯托克斯光强变化约为 237%, 而斯托克斯光强也变化了 34%[24]. 由于被测区域光纤中的斯托克斯光强度局部增大, 使得反斯托克斯光与斯托克斯光的强度比值减小, 解调温度与实际温度存在偏差. 为减小测温误差, 传统方法是 DTS 系统进行温度测量前将整条传感光纤放置在同一温度下测量光纤中的斯托克斯光强分布, 作为固定的参考光解调温度. 这种校正方法可以消除斯托克斯光的温度响应造成的测温误差, 但是无法消除光源扰动的影响. 若测量过程中更换传感光纤等设备, 斯托克斯光强分布需要重新测量标定, 系统灵活性较差, 且测量标定过程中需要将光纤放置在同一温度下, 这一标定条件在很多工程应用中难以实现.

针对上述斯托克斯光影响 DTS 系统的测温准确度及现有校准方法使用灵活性较差等问题, 本文提出一种基于斯托克斯光动态校准的温度解调方法. 该方法对随着光纤所处环境温度升高而增大的斯托克斯背向散射光信号进行修正, 模拟整条光纤在参考温度下的斯托克斯光强度分布曲线. 利用 DTS 系统测量的反斯托克斯光强度与模拟的斯托克斯光强度的比值解调光纤所处环境的温度. 该方法避免了 DTS 系统测温前对整条光纤进行定标处理的过程, 消除了光源扰动对测量结果的影响. 实验结果表明, 采用斯托克斯光动态校准解调温度, 可以提高 DTS 系统的测温准确度.

2 温度解调原理

2.1 传统温度解调方法

激光脉冲在光纤中传输时发生拉曼散射效应, 产生的反斯托克斯光和斯托克斯光, 光通量可以表示为[20]

$$\Phi_{\mathrm{S}} = K_{\mathrm{S}} S \nu_{\mathrm{S}}^4 \varphi_{\mathrm{e}} R_{\mathrm{S}}(T) \exp[-(\alpha_{\mathrm{O}} + \alpha_{\mathrm{S}})L], \quad (1)$$

$$\Phi_{\mathrm{AS}} = K_{\mathrm{AS}} S \nu_{\mathrm{AS}}^4 \varphi_{\mathrm{e}} R_{\mathrm{AS}}(T) \exp[-(\alpha_{\mathrm{O}} + \alpha_{\mathrm{AS}})L], \quad (2)$$

其中, 下标 S, AS, O 分别表示斯托克斯拉曼散射光、反斯托克斯拉曼散射光和入射光, Φ 表示光通量, K 为与光纤散射截面有关的系数, S 为光纤背向散射因子, ν 为散射光子的频率, φ_{e} 为入射到光纤的激光脉冲的光通量, α_{O}, α_{S}, α_{AS} 为光纤中光的平均传输损耗, L 为激光脉冲在光纤内传输的距离, $R_{\mathrm{S}}(T)$, $R_{\mathrm{AS}}(T)$ 是背向散射光的温度调制函数. 其中

$$R_{\mathrm{S}}(T) = [1 - \exp(-h\Delta\nu/(kT))]^{-1}, \quad (3)$$

$$R_{\mathrm{AS}}(T) = [\exp(h\Delta\nu/(kT)) - 1]^{-1}, \quad (4)$$

式中, h 为普朗克常量, $\Delta\nu$ 为拉曼频移量, k 为玻尔兹曼常量, T 为光纤所处环境的温度.

利用反斯托克斯光强度与斯托克斯光强度之比解调温度时, 将所处环境温度为 T_0、长为 l_0 的光纤作为参考光纤, 解调温度表达式为

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k_{\mathrm{B}}}{h\Delta\nu}\left[\ln\frac{\phi_{\mathrm{AS}}(T)/\phi_{\mathrm{S}}(T)}{\phi_{\mathrm{AS}}(T_0)/\phi_{\mathrm{S}}(T_0)} + (\alpha_{\mathrm{AS}} - \alpha_{\mathrm{S}})(l - l_0)\right]. \quad (5)$$

通常情况下, 忽略反斯托克斯光和斯托克斯光的平均传输损耗差异, 解调温度为

$$T = \left[\frac{1}{T_0} - \frac{k_B}{h\Delta\nu}\ln\frac{\phi_{\mathrm{AS}}(T)/\phi_{\mathrm{S}}(T)}{\phi_{\mathrm{AS}}(T_0)/\phi_{\mathrm{S}}(T_0)}\right]^{-1}. \quad (6)$$

2.2 斯托克斯光动态校准法

与反斯托克斯光相比, 斯托克斯光对温度变化不敏感, 但随着温度的升高, 斯托克斯光强度也逐渐增大. 当采用散射光强度比值法解调温度时, 参考光的斯托克斯光强度发生变化, 导致解调温度值偏小. 为减小因斯托克斯光强度的温度响应导致的测温误差, 本文提出斯托克斯光动态校准法对 DTS 系统解调的温度进行校正.

在均匀、未断裂的光纤中, 拉曼散射光信号沿光纤长度的增加呈指数衰减. DTS 系统进行温度测量时, 以光纤首端长为 l_0 的光纤作为参考光纤, 放置在温度为 T_0 的环境中, 参考光纤中斯托克斯光通量的实时分布如 (1) 式所示, 对 (1) 式进行对数运算, 可得

$$\ln\Phi_{\mathrm{S0}} = -(\alpha_{\mathrm{O}} + \alpha_{\mathrm{S}})L + \ln[K_{\mathrm{S}} S \nu_{\mathrm{S}}^4 \varphi_{\mathrm{e}} R_{\mathrm{S}}(T)], \quad (7)$$

其中 Φ_{S0} 表示实时测量的参考光纤中的背向斯托克斯光通量. 通过曲线拟合 (L, $\ln\Phi_{\mathrm{S0}}$) 计算斯托克斯光的衰减系数 $-(\alpha_{\mathrm{O}} + \alpha_{\mathrm{S}})$. 温度为 T_0 时光纤首端长为 l_{01} 处的斯托克斯光通量记为 $\Phi_{\mathrm{S0}}(T_0, l_{01})$, 利用衰减系数进行指数拟合可以推导出其余光纤在温度为 T_0 时的斯托克斯光通量, 则光纤中任意位置处 (假设光纤在该位置处的长度为 l) 的斯托克斯光通量为

$$\Phi_{\mathrm{Sn}}(T_0, l) = \Phi_{\mathrm{S0}}(T_0, l_{01})\exp[-(\alpha_{\mathrm{O}} + \alpha_{\mathrm{S}})(l - l_{01})]. \quad (8)$$

(8) 式为根据参考光纤中的实时斯托克斯光通量计算得到的整条光纤处于温度为T_0的环境中时光纤中的背向斯托克斯光通量, 即动态斯托克斯光通量. 以动态斯托克斯光通量为参考光, 以实时测量的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, (2) 式除以 (8) 式可得:

$$\frac{\phi_{\mathrm{AS}}(T)}{\phi_{\mathrm{Sn}}(T_0)}=\frac{K_{\mathrm{AS}}}{K_{\mathrm{S}}}\frac{\nu_{\mathrm{AS}}^4}{\nu_{\mathrm{S}}^4}\frac{R_{\mathrm{AS}}(T)}{R_{\mathrm{S}}(T_0)}\exp[-(\alpha_{\mathrm{AS}}-\alpha_{\mathrm{S}})l]. \quad (9)$$

利用参考光纤消除与光纤散射截面有关的系数, 忽略反斯托克斯光和斯托克斯光的平均传输损耗差异, 最终解调温度为

$$\frac{1}{T}=\frac{k}{h\Delta\nu}\ln\left\{\frac{\phi_{\mathrm{AS}}(T_0,l_0)/\phi_{\mathrm{Sn}}(T_0,l_0)}{\phi_{\mathrm{AS}}(T)/\phi_{\mathrm{Sn}}(T_0)}\times\left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_0}\right)-1\right]+1\right\}. \quad (10)$$

通过参考光纤中的实时斯托克斯光信号求解衰减系数, 从而推导出整条光纤处于T_0温度时的斯托克斯光通量, 以动态斯托克斯光通量作为参考光解调温度, 可以减小斯托克斯光强度的温度响应导致的测温误差, 而且不需要将整条光纤放在同一温度下获得斯托克斯光强度分布, 方便快捷.

3 实验装置

DTS 系统的实验装置如图 1 所示. 脉冲激光器 (laser) 发出脉宽 10 ns、重复频率 20 kHz 的激光脉冲经隔离度 35—40 dB 的 1×3 波分复用器 (wavelength division multiplexer, WDM) 进入传感光纤. 脉冲光在光纤中发生拉曼散射效应, 产生斯托克斯拉曼散射光和反斯托克斯拉曼散射光, 其中, 背向斯托克斯光和反斯托克斯光再经波分复用器滤波进入低噪声光电探测器 (avalanche photodiode, APD) 完成光电转换和放大, 输出的信号被双通道高速采集卡 (data acquisition card, DAQ) 采集平均后传输至计算机进行处理和存储. 实验中传感光纤长度为 1800 m, 主要分为 4 部分, 其中光纤 I(长度为 90 m) 放置在水浴箱中作为参考光纤, 光纤 III(长度为 90 m) 放置在恒温箱中, 作为测试光纤, 光纤 II(长度为 70 m) 和剩余光纤 (长度为 1550 m) 放置在室温环境中.

4 实验结果和讨论

对所搭建的 DTS 系统进行温度测量实验. 将参考光纤 I 所在水浴箱的温度设置为 35 ℃, 测温光纤 III 所在的恒温箱温度从 35 ℃ 逐渐升高至 90 ℃, 每次升高 5 ℃, 剩余光纤放置在室温环境中. 当恒温箱温度为 35 ℃, 50 ℃ 和 75 ℃ 时, DTS 系统采集的斯托克斯光强度和反斯托克斯光强度如图 2(a) 所示. 从图 2(a) 可以看出, 随着恒温箱温度的升高, 反斯托克斯光强度显著增强, 参考光斯托克斯光强度的增强也非常明显. 当恒温箱温度从 35 ℃ 升高到 90 ℃ 时, 测温光纤 180 m 位置处的斯托克斯光和反斯托克斯光强度的归一化结果如图 2(b) 所示. 恒温箱温度升高时, 光纤中的反斯托克斯光比斯托克斯光表现出更强的温度灵敏度, 当温差为 55 ℃ 时, 反斯托克斯光强度增大了 40.8%, 斯托克斯光增大了 12.2%. 虽然反斯托克斯光强度比斯托克斯光强度增大得多, 但斯托克斯光强度的温度响应也不容忽视, 且恒温箱温度越高, 斯托克斯光强度的增量越大, 导致的系统误差也越大, 因此, 需要对斯托克斯光强度进行修正和校准以减小 DTS 系统的测温误差.

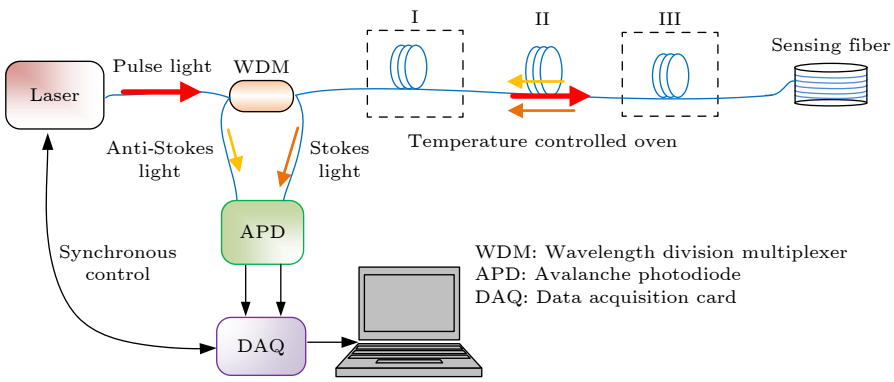

图 1 DTS 系统的实验装置图

Fig. 1. The experimental setup of the DTS system.

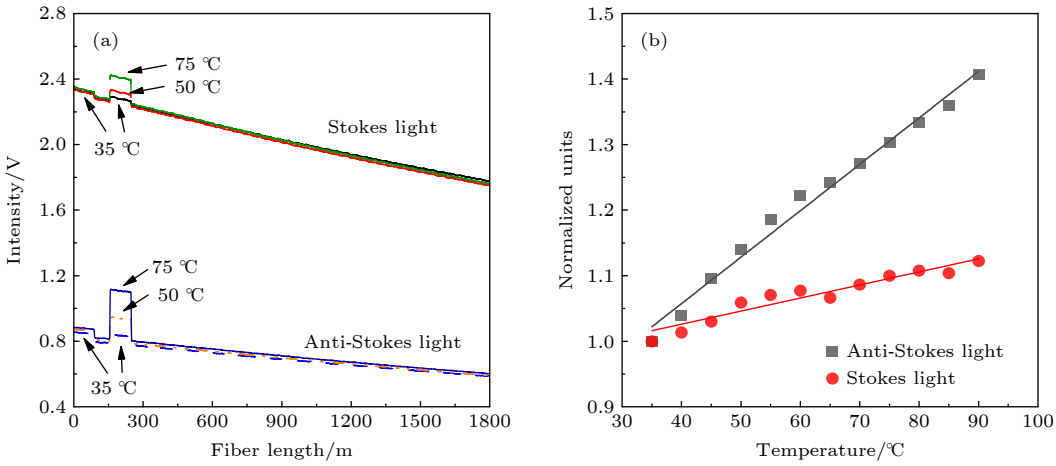

图 2 (a) 光纤中的背向散射光分布; (b) 不同温度下归一化的散射光强度图

Fig. 2. (a) Backscattered lights distribution along the fiber; (b) variation of normalized Raman signals with temperature.

图 3 所示为恒温箱温度为 50 ℃ 和 75 ℃ 时光纤中的实时斯托克斯光强曲线及斯托克斯光强指数拟合曲线, 衰减系数分别为 -1.39476×10^{-4} 和 -1.47946×10^{-4}. 由于光源扰动的影响, 当光纤所处环境一致时 DTS 系统采集到的斯托克斯光强度曲线并不重合. 利用实时采集的参考光纤中的斯托克斯光强度分布模拟得到整条光纤的斯托克斯光强度分布, 对斯托克斯光进行动态校准, 指数拟合后的斯托克斯光强度曲线与原曲线吻合度较高, 消除了光源扰动和恒温箱温度变化的影响.

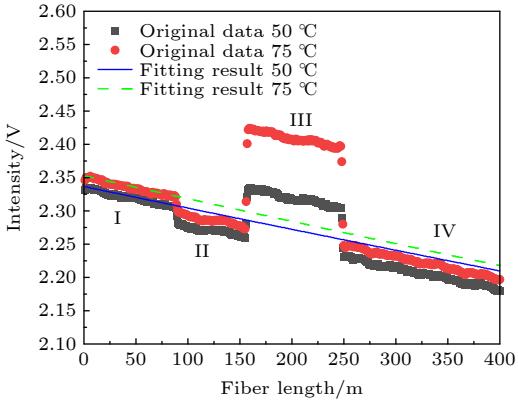

图 3 原始的斯托克斯光信号和指数拟合的斯托克斯光信号

Fig. 3. Original Stokes signals and exponential fits.

分别采用传统温度解调方法 (6) 式和斯托克斯光动态校准法 (10) 式解调的温度及相应的测温误差如图 4 所示. 当恒温箱温度为 35 ℃ 时, 传统温度解调方法和斯托克斯光动态校准法解调的温度分别为 35.3 ℃ 和 35.4 ℃, 此时 DTS 系统的测温误差最小, 原因是被测温度与参考温度一致, 斯托克斯光强度变化非常小, 所以两种方法解调的温度几乎一致. 随着恒温箱温度升高, 测量温度逐渐偏离真实温度, 当恒温箱温度为 90 ℃ 时, 传统温度解调方法解调的温度为 79.8 ℃, 测温误差为 10.2 ℃. 由于恒温箱温度升高, 斯托克斯光强度逐渐增大, 使信号光反斯托克斯光与斯托克斯光强度的比值相对减小, 导致 DTS 系统存在测温误差, 因此被测温度越高, 测温误差越大. 经过斯托克斯光动态校准后 DTS 系统测量的温度为 84.1 ℃, 最大测温误差从 10.2 ℃ 降低到 5.9 ℃, 测温准确度有明显提升. 被测环境温度越高, 斯托克斯光强度变化越显著, 测温误差越大, 因此 DTS 系统进行高温环境温度监测时可以使用斯托克斯光动态校准法进行温度修正.

由于 DTS 系统的测温准确度不仅受斯托克斯光强温度响应的影响, 还受散射光中的瑞利噪声、光电探测器噪声、散射光损耗差异、光纤色散等影响, 因此经过斯托克斯光动态校准后的测量温度还存在误差. 斯托克斯光动态校准可以与噪声抑制等方法联用进一步提高 DTS 系统的测温准确度. 当 DTS 系统的激光器参数、光电探测器所处环境和光纤的种类确定后, 拉曼散射光中的瑞利噪声可以看作固定值, 通过参考光纤 I 的 3 组温度及对应信号值可以解出斯托克斯光和反斯托克斯光中的瑞利噪声; 分别设置水浴箱温度为 35 ℃, 55 ℃ 和 75 ℃, 计算出斯托克斯光和反斯托克斯光中的瑞利噪声平均值分别为 0.289 V 和 0.109 V[21]. DTS 系统使用传统的温度解调方法消除瑞利噪声后的测量温度与斯托克斯光动态校准并消除瑞利噪声

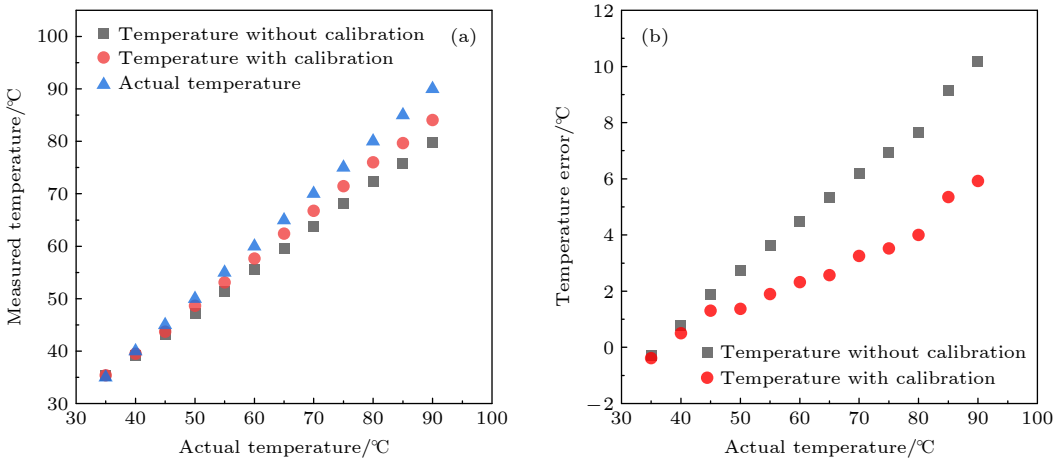

图 4 不同被测温度对应的测量结果 (a) 温度测量值; (b) 温度测量误差

Fig. 4. Demodulated temperature versus different measured temperature: (a) Measured temperature; (b) temperature error.

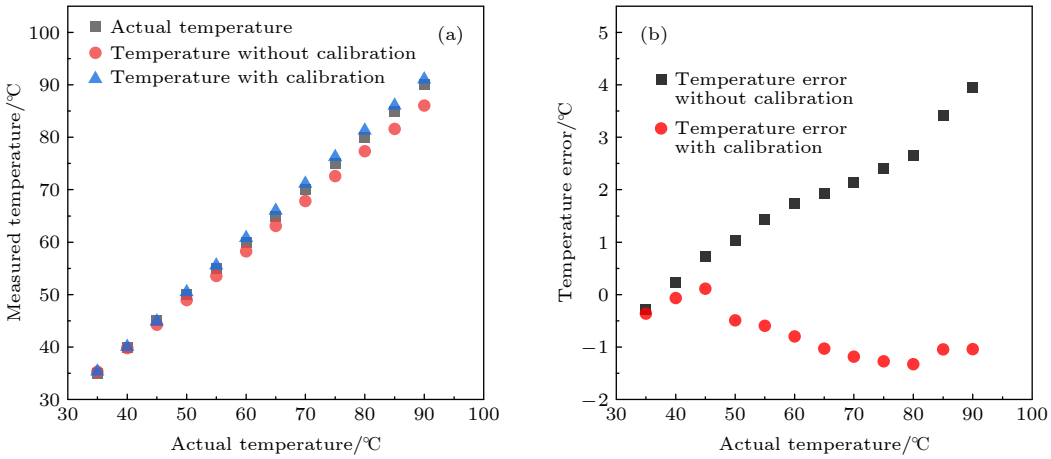

图 5 DTS 系统的测温结果 (a) 斯托克斯光动态校准前后消除瑞利噪声的测量温度; (b) 斯托克斯光校准前后消除瑞利噪声的测温误差

Fig. 5. Temperature measurement results in DTS system: (a) Measurement temperature results without Rayleigh noise before and after Stokes light dynamic calibration; (b) temperature error without Rayleigh noise before and after Stokes light dynamic calibration.

后的测量温度如图 5(a) 所示, 对应的测温误差如图 5(b) 所示. 从图中可以看出, 消除瑞利噪声后, 系统的测温准确度显著提高. 相比于未进行斯托克斯光动态校准直接消除瑞利噪声, 测温误差减小值最高达 2.6 ℃, 与未进行斯托克斯光动态校准未消除瑞利噪声相比, 测温误差减小值最高达 8.9 ℃.

5 结 论

针对 DTS 系统温度解调中斯托克斯光强的温度响应导致的测温误差, 本文提出一种动态校准法修正斯托克斯拉曼散射光. 通过计算指数拟合的参考温度下的斯托克斯光强度分布, 利用实时测量的反斯托克斯光强度与模拟的斯托克斯光强度的比值解调被测温度, 校正了由于参考光斯托克斯光的温度响应导致的测温误差. 理论分析及实验结果表明, 斯托克斯光动态校准法可有效减小测温误差, 提高 DTS 系统的测温准确度. 与传统温度解调方法相比, DTS 系统使用斯托克斯光动态校准法后测温准确度最大提高了 4.3 ℃; 与瑞利噪声抑制法联用, DTS 系统的测温准确度提高了 8.9 ℃. 被测环境温度越高, 斯托克斯光强度的变化越大, 导致的测温误差越大, 本研究为 DTS 系统进行高温环境温度监测提供了一种新的温度校正方法.

参考文献

[1] Ren L, Jiang T, Jia Z G, Li D S, Yuan C L, Li H N 2018 *Measurement* **122** 57

[2] Francesca D D, Girard S, Planes I, et al. 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 54

[3] Liu Y P, Yin J Y, Fan X Z, Wang B W 2019 *Appl. Opt.* **58** 7962

[4] Yan B Q, Li J, Zhang M J, Zhang J Z, Qiao L J, Wang T 2019 *Sensors* **19** 2320

[5] Yilmaz G, Karlik S E 2006 *Sensor Actuat A-Phys.* **125** 148

[6] Rao Y J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 074207 (in Chinese) [饶云江 2017 物理学报 **66** 074207]

[7] Liu T G, Yu Z, Jiang J F, Liu K, Zhang X Z, Ding Z Y, Wang S, Hu H F, Han Q, Zhang H X, Li H Z 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 070705 (in Chinese) [刘铁根, 于哲, 江俊峰, 刘琨, 张学智, 丁振扬, 王双, 胡浩丰, 韩群, 张红霞, 李志宏 2017 物理学报 **66** 070705]

[8] Zhang M J, Li J, Liu Y, Zhang J Z, Li Y T, Huang Q, Liu R X, Yang S J 2017 *Chin. Laser* **44** 0306002 (in Chinese) [张明江, 李健, 刘毅, 张建忠, 李云亭, 黄琦, 刘瑞霞, 杨帅军 2017 中国激光 **44** 0306002]

[9] Wang W J, Chang J, Lv G P, Wang Z L, Liu Z, Luo S, Jiang S, Liu X Z, Liu X H, Liu Y N 2013 *Photonic Sens.* **3** 256

[10] Yang R, Li X Y, Gao X 2015 *Acta Photon. Sin.* **44** 1006006 (in Chinese) [杨睿, 李小彦, 高翔 2015 光子学报 **44** 1006006]

[11] Sun B N, Chang J, Lian J, Wang Z L, Lv G P, Liu X Z, Wang W J, Zhou S, Wei W, Jiang S, Liu Y N, Luo S, Lu X H, Liu Z, Zhang S S 2013 *Opt. Commun.* **306** 117

[12] Yan B Q, Li J, Zhang M J, Xu Y, Yu T, Zhang J Z, Qiao L J, Wang T 2020 *Appl. Opt.* **59** 22

[13] Wang Z L, Chang J, Zhang S S, Luo S, Jia C W, Jiang S, Sun B N, Liu Y N, Wei W, Liu X H, Lv G P 2015 *Optik* **126** 270

[14] Wang Z L, Chang J, Zhang S S, Sun B N, Jiang S, Luo S, Jia C W, Liu Y N, Liu X H, Lv G P, Liu X Z 2014 *Opt. Quant. Electron.* **46** 821

[15] Li J, Li Y T, Zhang M J, Liu Y, Zhang J J, Yan B Q, Wang D, Jin B Q 2017 *Photonic Sens.* **8** 103

[16] Li Y T, Zhang M J, Liu Y, Zhang J Z 2017 *Optoelectron. Eng.* **34** 20 (in Chinese) [李云亭, 张明江, 刘毅, 张建忠 2017 光电工程 **34** 20]

[17] Tang Y Q, Sun M, Li J, Yang S, Brian C, Dong F Z 2015 *Acta Photon. Sin.* **44** 112 (in Chinese) [汤玉泉, 孙苗, 李俊, 杨爽, Brian Culshaw, 董凤忠 2015 光子学报 **44** 112]

[18] Wang Z L, Chang J, Zhang S S, Luo S, Jia C W, Jiang S, Sun B N, Liu Y N, Liu X H, Lv G P 2015 *IEEE Sens. J.* **15** 1061

[19] Suh K, Lee C 2008 *Opt. Lett.* **33** 1845

[20] Wang Z L, Zhang S S, Chang J, Lv G P, Wang W J, Jiang S, Liu X Z, Liu X H, Luo S, Sun B N, Liu Y N 2013 *Opt. Quant. Electron.* **45** 1087

[21] Sun M, Tang Y Q, Yang S, Li J, Brain C, Dong F Z 2015 *J. Optoelectron. Laser* **26** 2070 (in Chinese) [孙苗, 汤玉泉, 杨爽, 李俊, Brian Culshaw, 董凤忠 2015 光电子·激光 **26** 2070]

[22] Wang Z, Sun X H, Xue Q, Wang Y L, Qi Y L, Wang X S 2017 *Opt. Laser Technol.* **93** 224

[23] Ma T B, Zi B W, Guo Y C, Ling L Y, Huang Y R, Jia X F 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 030701 (in Chinese) [马天兵, 訾保威, 郭永存, 凌六一, 黄友锐, 贾晓芬 2020 物理学报 **69** 030701]

[24] Chakraborty A L, Sharma R K, Saxena M K, Kher S 2007 *Opt. Commun.* **274** 396

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

Sun Miao [1)] Yang Shuang [2)] Tang Yu-Quan [2)†] Zhao Xiao-Hu [2)3)]
Zhang Zhi-Rong [2)] Zhuang Fei-Yu [3)]

1) (*College of Physics and Materials Engineering, Hefei Normal University, Hefei* 230601, *China*)

2) (*Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Material, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei* 230031, *China*)

3) (*Anhui Province Key Laboratory of Simulation and Design for Electronic Information System, Hefei Normal University, Hefei* 230601, *China*)

(Received 2 April 2022; revised manuscript received 15 June 2022)

Abstract

In a distributed fiber optic temperature sensing system, the intensity of Raman Stokes backscattering light serving as reference light increases with the increase of temperature, leading to measurement errors in the system. A novel method of dynamically calibrating Raman Stokes backscattering light intensity is proposed to improve temperature accuracy for distributed fiber optic temperature sensors. According to the real-time Stokes intensity distribution in the reference fiber, Stokes intensity curve of the whole fiber at a reference temperature is simulated, and the temperature response of Stokes light is corrected. The ratio of Raman anti-Stokes light intensity to the calculated Stokes light intensity is used to demodulate temperature along the fiber. The experimental results indicate that the temperature accuracy of the distributed optical fiber temperature sensor system after making the Stokes optical dynamic calibration is increased up to 4.3 ℃ compared with that from the conventional method. And the accuracy of temperature measurement is improved by 8.9 ℃ when combined with Rayleigh noise suppression method. This study provides a new solution for a distributed fiber optic temperature sensor system to monitor high temperature environment temperature.

Keywords: distributed fiber optic temperature sensor, Raman Stokes backscattering light, calibration, temperature accuracy

PACS: 07.60.Vg, 42.79.–e, 42.87.–d **DOI:** 10.7498/aps.71.20220611

* Project supported by the Key Projects of Natural Science Research in Colleges and Universities of Anhui Province, China (Grant Nos. KJ2019A0722, KJ2021A0909), the Universities Joint Key Laboratory of Photoelectric Detection Science and Technology in Anhui Province, China (Grant No. 2019GDTCZD01), the Key Projects of Anhui Province Key Laboratory of Simulation and Design for Electronic Information System (Hefei Normal University), China (Grant No. 2020ZDSYSZD03), the Innovation and Entrepreneurship Training Program for Anhui College Students, China (Grant No. 14098086), and the Dean's Fund Project of Hefei Research Institute, Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. YZJJ2020QN3, YZJJ2022QN02).

† Corresponding author. E-mail: laserway@aiofm.ac.cn

物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

基于拉曼散射光动态校准的分布式光纤温度传感系统

孙苗 杨爽 汤玉泉 赵晓虎 张志荣 庄飞宇

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

Sun Miao Yang Shuang Tang Yu-Quan Zhao Xiao-Hu Zhang Zhi-Rong Zhuang Fei-Yu

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 71, 200701 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220611

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.71.20220611

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

基于拟合衰减差自补偿的分布式光纤温度传感器

Distributed optical fiber temperature sensor based on self-compensation of fitting attenuation difference

物理学报. 2020, 69(3): 030701 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191456

基于混合飞秒/皮秒相干反斯托克斯拉曼散射的动态高温燃烧场温度测量

Thermometry in dynamic and high-temperature combustion filed based on hybrid femtosecond/picosecond coherent anti-Stokes Raman scattering

物理学报. 2021, 70(21): 214203 https://doi.org/10.7498/aps.70.20211144

分子离子碎裂过程中动能释放的校准方法

Methods of calibrating kinetic energy release in dissociation process of molecular dications

物理学报. 2020, 69(20): 203401 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200901

液相硝基甲烷分子振动特性的相干反斯托克斯拉曼散射光谱

Coherent anti-Stokes Raman scattering spectrum of vibrational properties of liquid nitromethane molecules

物理学报. 2018, 67(2): 024208 https://doi.org/10.7498/aps.67.20171828

毫米级高分辨率的混沌激光分布式光纤测温技术

Distributed temperature measurement with millimeter-level high spatial resolution based on chaotic laser

物理学报. 2019, 68(10): 104208 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190018

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