

基于拟合衰减差自补偿的分布式光纤温度传感器

马天兵 訾保威 郭永存 凌六一 黄友锐 贾晓芬

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

Ma Tian-Bing Zi Bao-Wei Guo Yong-Cun Ling Liu-Yi Huang You-Rui Jia Xiao-Fen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 030701 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191456

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191456>

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

分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展

Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research

物理学报. 2017, 66(7): 070705 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070705>

基于相干光时域反射型的光纤分布式声增敏传感研究

Research on improving detection sensitivity to acoustic based on coherent-OTDR distributed fiber-sensing system

物理学报. 2017, 66(7): 070706 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070706>

长距离分布式光纤传感技术研究进展

Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing

物理学报. 2017, 66(7): 074207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074207>

啁啾相移光纤光栅分布式应变与应变点精确定位传感研究

Phase shift chirped fiber Bragg grating based distributed strain and position sensing

物理学报. 2017, 66(7): 070702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070702>

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>

基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器

Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect

物理学报. 2017, 66(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.094205>

基于拟合衰减差自补偿的分布式光纤温度传感器*

马天兵^{1)2)3)†} 訾保威²⁾³⁾ 郭永存¹⁾²⁾³⁾ 凌六一¹⁾²⁾
黄友锐¹⁾²⁾ 贾晓芬²⁾

1) (安徽理工大学, 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 淮南 232001)

2) (安徽理工大学, 矿山智能装备与技术安徽省重点实验室, 淮南 232001)

3) (安徽理工大学机械工程学院, 淮南 232001)

(2019 年 9 月 24 日收到; 2019 年 10 月 18 日收到修改稿)

针对斯托克斯光和反斯托克斯光的本质损耗、附加损耗使分布式光纤温度传感器产生测温误差的问题, 通过对分布式光纤温度传感器的温度解调原理的研究, 提出了拟合斯托克斯光与反斯托克斯光之间衰减差的方法实现温度自补偿, 以此减小测温误差. 以传感光纤上不同位置的两部分作为参考段和测温段, 参考段的光信号作为测温段拟合多阶衰减差和解调温度的参量, 通过引入多阶拟合结果解调温度, 减小因斯托克斯光和反斯托克斯光的本质损耗、附加损耗导致的温度误差, 实现温度的初步修正. 改变光纤上同一位置的温度, 取 3 组不同温度值及对应信号值计算引入拟合衰减差前后的瑞利噪声, 分析了瑞利噪声与光纤长度和温度的关系, 通过引入拟合衰减差消除瑞利噪声, 减小了斯托克斯光和反斯托克斯光的本质损耗、附加损耗导致的瑞利噪声误差, 实现温度的再次修正. 分析比较多阶衰减差拟合结果对测温误差以及消除瑞利噪声的影响, 获得最优拟合阶次. 在拟合因参考段的附加损耗而导致的测温段的附加误差后, 通过拟合结果进行温度补偿, 完成了最终温度修正. 实验结果表明, 在 30—90 °C, 引入一阶线性拟合结果的温度修正效果最好, 经过三次修正后, 测温误差从 10.50 °C 降低至 0.90 °C.

关键词: 温度, 分布式光纤, 拟合衰减差, 自修正

PACS: 07.60.Vg, 42.79.-e, 42.87.-d

DOI: 10.7498/aps.69.20191456

1 引言

煤矿井下绝大多数的自燃发火都是发生在回采工作面的采空区内或相邻的老空区内, 温度范围通常为 30—60 °C, 由于采空区火源点的无法接近性和隐蔽性, 往往无法确定火源的实际位置, 导致防火工作往往存在很大的盲目性, 因此研究采空区火源点的空间分布具有重要的理论和实践意义. 目前的火灾预警技术主要有温度测定法^[1]和气体探测法^[2–5], 前者采用的传感器在线性范围内的温度检测上限能够达到 150 °C, 但大多只能测量和记录

传感点处的温度, 无法对温度场的空间分布进行实时测量, 后者能够根据气体成分判断温度范围, 但该方法有较长的抽气管路, 会导致分析值滞后、管路堵塞、管理难度大等问题. 光纤光栅温度传感器可以满足温度测量范围及实时性的要求, 但其制作复杂、成本高, 无法满足煤矿井下分布式温度检测的要求. 分布式光纤拉曼温度传感器 (Raman distributed optical fiber temperature sensor, RDTS) 是近年发展起来的可以连续监测空间温度场变化的光纤传感技术^[6], RDTS 被广泛应用于温度及应变测量领域^[7–9], 与传统温度传感器相比, RDTS 使用光纤作为传感和信号传输介质, 因此具

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFC060908) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dfmtb@163.com

有屏蔽性好、耐高温、抗辐射^[10]、抗电磁干扰、本质绝缘、耐腐蚀、可以实现长距离分布式测量等优点,被广泛应用于能源、国防、土木工程等领域^[11–15].

光纤中产生的反斯托克斯光对温度非常敏感,而斯托克斯光对温度不敏感,因此可以利用反斯托克斯光作为信号光,斯托克斯光作为参考光,通过求解反斯托克斯光与斯托克斯光的比值解调温度,结合光时域反射技术确定各个散射点的发生位置,从而准确地测量出光纤分布场中各个点的温度变化情况,实现对温度场的测量^[16–20]. 由于斯托克斯光和反斯托克斯光的波长不同,因此其在光纤中背向传输时存在本质损耗差异. 同种材料光纤中斯托克斯光和反斯托克斯光在光纤发生弯曲、受到应力尤其是环境温度变化时会产生附加损耗,因此直接对二者的衰减系数做近似相等处理会为温度解调结果带来误差. 目前采用的修正方法有反斯托克斯光端面反射修正法^[21]、双光源修正法^[22]、双端环路修正法^[23,24]等. 反斯托克斯光端面反射修正法和双光源修正法虽然可以完全消除因不同波长引起的本质损耗差异,但是前者的激光器的稳定性和后者的光源切换稳定性均会给温度解调带来新的误差;双端环路修正法和拟合修正法虽然可以实现本质损耗差异修正,但仍然无法消除传感光纤环境改变引起的附加损耗差异对系统温度解调结果的影响^[25]. 激光脉冲在传感光纤中传输时会产生瑞利散射光,其波长与入射光波长一致,强度比反斯托克斯拉曼散射光强度约高 30 dB^[26]. 在分布式温度传感系统中,通常使用波分复用器(wavelength division multiplexing, WDM)对光纤中的背向散射光进行分光和滤波,将光纤传感系统中的不同光信号通过不同光信道各自传输信息^[27]. 但 WDM 的光隔离度约为 35—40 dB,不能完全滤除瑞利散射光. 因此,在采集到的反斯托克斯拉曼散射光与斯托克斯拉曼散射光中含有瑞利散射光(即瑞利噪声),导致用斯托克斯光与反斯托克斯光的比值解调温度时,解调的温度与实际温度存在较大的误差^[16]. 光纤的参考段在温度变化较大的环境下,会使测温段产生测温附加误差^[28]. 基于拟合反斯托克斯光与斯托克斯光之间的衰减差补偿本质损耗和附加损耗,并在此基础上消除瑞利噪声和补偿附加误差的方法在目前提出的温度修正方法^[26,28,29]中鲜有报道. 在实际工程应用中,作为传感元件的光缆平铺在待测区域内,光缆内含有多条光纤,在

光缆的末端将两条光纤相互熔接构成单根传感光纤,使其等同于单根传感光纤在测量环境内的折返铺设,由于光纤在同一条光缆内,因此光缆的每个测量点处均有两段不同光纤,且该两段光纤的位置及环境温度具有一致性,为本文所述方法的实现提供了基础. 光缆的内部结构及材料对光纤的保护作用,能够有效降低测量光纤所受的压力、变形、弯曲等外部干扰,同时选用小直径、包层模量大的光纤减小其与填充材料之间的相互力学作用^[30],进一步降低了外部干扰对光纤的影响.

本文从分布式拉曼温度传感器的温度解调原理出发,研究了在环境温度变化下的斯托克斯光与反斯托克斯光衰减系数差和温度的关系,将多阶拟合结果引入温度解调方程中,根据解调结果确定了最优拟合阶次,用最优衰减差拟合结果修正不同波长引起的本质损耗和温度变化引起的附加损耗,解决了对斯托克斯光与反斯托克斯光做近似相等处理或使用经验值为温度解调结果带来的误差问题,通过最优拟合结果和光纤同一位置的 3 组不同温度及对应信号值,计算并消除瑞利噪声后再解调温度,经过降低因光纤参考段传输附加损耗使测温段产生的测温附加误差,完成最终温度修正. 实验表明,光纤温度在 30—90 °C 范围内,衰减系数差的一阶线性拟合结果对解调出的温度值修正幅度最大,测温误差从 10.50 °C 降低到了 0.90 °C,有效降低了测温误差,提高了系统准确度.

2 温度修正基本原理

RDTS 系统中的脉冲激光经过传感光纤产生的拉曼背向散射光通量可表示为^[29,31]

$$\phi_i = h\nu_i\eta_i\Delta f_i P_0 \lg R N_i D \exp[-(\alpha_0 + \alpha_i)l], \quad (1)$$

其中,下标 i 代表 st 或 as,分别指斯托克斯和反斯托克斯散射光; ϕ_i 表示单位时间内的散射光强; h 为普朗克常数; ν_i 表示光子频率; η_i 为探测器的探测效率与滤波器的传输系数乘积; Δf_i 为系统中斯托克斯光和反斯托克斯光通道的滤波器带宽; P_0 表示脉冲激光的峰值功率; l 为光纤长度; g_R 为拉曼增益系数; D 为激光脉冲占空比; α_0 和 α_i 分别为入射光和散射光的衰减系数; N_i 为斯托克斯和反斯托克斯散射光能级上的光子数. N_i 的值服从玻尔兹曼分布,可表示为^[25]

$$N_i = \frac{1}{\exp\left(\frac{h\Delta v}{k_B T_l}\right) - 1}, \quad (2)$$

其中, k_B 表示玻尔兹曼常数, T_l 为光纤在长度 l 处位置的温度, Δv 为拉曼频移量. 在温度解调过程中, 采用对温度不敏感的斯托克斯光作为参考光, 对温度非常敏感的反斯托克斯光作为信号光, 通过斯托克斯与反斯托克斯光的比值解调温度, 比值可表示为

$$F(l, T) = \frac{\phi_{st}(l)}{\phi_{as}(l)} = C \exp\left(\frac{h\Delta v}{k_B T_l}\right) \exp[(\alpha_{st} - \alpha_{as})l], \quad (3)$$

其中 ϕ_{st} , ϕ_{as} 分别为被测位置拉曼散射光中的斯托克斯光通量和反斯托克斯光通量, C 为系统确定后探测器的探测效率、相对拉曼增益等常量. 将 (3) 式等号两边同时取对数可得

$$\ln(F(l, T_l)) = \ln C + \frac{h\Delta v}{k_B T_l} + (\alpha_{st} - \alpha_{as})l. \quad (4)$$

若传感光纤总长为 L , 则距离光纤首端 l_0 处和 $L - l_0$ 处可由 (4) 式得

$$\ln(F(l_0, T_{l_0})) = \ln C + \frac{h\Delta v}{k_B T_{l_0}} + (\alpha_{st} - \alpha_{as})l_0, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \ln(F(L - l_0, T_{L-l_0})) \\ &= \ln C + \frac{h\Delta v}{k_B T_{L-l_0}} + (\alpha_{st} - \alpha_{as})(L - l_0). \end{aligned} \quad (6)$$

以 l_0 位置的温度 T_0 作为已知温度环境, 由 (4) 和 (5) 式可以解调出光纤上任意点的温度为

$$T_l = \left\{ \frac{k_B}{h\Delta v} \left[\ln \frac{F(l, T_l)}{F(l_0, T_{l_0})} - (\alpha_{st} - \alpha_{as})(L - l_0) \right] + \frac{1}{T_0} \right\}^{-1}. \quad (7)$$

通常情况下认为 $\alpha_{st} \approx \alpha_{as}$, 则根据 (7) 式得温度解调结果为

$$T_l = \left\{ \frac{k_B}{h\Delta v} \ln \frac{F(l, T_l)}{F(l_0, T_{l_0})} + \frac{1}{T_0} \right\}^{-1}. \quad (8)$$

由于同种材料光纤中的斯托克斯光与反斯托克斯光受光纤弯曲、应力及环境温度影响会发生附加损耗, 且斯托克斯光和反斯托克斯光波长不同, 引起的本质损耗也不同, 因此对 α_{st} 和 α_{as} 做近似相等处理或直接使用经验值^[25] 仍会给温度解调结果带来误差. 当同一测温光纤上不同位置的两段光纤置入温控箱中时, 两段光纤所处环境相同, 因此

两段光纤的 α_{st} 相等, α_{as} 也相等, 则斯托克斯光和反斯托克斯光之间的衰减差由 (5) 和 (6) 式可得

$$\alpha_{st} - \alpha_{as} = \frac{1}{(L - 2l_0)} \frac{\ln(F(L - l_0, T_{L-l_0}))}{\ln(F(l_0, T_{l_0}))}. \quad (9)$$

(9) 式可以获得不同温度下的斯托克斯光和反斯托克斯光之间的衰减差, 拟合后得到衰减差与温度的关系 $\Delta\alpha(T)$, 则由 (7) 式得光纤上任意点处的温度为

$$T_l = \left\{ \frac{k_B}{h\Delta v} \left[\ln \frac{F(l, T_l)}{F(l_0, T_{l_0})} - (\Delta\alpha(T_l)l - \Delta\alpha(T_0)l_0) \right] + \frac{1}{T_0} \right\}^{-1}. \quad (10)$$

(10) 式中, 自变量 T 来自于 (8) 式的初步计算, 再通过引入衰减差拟合方程进行解调, 实现温度的自补偿, 在一定程度上降低了忽略 α_{st} 与 α_{as} 差异给温度解调带来的误差, 完成了温度的初步修正.

采集到的反斯托克斯光与斯托克斯光中含有瑞利散射光 (即瑞利噪声), 导致用 (8) 式解调温度时, 解调的温度与实际温度存在较大的误差. 当脉冲激光器的参数、探测器所处环境及光纤的种类确定后, 瑞利噪声可以看作常数, 且瑞利噪声对温度不敏感, 不随光纤长度变化^[16,29,32], 则系统所测信号值可以表示为

$$\phi_{st}(l) = \phi_{lst}(l) + \phi_{rst}, \quad (11)$$

$$\phi_{as}(l) = \phi_{las}(l) + \phi_{ras}, \quad (12)$$

式中, ϕ_{lst} , ϕ_{las} 分别表示斯托克斯光通量和反斯托克斯光通量的真实值; ϕ_{rst} , ϕ_{ras} 分别表示斯托克斯拉曼散射光与反斯托克斯拉曼散射光中所含的瑞利噪声. 联立 (8) 式可得对 α_{st} , α_{as} 做近似相等处理, 再消除瑞利噪声后的最终解调温度:

$$T_l = \left[\frac{k_B}{h\Delta v} \ln \frac{(\phi_{st}(l) - \phi_{rst})(\phi_{as}(l_0) - \phi_{ras})}{(\phi_{as}(l) - \phi_{ras})(\phi_{st}(l_0) - \phi_{rst})} + \frac{1}{T_0} \right]^{-1}. \quad (13)$$

联立 (10), (11) 和 (12) 式, 获得引入拟合衰减差后消除瑞利噪声解调出的最终温度:

$$T_l = \left[\frac{k_B}{h\Delta v} \ln \left(\frac{(\phi_{st}(l) - \phi_{rst})(\phi_{as}(l_0) - \phi_{ras})}{(\phi_{as}(l) - \phi_{ras})(\phi_{st}(l_0) - \phi_{rst})} \right) - (\Delta\alpha(T_l)l - \Delta\alpha(T_0)l_0) + \frac{1}{T_0} \right]^{-1}. \quad (14)$$

瑞利噪声值可通过光纤同一位置的 3 组温度及对应信号值求取, 由于本质损耗和附加损耗的影响, α_{st} 与 α_{as} 并不相等, 因此, (13) 式解出的瑞利噪声与瑞利噪声真实值存在偏差, (14) 式通过引入拟合衰减差补偿瑞利噪声与实际值的偏差, 将解出的瑞利噪声 ϕ_{rst} 及 ϕ_{ras} 代入 (14) 式实现解调温度的再次修正. 环境温度的变化使光纤的参考段产生附加损耗, 该段光纤的附加损耗使测温段产生测温附加误差 [28], 附加损耗主要由瑞利噪声引起, 虽然由瑞利噪声引起的温度损耗得到补偿, 但参考段的瑞利噪声使测温段产生的测温附加误差仍然存在, 因此再次修正后的温度仍然有一定的误差, 通过拟合附加误差对测温结果加以修正即可获得最终修正结果, 从而完成 RDTs 的温度自补偿.

3 实验设计及结果分析

为验证拟合斯托克斯光与反斯托克斯光衰减差对温度的修正效果, 设计并搭建了分布式拉曼测温系统, 图 1 为 RDTs 系统实验原理图, 图 2 为 RDTs 实验装置图. 中心波长为 1550 nm 的脉冲激光器发出宽度为 10 ns, 重复频率为 10 MHz 的激光脉冲, 经过 1×3 拉曼波分复用器 (1×3 Raman wavelength division multiplexing, 1×3 Raman WDM) 后进入长 170 m 的单模待测光纤中, 1×3 Raman WDM 隔离度为 35—40 dB. 将传感光纤 20—30 m 和 140—150 m 处的两段 10 m 光纤放入温控箱 (温控精度为 ± 0.5 °C) 中, 其余光纤置于室温环境下, 传感光纤产生的拉曼背向散射信号再经 1×3 Raman WDM 将斯托克斯与反斯托克斯信号耦合进入探测器雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 中, 并由 APD 进行检测放大, 数据通过高速数据采集卡同步采集, 将采集到的信号传输至计算机进行处理.

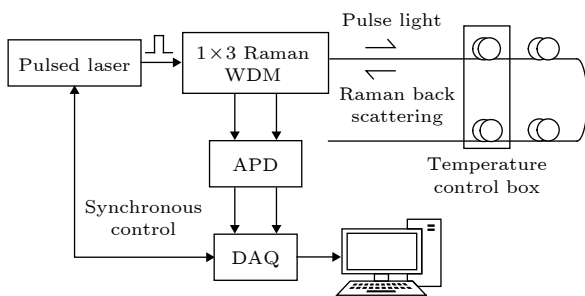


图 1 RDTs 实验系统原理图

Fig. 1. RDTs experimental system schematic.

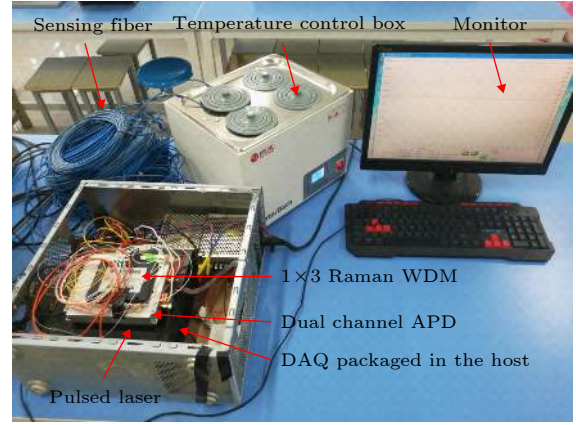


图 2 RDTs 实验装置图

Fig. 2. RDTs experimental device diagram.

以传感光纤 20—30 m 处作为参考段, 140—150 m 处作为测温段, 将这两段光纤置于温控箱 (温控精度为 ± 0.5 °C) 中, 其余光纤置于室温环境下, 温控箱温度设定为 30 °C, 待温度稳定后, 采集这两段 10 m 光纤中斯托克斯与反斯托克斯光的信号平均值分别作为 25 和 145 m 处斯托克斯与反斯托克斯光的信号值, 室温 (20 °C) 下传感光纤中的斯托克斯光及反斯托克斯光信号如图 3(a) 所示. 再调节温控箱温度设定值使其呈增长趋势, 每增加 1 °C, 待温度稳定后采集一次信号值, 直至温度达到 90 °C, 采集的信号值如图 3(b) 所示, 图中斯托克斯光的上升趋势很小, 对温度变化不敏感; 反斯托克斯光有明显的上升趋势, 对温度变化敏感, 因此采用比值解调法解调温度. 以 30 °C 为已知温度环境, 当 $\alpha_{st} \approx \alpha_{as}$ 即 $\Delta\alpha \approx 0$ 时, 利用 25 m 处的信号值根据 (8) 式解调出 145 m 处每次改变温度后系统所测的温度值, 其与温控箱显示温度对应关系如图 3(c) 所示. 误差在 54 °C 时取得最小值 0.08 °C, 90 °C 时达到最大值 10.50 °C, 可见解调出的温度与实际温度相差较大, 且温度波动较大. 根据所采集的斯托克斯及反斯托克斯信号进行计算, 通过 (9) 式获得斯托克斯光和反斯托克斯光的衰减差, 一阶线性拟合后如图 3(d) 所示. 一阶直线拟合获得 $\Delta\alpha$ 的表达式为

$$\Delta\alpha = 7.8508 \times 10^{-7}T - 1.3532 \times 10^{-5}. \quad (15)$$

通过重复 10 组实验降低温度波动, 使解调的温度曲线趋于平滑, 进一步将拟合衰减差代入 (10) 式进行自补偿, 通过采集的斯托克斯及反斯托克斯信号值解调出经过初步修正的温度 (图 4(a)),

发现温度波动得到有效降低. 初步修正前后的测温误差如图 4(b) 所示, 与修正前相比一定程度上减小了温度误差, 总体误差减小值在 1.47 °C 以下, 完成了温度的初步修正, 但修正后依然存在较大温度误差, 温度误差在 35 °C 时达到了最小值 0.24 °C, 86 °C 时达到了最大值 8.40 °C.

由于反斯托克斯光与斯托克斯光中含有 WDM

无法完全滤除的瑞利散射光, 因此系统测温结果需要进行降噪处理来实现二次修正. 根据 40 和 60 °C 下的传感光纤上三处不同位置的斯托克斯光与反斯托克斯光信号, 结合 (8) 和 (13) 式即可解出未引入拟合衰减差时斯托克斯光和反斯托克斯光中的瑞利噪声, 如图 5(a) 所示, 温度为 40 °C 和 60 °C 时, 斯托克斯光中的瑞利噪声波动范围分别为

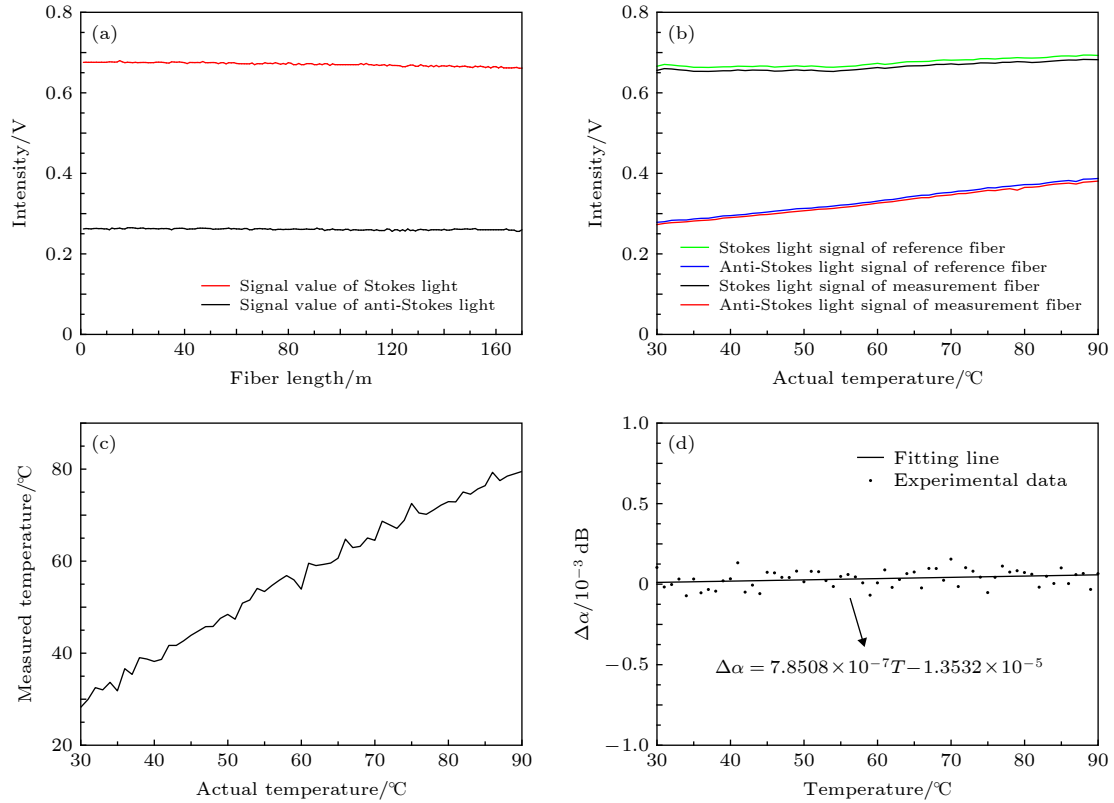


图 3 实验结果 (a) 20 °C 时光纤中的散射光信号; (b) 温度变化时的散射光信号; (c) $\Delta\alpha \approx 0$ 时的温度解调结果; (d) 衰减差拟合结果

Fig. 3. Experimental results: (a) Scattered light signal in fiber at 20 °C; (b) scattered light signal when temperature changes; (c) temperature demodulation results of $\Delta\alpha \approx 0$; (d) fitting results of attenuation difference.

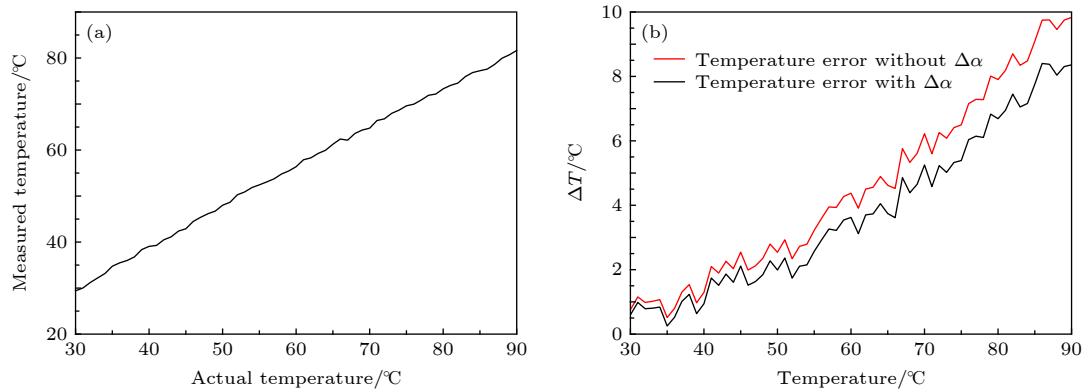


图 4 温度修正后的测量结果 (a) 初步修正后的测量值; (b) 温度修正前后的测温误差

Fig. 4. Temperature corrected measurement: (a) Preliminary corrected measurement; (b) temperature measurement error before and after temperature correction.

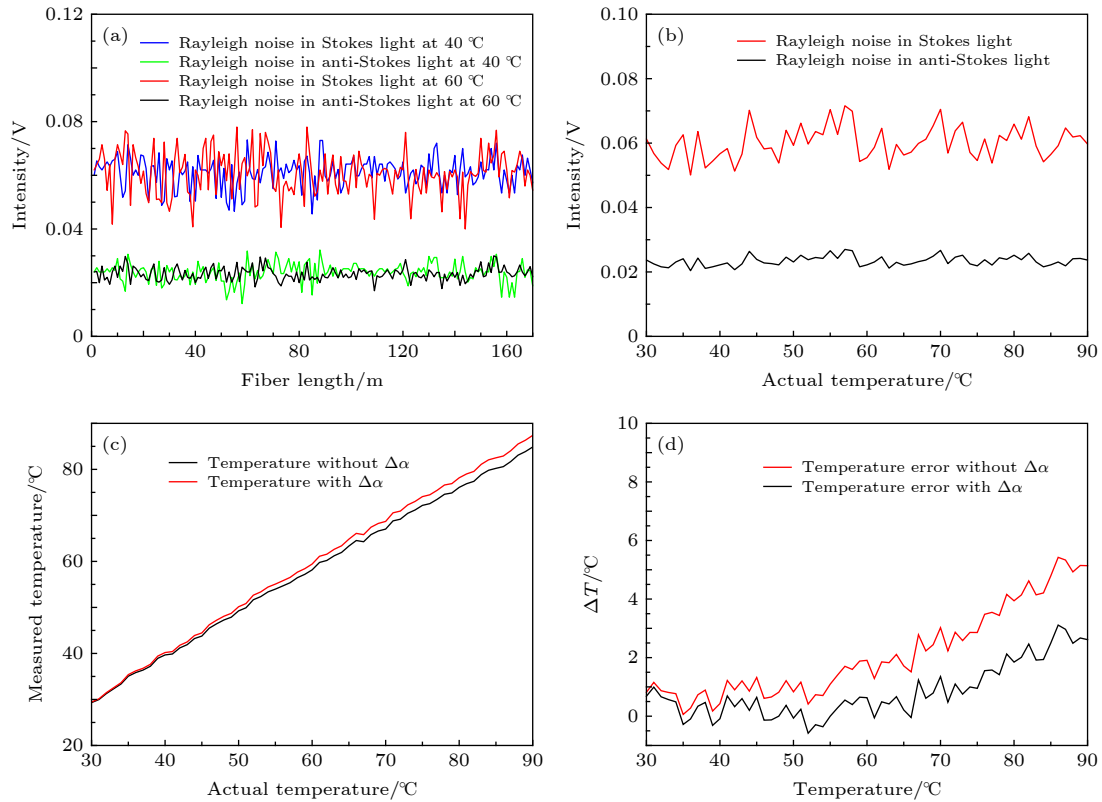


图5 温度最终修正后的测量结果 (a) 40 °C 和 60 °C 时光纤中的瑞利噪声; (b) 不同温度下的瑞利噪声; (c) 引入 $\Delta\alpha$ 前后消除瑞利噪声的测量结果; (d) 引入 $\Delta\alpha$ 前后消除瑞利噪声的温度误差

Fig. 5. Temperature corrected final measurement results: (a) Rayleigh noise in fiber at 40 °C and 60 °C; (b) Rayleigh noise at different temperatures; (c) measurement results without Rayleigh noise before and after the introduction of $\Delta\alpha$; (d) temperature error without Rayleigh noise before and after the introduction of $\Delta\alpha$.

0.0456—0.0732 V 和 0.04—0.078 V, 反斯托克斯光中的瑞利噪声波动范围分别为 0.0122—0.0322 V 和 0.017—0.03 V. 且瑞利噪声随着光纤长度的增加没有出现明显的上升或下降趋势, 由此可知, 瑞利噪声对光纤长度变化不敏感. 根据 20—30 m 及 140—150 m 处光纤中的信号平均值, 结合 (8) 和 (13) 式解调出斯托克斯光及反斯托克斯光中的瑞利噪声与温度的关系, 如图 5(b) 所示, 斯托克斯光中的瑞利噪声在 0.0501—0.0716 V 波动, 反斯托克斯光中的瑞利噪声在 0.0204—0.0270 V 波动, 且随着温度的增加没有明显的上升或下降趋势, 因此瑞利噪声对温度不敏感. 由于斯托克斯光的强度大于反斯托克斯光的强度, 且瑞利噪声约为散射光强的 10%—20%, 因此斯托克斯光中的瑞利噪声波动比反斯托克斯光中的瑞利噪声波动更明显.

根据 140—150 m 处光纤在 40, 50 和 60 °C 下的斯托克斯光与反斯托克斯光信号平均值以及已解调出的温度值, 结合 (13) 式、(14) 式以及一阶线

性拟合方程, 解出未引入拟合衰减差时瑞利噪声 ϕ_{rst} 和 ϕ_{ras} 的等效电压值分别为 0.0595 和 0.0242 V, 引入拟合衰减差后解出的瑞利噪声 ϕ_{rst} 和 ϕ_{ras} 的等效电压值分别为 0.0676 和 0.0288 V. 代回 (13) 式和 (14) 式进行自补偿, 解调的温度修正曲线如图 5(c) 所示, 对应的测温误差如图 5(d) 所示. 相比于未引入拟合衰减差直接消除瑞利噪声, 减小了温度误差, 误差减小值最高达到 2.53 °C; 与未引入衰减差且未消除瑞利噪声相比, 误差减小值最高达到 7.22 °C, 温度误差在 86 °C 时达到最大值 3.11 °C, 测温准确度明显提高, 完成了温度的二次修正.

利用拟合斯托克斯光与反斯托克斯光衰减系数差对系统所测温度进行修正, 需要对衰减差进行多阶拟合, 通过比较不同阶次拟合对温度的修正效果, 获得衰减差最优拟合阶次, 在实验中发现, 6 阶及以上阶次在求解瑞利噪声时, 出现无解或不符合实际的修正情况, 因此在前 5 阶中通过比较最终修正效果获得最优拟合阶次, 引入各阶拟合衰减差并

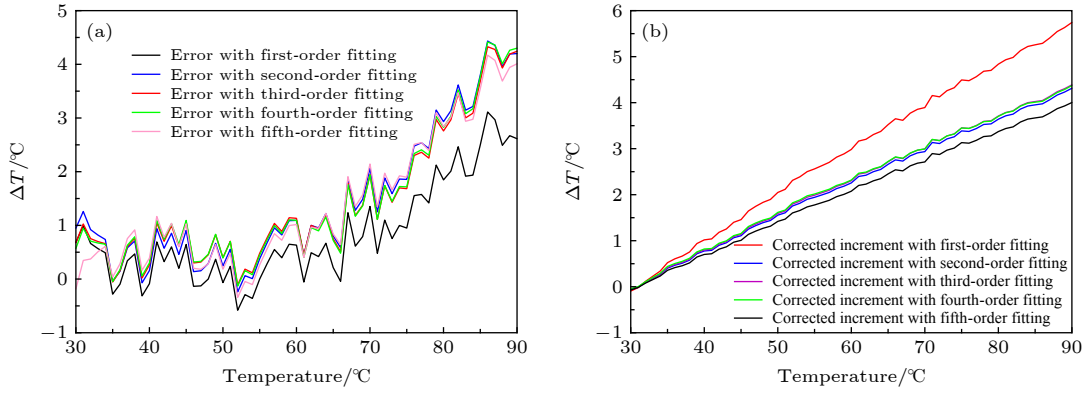


图 6 各阶修正效果 (a) 引入各阶拟合结果二次修正后的误差; (b) 引入各阶结果后二次修正的温度增量

Fig. 6. Temperature error after each order fitting: (a) The second correction error after introducing the fitting results of each order; (b) temperature increment for secondary correction after introduction of each order result.

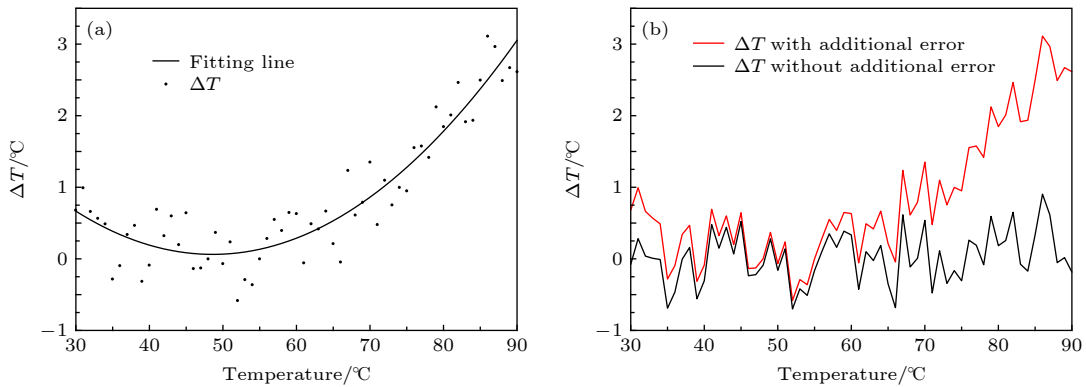


图 7 附加误差修正 (a) 附加误差拟合曲线; (b) 附加误差修正前后的测温误差

Fig. 7. Additional error correction: (a) Additional error fitting result; (b) temperature error before and after additional error correction.

消除瑞利噪声后的修正结果误差如图 6(a) 所示. 从图 6(a) 可以看出, 一阶拟合结果修正后的误差最小, 最大误差值为 3.11 $^\circ\text{C}$. 在引入各阶拟合结果分别进行初步修正后, 消除瑞利噪声实现的温度修正量如图 6(b) 所示, 从图 6(b) 可以看出, 在 30—90 $^\circ\text{C}$, 1 阶修正量的最大值在 90 $^\circ\text{C}$ 时修正了 5.74 $^\circ\text{C}$, 5 阶修正量最大值在 90 $^\circ\text{C}$ 时修正了 4.00 $^\circ\text{C}$.

虽然瑞利噪声引起的误差得到了修正, 但光纤参考段的传输附加损耗使测温段产生的测温附加误差仍然存在. 两个测量位置之间的光纤所处温度环境不变, 在光纤长度确定后, 其产生的附加损耗以定值形式被引入测温附加误差随温度变化的拟合曲线中 (图 7(a)), 瑞利噪声修正后的附加误差与温度的关系为

$$\Delta T = 0.0018T^2 - 0.1749T + 4.3382. \quad (16)$$

代入修正瑞利噪声后的温度值, 补偿二次修正

的温度后获得温度的最终修正结果 (图 7(b)), 修正后的误差最大值为 0.90 $^\circ\text{C}$.

4 结 论

本文通过对 RDTS 解调原理的分析与实验研究, 讨论了温度解调过程中存在的误差及修正方法, 得到如下结论: 1) 提出了拟合得到斯托克斯光和反斯托克斯光的衰减差的方法使温度进行自补偿, 通过引入拟合衰减差进行温度解调, 实现了温度的初步修正, 相较于反斯托克斯光端面反射修正法、双光源修正法、双端环路修正法和拟合修正法仅消除本质损耗对温度解调结果的影响, 本方法能够同时避免不同波长引起的本质损耗差异和弯曲、应力及环境温度变化引起的附加损耗差异对解调结果的影响. 2) 理论及实验分析表明, 相比于传统的消除瑞利噪声, 在引入拟合衰减差之后, 能够更

加精确地得出反斯托克斯光与斯托克斯光中所含的瑞利噪声, 瑞利噪声的消除能够大幅减小 WDM 光隔离度局限性引起的温度误差. 3) 参考段光纤所处温度场的变化使测温段光纤内光信号产生测温附加误差, 在消除瑞利噪声后, 通过拟合温度附加误差与温度的关系进行修正, 实现了 RDTs 的温度自补偿. 4) 比较不同阶次下衰减差的拟合结果对温度自补偿的影响, 实验表明, 一阶线性拟合为最优拟合结果, 能够将温度误差从 10.50 °C 下降到 0.90 °C.

参考文献

- [1] Geng J S, Sun Q, Zhang Y C, Gong W Y, Du S 2018 *J. Loss Prevent. Proc.* **55** 144
- [2] O'Keefe J M K, Neace E R, Hammond M L, Hower J C, Engle M A, East J, Geboy N J, Olea R A, Henke K R, Copley G C, Lemley E, Nally R S H, Hansen A E, Richardson A R, Satterwhite A B, Stracher G B, Radke L F, Smeltzer C, Romanek C, Blake D R, Schroeder P A, Emsbo-Mattingly S D, Stout S A 2018 *Int. J. Coal Geol.* **195** 304
- [3] Dunnington L, Nakagawa M 2017 *Environ. Pollut.* **229** 139
- [4] Mohalik N K, Lester E, Lowndes I S, Singh V K 2016 *Carbon Manag.* **7** 317
- [5] Yan W J, Hu M, Liang J R, Wang D F, Wei Y L, Qin Y X 2016 *Chin. Phys. B* **25** 040702
- [6] Wang Z L, Zhang S S, Chang J, Lü G P, Wang W J, Jiang S, Liu X Z, Liu X H, Luo S, Liu Y N 2014 *Optik* **125** 1821
- [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 Z H 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] Sun Q Z, Liu D M, Wang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5903 (in Chinese) [孙琪真, 刘德明, 王健 2007 物理学报 **56** 5903]
- [9] Rao Y J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 074207 (in Chinese) [饶云江 2017 物理学报 **66** 074207]
- [10] Wen S Z, Xiong W C, Huang L P, Wang Z R, Zhang X B, He Z H 2018 *Chin. Phys. B* **27** 090701
- [11] Bolognini G, Hartog A 2013 *Opt. Fiber Technol.* **19** 678
- [12] Wang J F, Liu H L, Zhang S Q, Yu X D, Sun Z Z, Jin S Z, Zhang Z X 2013 *Spectrosc. Spect. Anal.* **33** 865 (in Chinese) [王剑锋, 刘红林, 张淑琴, 余向东, 孙忠周, 金尚忠, 张在宣 2013 光谱学与光谱分析 **33** 865]
- [13] Yu X D, Zhang Z X, Zhu H Z, Jin S Z, Liu H L, Wang J F 2011 *Acta. Photon. Sin.* **40** 1870 (in Chinese) [余向东, 张在宣, 祝海忠, 金尚忠, 刘红林, 王剑锋 2011 光子学报 **40** 1870]
- [14] He H L, Dyck M F, Horton R, Li M, Jin H J, Si B C 2018 *Adv. Agron.* **148** 173
- [15] Chai Q, Luo Y, Ren J, Zhang J Z, Yang J, Yuan L B, Peng G D 2019 *Opt. Eng.* **58** 072007
- [16] Sun M, Tang Y Q, Yang S, Li J, Culshaw B, Dong F Z 2015 *J. Optoelectron. Laser* **26** 2070 (in Chinese) [孙苗, 汤玉泉, 杨爽, 李俊, Culshaw B, 董凤忠 2015 光电子·激光 **26** 2070]
- [17] Cao Y L, Yang F, Xu D, Ye Q, Cai H W, Fang Z J 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 050701
- [18] Yang C, Wang M, Tang M, Wu H, Zhao C, Liu T Q, Fu S N, Tong W J 2018 *Appl. Opt.* **57** 6923
- [19] Shang C, Wu C Q, Li Z Y, Yang S S 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 094212
- [20] Liu Y P, Ma L, Yang C, Tong W J, He Z Y 2018 *Opt. Express* **26** 20562
- [21] Hwang D, Yoon D J, Kwon I B, Seo D C, Chung Y J 2010 *Opt. Express* **18** 9747
- [22] Suh K, Lee C 2008 *Opt. Lett.* **33** 1845
- [23] Wang Z L, Zhang S S, Chang J, Lü P G, 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
- [24] van de Giesen N, Steele-Dunne S C, Jansen J, Hoes O, Hausner M B, Tyler S, Selker J 2012 *Sensors* **12** 5471
- [25] Tang Y Q, Sun M, Li J, Yang S, Culshaw B, Dong F Z 2015 *Acta. Photon. Sin.* **44** 0506006 (in Chinese) [汤玉泉, 孙苗, 李俊, 杨爽, Culshaw B, 董凤忠 2015 光子学报 **44** 0506006]
- [26] Sun B N, Chang J, Lian J, Wang Z L, Lü G P, Liu X Z, Wang W J, Zhou S, Wei W, Jiang S, Liu Y N, Luo S, Liu X H, Liu Z, Zhang S S 2013 *Opt. Commun.* **306** 117
- [27] Yin Y X, Wu Z F, Sun S W, Tian L, Wang X B, Wu Y D, Zhang D M 2019 *Chin. Phys. B* **28** 074202
- [28] Tang Y Q, Sun M, Li J, Yang S, Culshaw B, Dong F Z 2015 *J. Optoelectron. Laser* **26** 847 (in Chinese) [汤玉泉, 孙苗, 李俊, 杨爽, Culshaw B, 董凤忠 2015 光电子·激光 **26** 847]
- [29] 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, Lü G P 2015 *Optik* **126** 270
- [30] Chai J 2003 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an University of Science and Technology) (in Chinese) [柴敬 2003 博士学位论文 (西安: 西安科技大学)]
- [31] Lin Q, Yaman F, Agrawal G P 2007 *Phys. Rev. A* **75** 023803
- [32] Wang Z L, Chang J, Zhang S S, Sun B N, Jiang S, Luo S, Jia C W, Liu Y N, Liu X H, Lü G P, Liu X Z 2014 *Opt. Quant. Electron.* **46** 821

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

Ma Tian-Bing^{1)2)3)†} Zi Bao-Wei²⁾³⁾ Guo Yong-Cun¹⁾²⁾³⁾ Ling Liu-Yi¹⁾²⁾
Huang You-Rui¹⁾²⁾ Jia Xiao-Fen²⁾

1) (*State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*)

2) (*Anhui Key Laboratory of Mine Intelligent Equipment and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*)

3) (*School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*)
(Received 24 September 2019; revised manuscript received 18 October 2019)

Abstract

The temperature error caused by the essential loss and the additional loss of Stokes light and anti-Stokes light widely exist in the distributed optical fiber temperature sensor (DTS). According to the temperature demodulation principle of the DTS, a method of fitting the attenuation difference between Stokes light and anti-Stokes light is proposed, which can realize the temperature self-compensation to reduce the temperature measurement error. Two parts at the different positions of the sensing fiber are regarded as the reference section and the temperature measuring section, respectively. The optical signal of the reference section is used as a parameter when demodulating the temperature and fitting the attenuation difference, and the attenuation difference between the Stokes light and the anti-Stokes light is multi-order fitted by the optical signal of the temperature measuring section, then the multi-order fitting results are used to demodulate the temperature for reducing the temperature error caused by the essential loss and additional loss of the Stokes light and anti-Stokes light, in order to implement the preliminary correction of the temperature. Three groups of the different measuring temperature values at the same position of the optical fiber as well as their corresponding signal values are taken in calculation for eliminating the Rayleigh noise, and the relationship of Rayleigh noise with fiber length and temperature are analyzed, and thus further calculating the Rayleigh noise based on the fitting attenuation difference. The influence of the multi-order attenuation difference on the error in temperature measurement and that on the elimination of the Rayleigh noise are compared with each other, and the Rayleigh noise error caused by the essential loss and additional loss of the Stokes light and anti-Stokes light are reduced, then the temperature is corrected again by eliminating the Rayleigh noise. The effect of the multi-order attenuation difference fitting result on the temperature measurement error and on the elimination of Rayleigh noise are analyzed and compared with each other, then the optimal fitting order is obtained. After fitting the additional error at the temperature measurement section that is caused by the additional loss at the reference section, the temperature compensation is carried out by the fitting result, then the final temperature correction is completed. The experimental results show that the temperature correction effect is best by using the first-order linear fitting results in a temperature range of 30—90 °C, and the temperature measurement error is reduced from 10.50 °C to 0.90 °C after being corrected three times.

Keywords: temperature, distributed fiber, attenuation difference, self-compensation

PACS: 07.60.Vg, 42.79.-e, 42.87.-d

DOI: 10.7498/aps.69.20191456

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFC060908).

† Corresponding author. E-mail: dfmtb@163.com