

doi:10.3788/gzxb20154405.0506006

基于喇曼散射的分布式光纤温度传感器的温度修正

汤玉泉¹, 孙苗^{1,2}, 李俊¹, 杨爽¹, Brian Culshaw³, 董凤忠^{1,2}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 合肥 230026)

(3 University of Strathclyde, Department of Electrical and Electronics Engineering, United Kingdom)

摘 要:结合基于喇曼散射的分布式光纤温度传感器的基本原理及温度解调过程, 研究和分析了温度测量产生误差的主要原因. 采用拟合修正的方法来解决斯托克斯光和反斯托克斯光传输损耗差异以及光纤弯曲、应力等附加损耗对系统的影响; 采集光纤起始端同一位置 3 个不同温度的信号值求解非线性方程组, 实现了对探测器暗电流引起的测量误差的修正. 实验结果表明: 经过修正的传感器在 900 m 位置的温度测量误差平均值从 8.0 °C 降到 0.37 °C, 整条光纤的温度测量误差平均值 $\leq \pm 0.6$ °C.

关键词: 光纤光学; 分布式光纤温度传感器; 喇曼散射; 光纤损耗; 温度修正

中图分类号: TN253; O437.3; O434.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2015)05-0506006-5

Temperature Calibration of Distributed Optical Fiber Temperature Sensor Based on Raman Scattering

TANG Yu-quan¹, SUN Miao^{1,2}, LI Jun¹, YANG Shuang¹, Brian Culshaw³, DONG Feng-zhong^{1,2}

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, College of Environmental Science and Optoelectronics Technologies, Hefei 230026, China)

(3 University of Strathclyde, Department of Electrical and Electronics Engineering, United Kingdom)

Abstract: The main causes of the temperature measurement error of Raman distributed optical fiber temperature sensor was researched and discussed based upon the Raman scattering principle and temperature demodulation algorithm. A method to address the effects caused by the attenuation differences between Stokes and anti-Stokes light, additional attenuation of fiber bending, stress and environment changes was proposed. Furthermore, the measurement error caused by dark current produced by the detector was also reduced by using nonlinear equations with three different temperature signals acquired along the same-fiber section location. The experimental results demonstrate that the arithmetic mean error of calibrated system has reduced from 8.0 °C to 0.37 °C with the fiber location found at 900 m. Overall, a temperature arithmetic mean error better than 0.6 °C is achieved.

Key words: Fiber optics; Distributed optical fiber temperature sensor; Raman scattering; Fiber attenuation; Temperature calibration

OCIS Codes: 060.2370; 120.4825; 290.5860

0 引言

分布式光纤喇曼温度传感器(Raman Distributed

Optical Fiber Temperature Sensor, RDTS)是近 20 多年来发展起来的一种实时、连续测量空间温度场分布的技术^[1]. 传感器使用光纤作为传感和信号传输介质,

基金项目:工业横向开发和中科院资深外籍特聘研究员计划(Nos. 11204319, 11204320)资助

第一作者:汤玉泉(1988—),男,博士研究生,主要研究方向为分布式光纤传感技术. Email: laserway@163.com

导师(通讯作者):董凤忠(1966—),研究员,博士,主要研究方向为开发新的环境光学和光纤传感技术在公共安全、工业过程控制、节能减排减灾等中的应用. Email: fzdong@aiofm.ac.cn

收稿日期:2014-11-24; **录用日期:**2014-12-31

<http://www.photon.ac.cn>

具有抗电磁干扰、本质绝缘、容易安装布线、可以实现远距离分布测量等优点,使得该技术广泛应用于军事、航空等国防安全领域,煤炭、石油、天然气、电力等能源领域,以及桥梁、大坝、隧道、铁路等大型土木工程领域^[2-4].

光纤中的喇曼散射光包含斯托克斯光和反斯托克斯光,其中斯托克斯光对温度不敏感,而反斯托克斯光表现出较强的温度效应,因此可以通过此效应实现温度的探测.由于喇曼散射效应的增益非常微弱^[4-6],加上光纤非线性效应的阈值对探测激光脉冲峰值功率的限制,使喇曼效应产生的斯托克斯和反斯托克斯光强非常微弱.目前普遍采用累加平均的方法来提高信噪比,但是无法消除由于暗电流引起的信号干扰而产生的误差^[7].该误差可以在光纤不同位置设置4个不同的温度区域采用算法来进行温度修正^[8],但这给实际应用带来困难.另外,由于不同波长的光在光纤中的传输损耗不同可产生随传感距离增大而增大的误差^[9-10],修正方法有:衰减环路自修正法^[9]、双光源自修正法^[11]、反斯托克斯光端面反射修正法^[12]等,这些方法在实际应用中均带来一定的困难,比如增加成本、增加工程难度等.

本文从RDTS的原理出发,提出了一种基于斯托克斯和反斯托克斯光在光纤中的传输损耗差异而导致的测温误差的拟合修正方法.该方法可以在两种光损耗具体数值未知的情况下进行温度修正,可以避免弯曲、应力以及温度差异等引起的附加损耗对修正值的影响.同时,本文在以上基础上采用改变单点温度对探测器的暗电流引起的测温误差做出修正,采用以上修正方法的系统结构简单,工程实施方便,经过修正的温度传感器的测温误差 $\pm 0.6^\circ\text{C}$.

1 RDTS 基本原理

激光器发出的脉冲激光经 1×3 喇曼波分复用器后进入传感光纤,探测器得到的喇曼后向散射光通量可以表示为^[5]

$$\phi_u = h\nu_u \eta_u \Delta f_u P_0 \lg R N_u D \exp[-(\alpha_0 + \alpha_u)l] + \phi'_u \quad (1)$$

式中下标 u 代表ST或AS,分别指斯托克斯散射光和反斯托克斯散射光. ϕ_u 表示单位时间内散射的光强, h 为普朗克常量, ν_u 为光子频率, ϕ'_u 表示由暗电流引起的背景噪声. η_u 表示探测器的探测效率与滤波器传输系数的乘积, Δf_u 表示系统中斯托克斯和反斯托克斯通道的滤波器的带宽, P_0 表示为激光脉冲的峰值功率, l 为光纤长度, g_R 为喇曼增益系数, D 为激光脉冲的占空比, α_0 和 α_u 分别表示入射光和喇曼散射光的衰减系数, N_u 表示斯托克斯或者反斯托克斯能级上的光子数, N_u 的值服从玻尔兹曼分布,可以表示为

$$N_{AS} = \frac{1}{\exp\left[\frac{h\Delta\nu}{k_B T_l}\right] - 1} \quad (2)$$

$$N_{ST} = \frac{1}{\exp\left[\frac{h\Delta\nu}{k_B T_l}\right] - 1} \quad (3)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常量, T_l 为光纤处的温度, $\Delta\nu$ 喇曼频移量.假设喇曼增益系数 g_R 与斯托克斯和反斯托克斯平移量以及滤波器带宽无关,则斯托克斯光通量与反斯托克斯光通量之比为

$$F(T_l) = \frac{\phi_{ST}(l) - \phi'_{ST}}{\phi_{AS}(l) - \phi'_{AS}} = C \cdot \exp\left[\frac{h\Delta\nu}{k_B T_l}\right] \cdot \exp[-(\alpha_{AS} - \alpha_{ST})l] \quad (4)$$

式中 $\phi_{ST}(l)$ 和 $\phi_{AS}(l)$ 分别表示在被测光纤处斯托克斯和反斯托克斯光通量, ϕ'_{ST} 和 ϕ'_{AS} 表示暗电流引起的背景噪声, C 为常量(包括探测器的探测效率,相对喇曼增益等),式(4)两边同时取对数可得

$$\ln(F(T_l)) = \ln(C) + \frac{h\Delta\nu}{k_B} \cdot \frac{1}{T_l} + (\alpha_{ST} - \alpha_{AS})l \quad (5)$$

若将被测光纤 l_0 处的一部分放置在已知温度 $T(l_0)$ 的环境中可得

$$\ln(F(T_{l_0})) = \ln(C) + \frac{h\Delta\nu}{k_B} \cdot \frac{1}{T_{l_0}} + (\alpha_{ST} - \alpha_{AS})l_0 \quad (6)$$

和式(5)联立得

$$R(T) = \frac{1}{T_l} - \frac{1}{T(l_0)} = \frac{k_B}{h\Delta\nu} \left[\ln \frac{F(T_l)}{F(T_{l_0})} + (\alpha_{ST} - \alpha_{AS})(l - l_0) \right] \quad (7)$$

通常情况下认为 $\alpha_{AS} \approx \alpha_{ST}$ ^[12],并且在忽略 ϕ'_{ST} 和 ϕ'_{AS} 的情况下,则根据式(7)可解调出光纤上任意的温度为

$$R(T) = \frac{1}{T_l} - \frac{1}{T(l_0)} = \frac{k_B}{h\Delta\nu} \left[\ln \frac{F(T_l)}{F(T_{l_0})} \right] \quad (8)$$

$$T_l = \left[\frac{k_B}{h\Delta\nu} \cdot \ln \frac{F(T_l)}{F(T_{l_0})} + \frac{1}{T_{l_0}} \right]^{-1} \quad (9)$$

实际上,喇曼散射产生的斯托克斯和反斯托克斯光在光纤中传播时的损耗是不等的,因此,式(8)解调出的温度将会产生误差,不能忽略 α_{AS} 和 α_{ST} 的差异.

由于同种材料的 α_{AS} 和 α_{ST} 受光纤应力、弯曲和环境温度的变化也将发生改变,因此直接使用 α_{AS} 和 α_{ST} 的经验值仍然会给温度的解调带来误差^[13],从式(7)可以看出当整条光纤在相同的温度条件下, $R(T)$ 的值应该为水平直线,若忽略 α_{AS} 和 α_{ST} 差异而认为 $\alpha_{AS} \approx \alpha_{ST}$ 时, $R(T)$ 应该则为倾斜的直线,在此情况下可以通过拟合式(8)得到该直线的斜率,用该值代替 $k_B/h\Delta\nu(\alpha_{AS} - \alpha_{ST})$ 带入式(7)即可完成 $R(T)$ 的初步修正.

实验发现,经过上述修正后的系统仍然存在测温误差,并且这种误差在温度高于和低于校准温度时都会逐渐变大,此时还需要对解调温度进一步修正.式

(7)中忽略了背景噪声的影响,在考虑背景噪声的影响下,由式(4)可以得到

$$\ln(\phi_{ST}(L) - \phi'_{ST}) - \ln(\phi_{AS}(L) - \phi'_{AS}) - \ln(C) + (\alpha_{AS} - \alpha_{ST})l = \frac{h\Delta\nu}{k_B} \frac{1}{T_l} \quad (10)$$

当脉冲激光器的参量、探测器所处的环境温度和偏压以及光纤的种类都确定后, ϕ'_{ST} 和 ϕ'_{AS} 可以近似为定值,因此只要求得式(10)中 ϕ_{ST} 和 ϕ_{AS} 的值即可实现温度的修正。

从式(10)可以看出其非线性方程中含有3个未知量: ϕ'_{ST} 、 ϕ'_{AS} 和 C ,可以有两种方式求得:

1) 光纤上3个不同位置的斯托克斯和反斯托克斯信号和对应的实际温度值^[8];

2) 在同一位置的光纤上改变温度,取3组不同温度及对应的信号值。

将以上已知量分别代入式(10)中通过解非线性方程组即可求得 ϕ'_{ST} 和 ϕ'_{AS} 的值,再将该值代入式(4)即可完成对温度的最终修正,显然,对于第一种方法需要在三个不同的位置同时设置三个温度,这将给工程应用带来不便,而第二种方法显得更容易实现。

通过以上两步修正得到最终的温度解调结果为

$$T_l = \left[\frac{k_B}{h\Delta\nu} \cdot \left[\ln \left[\frac{\phi_{ST}(L) - \phi'_{ST}}{\phi_{AS}(L) - \phi'_{AS}} \right] \left[\frac{\phi_{AS}(l_0) - \phi'_{AS}}{\phi_{ST}(l_0) - \phi'_{ST}} \right] + (\alpha_{AS} - \alpha_{ST})l \right] + \frac{1}{T_l} \right]^{-1} \quad (11)$$

2 实验结果和分析

本实验系统如图1,中心波长为1550 nm的脉冲激光器(线宽小于1 nm,脉宽设为10 ns,脉冲重复频率1~50 kHz可调)发出的光通过1×3 Raman波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)被耦合到待测多模光纤(62.5/125 μm),其喇曼背向散射光再次通过WDM将 λ_{ST} 和 λ_{AS} 分别耦合进入探测器(双通道InGaAs APD,3 dB带宽80 MHz)中,采集卡(双通道14位,采样率设置为100 MS/s)通过激光器外触发

方式实现数据同步采集,采集到的信号由计算机处理和显示。

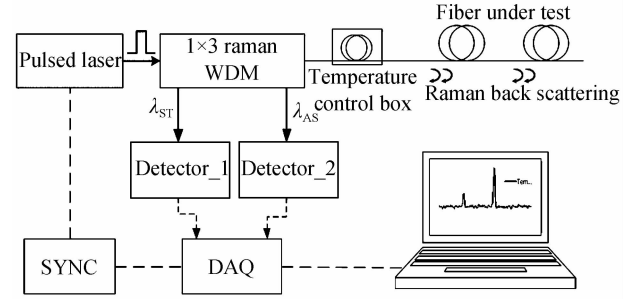
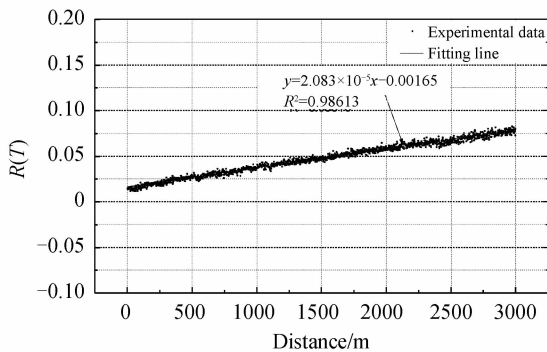


图1 分布式温度传感实验系统

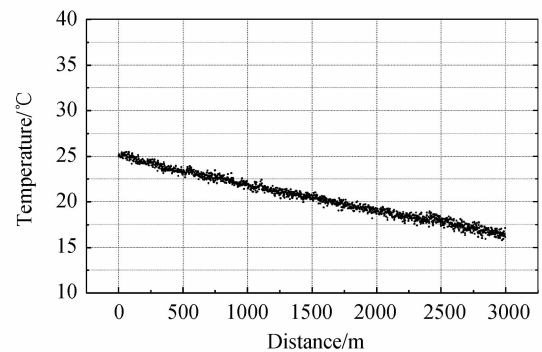
Fig. 1 DTS experimental setup

首先将整条待测光纤放在温控箱(温控范围:室温+5℃~250℃,温控准确度为±0.5℃)中,温度设为25.0℃.待温度稳定后,根据式(8)对采集到的斯托克斯和反斯托克斯信号计算得到与距离的关系如图2(a),最终解调出的温度随距离的变化如图2(b),在光纤3000 m处测得的室温只有16.5℃,与实际温度相差8.5℃,可见解调出的温度和实际温度相比存在较大误差,且该误差会随着传感光纤的长度增加而增加.通过直线拟合得到 $R(T)$ 斜率为: 2.083×10^{-5} ,修正后的如图2(c),对应解调出的温控箱内温度如图2(d).实验发现,修正后的解调系统能够很好地反映温控箱内的实际温度,并且整条光纤上的温度都基本一致。

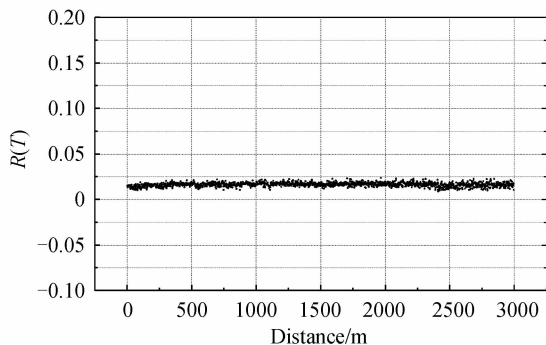
之后再将光纤的895~1115 m处的光纤放入温控箱中,其余光纤放在室内(室温22.1℃).设置温控箱的温度为75.0℃,待温度稳定后得到整条光纤上的温度数据.如图3(a)所示为没有经过修正时的温度分布,图3(b)为修正后的温度分布,可以看出修正后的结果解决了温度随距离下降的问题.此时温控箱内的温度电子温度计(温度分辨率为0.1℃,准确度为±0.5℃)测量值为74.9℃,光纤测量平均值约为71.5℃,后者显然低于温控箱实际温度,误差达3.4℃。



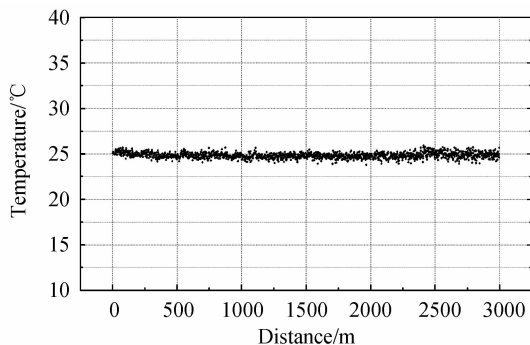
(a) $R(T)$ profile obtained using Eq. (8) with experimental data directly



(b) Temperature profile obtained using Eq. (9) with experimental data directly



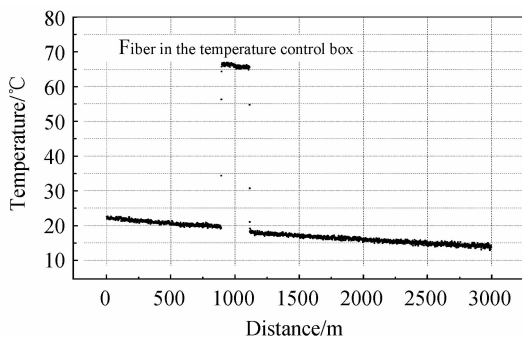
(c) $R(T)$ profile after calibration



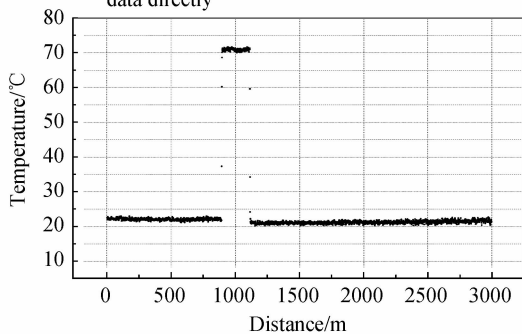
(d) Temperature profile obtained using calibrated $R(T)$

图2 修正前后及其对应解调温度

Fig.2 Calibration and its corresponding demodulation temperature



(a) Temperature profile obtained using experimental data directly



(b) Temperature profile after calibration

图3 温控箱温度测量结果

Fig.3 Measured temperature inside the incubator

为了进一步修正 RDTs 的测温误差,按前文修正方法 2 的要求,将光纤始端 100 m 处约 20 m 的光纤放入温控箱内,将温控箱的目标温度分别设为 30.0°C、50.0°C 和 70.0°C。当温控箱的温度恒定时,电子温度计显示温度分别为 30°C、50.1°C 和 69.9°C,同时记录对应采集到的电压信号。选择 110 m 处的电压信号和对应实际温度值分别带入式(10)联立求解非线性方程组即可求得 ϕ_{ST} 和 ϕ_{AS} 的值,利用该结果修正原始电压信号,即可实现对解调温度的修正。对图 3 的实验数据修正结果如图 4,修正后的解调系统测得此时温控箱内的温度平均值为 74.6°C。可见通过上述修正的解调系统测量目标温度为 74.9°C 的温控箱的温度时,误差从 3.4°C 降低到 0.3°C。

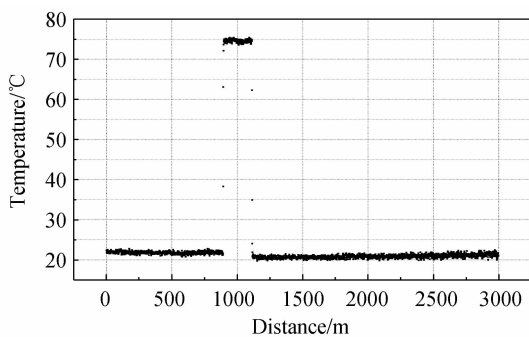


图4 噪声修正后温度解调系统结果

Fig.4 Measured temperature after noise calibration

为了进一步验证修正后的解调系统测温的准确度,将 900 m 和 2 800 m 处的两段光纤同时放入温控箱,如图 5 为修正后的系统测量温控箱内温度的结果,前后两段光纤测量平均温度分别为 80.9°C 和 80.1°C,电子温度计测量结果为 80.7°C,RDTs 的测温误差在 $\leq \pm 0.6^\circ\text{C}$ 范围内。因此,对于不同长度不同位置的光纤进行温度测量时,以上修正方法均表现出较好的效果。此后,再将温控箱设定的目标温度从 30°C 间隔 10°C 逐渐增加到 110°C 并记录温度稳定时的数据,选择 900 m 处光纤连续 5 次记录数据和电子温度计对应数据进行分析。图 6 所示为 5 次测量平均值与电子温度计测量值拟合结果,每组数据的标准差最大值为 0.69°C(在 70°C 时),对应的实际测量结果在左上角的

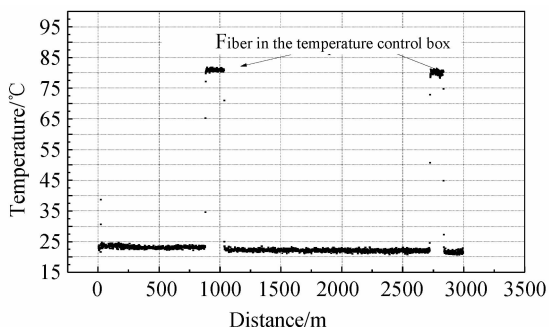


图5 不同位置光纤测温比较

Fig.5 RDTs measured temperature at different locations

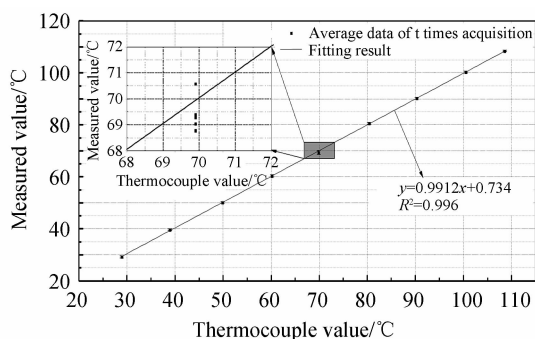


图6 900 m处光纤测温与电子温度计测量结果比较
Fig.6 Compared with the results of RDTS measured value and thermocouple value

插入图形中,这5次测量的误差绝对值最大为 1.13°C 、最小为 0.55°C 、平均值为 0.77°C 。所有测量结果的误差绝对值最大为 1.13°C 、最小为 0.01°C 、平均值为 0.37°C 。实验表明修正后的解调系统在900 m处的测量误差平均值从 8.0°C 降到 0.37°C ,且从室温到 110°C 范围内光纤所测温度与电子温度计测量结果保持一致。

3 结论

通过RDTS基本原理分析,研究和讨论了温度解调过程中产生误差的两个原因,提出在不考虑 α_{AS} 、 α_{ST} 差异的前提下,计算斯托克斯和反斯托克斯信号的 $R(T)$ 值并对其拟合,实现了解调温度随距离下降的误差修正。这种方法可以避免弯曲、应力以及环境温度差异引起的附加损耗对温度解调结果的影响,并能较好地反应温度的变化趋势。最后通过计算探测器的暗电流噪声等效电压值对温度解调结果再次修正,最终修正的解调系统测温误差显著减小。

参考文献

- [1] WANG Z L, ZHANG S S, CHANG J, *et al.* Adaptive data acquisition algorithm in Raman distributed temperature measurement system[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(7): 1821-1824.
- [2] BOLOGNINI G, HARTOG A. Raman-based fibre sensors: Trends and applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6): 678-688.
- [3] WANG Jian-feng, LIU Hong-lin, ZHANG Shu-qin, *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): 865-870.
- 王剑锋,刘红林,张淑琴,等.基于喇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): 865-870.
- [4] YU Xiang-dong, ZHANG Zai-xuan, ZHU Hai-zhong, *et al.* An intelligent temperature compensating circuit for distributed optical fiber raman temperature sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1870-1874.
- 余向东,张在宣,祝海忠,等.采用智能温度补偿电路的分布式光纤喇曼温度传感器[J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 1870-1874.
- [5] LIN Q, YAMAN F, AGRAWAL G P. Photon-pair generation in optical fibers through four-wave mixing: Role of Raman scattering and pump polarization [J]. *Physical Review A*, 2007, **75**(2): 023803.
- [6] ZHANG Li-xun, OU Zhong-hua, LIU Yong-zhi, *et al.* A circulated demodulated method of distributed fiber raman temperature sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1176-1178.
- 张利勋,欧中华,刘永智,等.分布式光纤喇曼温度传感器的循环解调法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1176-1178.
- [7] WANG Z, CHANG J, ZHANG S, *et al.* Theoretical analysis of the impact of Rayleigh noise on the performance of distributed Raman temperature sensors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, **61**(4): 286-296.
- [8] MA X, CHANG J, WANG L, *et al.* Using multiple reference points in raman based distributed temperature sensor for eliminating DC interference[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, **14**(14): 295-301.
- [9] 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.
- [10] STODDART P R, CADUSCH P J, PEARCE J B, *et al.* Fibre optic distributed temperature sensor with an integrated background correction function[J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, **16**(6): 1299.
- [11] SUH K, LEE C. Auto-correction method for differential attenuation in a fiber-optic distributed-temperature sensor [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(16): 1845-1847.
- [12] 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.
- [13] 简燕红.喇曼型光纤温度传感系统信号处理的研究与实现[D].华北电力大学(河北),2010:32-34.