

文章编号: 0253-2239(2007)03-0400-4

分布式光纤拉曼温度传感器的对称解调

张利勋¹ 廖 云¹ 欧中华¹ 刘永智¹ 代志勇¹ 彭增寿¹ 王大文²

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054
² 中国电子科技集团第八研究所, 淮南 230001)

摘要: 提出了一种用于分布式光纤拉曼温度传感器的对称解调新方案, 采用瑞利散射光时域反射仪(OTDR)曲线解调光纤的反斯托克斯散射光时域反射仪曲线。首先将测量温度范围分成数段, 用传统解调方法获取待测温度, 然后判断该温度属于哪段内, 最后用该对称的数段边界标定温度解调得到偶数个温度测量值, 取平均值作为测量值。该方法提高了系统的测温精度和稳定性, 系统的测温误差在 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内, 空间分辨力 1 m。实验结果与理论分析一致。

关键词: 光纤光学; 拉曼背散射光; 瑞利背散射光; 分布式光纤; 温度

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

Symmetrical Demodulation of Distributed Fiber Raman Temperature Sensor

Zhang Lixun¹ Liao Yun¹ Ou Zhonghua¹ Liu Yongzhi¹ Dai Zhiyong¹
Peng Zengshou¹ Wang Dawen²

(¹ School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)
(² The 8th Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Huainan 230001)

Abstract: A new type of symmetrical demodulation method is proposed for the distributed fiber Raman temperature sensor. The anti-Stokes scattering optical time domain reflectometer (OTDR) curves are demodulated by Rayleigh optical time domain reflectometer curves. Firstly, the measured temperature scope is divided into several regions; secondly, when the temperature is obtained by the traditional demodulation method, it will be located on the relative region; then the temperature is demodulated by the region's demarcated temperature, even-number values of temperature are obtained, and the average value is taken as the measured value. The temperature precision and stability of the sensor is improved, with temperature precision error in $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ and spatial resolution of 1 m. The experimental results agree well with the theoretical ones.

Key words: fiber optics; Raman back scattering; Rayleigh back scattering; distributed optical fiber; temperature

1 引 言

光纤传感器已经用于压力、温度、震动、电流、电压、磁场等物理量的检测^[1,2]。分布式光纤温度传感系统不仅具有普通光纤传感器的优点, 还具有对光纤沿线各点温度的分布式传感能力, 可以连续实时测量光纤沿线几公里内各点的温度, 商业化产品定位精度可达米的量级, 测温精度可达 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水平, 非常适合用于大范围多点测量的应用场合。因

此这种光纤传感器在高压电力电缆、大型发电机定子、大型变压器、锅炉、油库等设施的定点温度传感器场合具有广泛的应用。在分布式光纤拉曼温度系统中, 传统的解调方法^[3,4], 不管是斯托克斯散射光解调反斯托克斯散射光, 还是瑞利散射光解调反斯托克斯散射光, 都只消除了光纤材料对光的衰减、微弯引入的衰减、注入光脉冲功率的变化、探测器对光信号响应的差异等, 没有消除系统的温漂和由于拉

作者简介: 张利勋(1968—), 男, 四川人, 讲师, 博士研究生, 主要从事光电传感和光电信息处理方面的研究。

E-mail: zlx@uestc.edu.cn

导师简介: 刘永智(1942—), 男, 四川人, 教授, 博士, 主要从事光纤通信、光电传感和集成光学技术方面的研究。

E-mail: yzliu123@uestc.edu.cn

收稿日期: 2006-01-17; 收到修改稿日期: 2006-09-26

曼滤波器隔离度的限制,存在的“串音”现象。本文采用瑞利散射光时域反射仪(Optical time domain reflectometer,OTDR)曲线解调光纤的反斯托克斯散射光时域反射仪曲线,将测量温度范围分成正交的数个区域,用传统解调方法获得待测温度后,判断该温度属于某区域内,再用该对称的数个区域边界标定温度解调得偶数个测量温度,取平均值作为测量值。该方法提高了系统的测温精度和稳定性。实验结果与理论分析一致,系统的测温误差在 ± 0.05 °C内,空间分辨力达到1 m。

2 分布式光纤拉曼温度传感器原理

分布式光纤拉曼温度传感器系统主要依据光时域反射原理和光纤背向自发反斯托克斯散射的温度效应。为了消除光纤微弯损耗、注入光脉冲功率变化等对系统的影响,常用双波长方式即瑞利散射光解调反斯托克斯散射光,斯托克斯散射光解调反斯托克斯散射光,它们的相对灵敏度为1.065%、0.862%^[5]。瑞利散射光功率比入射激光功率低35 dBm,瑞利散射光比斯托克斯散射光高3个数量级,比反斯托克斯散射光高4个数量级^[6]。现在常用瑞利散射光解调反斯托克斯散射光,这需要拉曼滤波器的隔离度高于60 dB以避免瑞利散射光的串扰问题,才能保证1%的灵敏度,但现在的技术水平只能做到拉曼滤波器的隔离度为30~50 dB,瑞利背向散射光串扰反斯托克斯背向散射光不可避免^[4,5]。系统测温原理如图1所示^[5],将传感光纤布放在被监测温度场区,光源发出的脉冲激光进入传感光纤后,在沿光纤传输路径上不断激发产生后向拉曼光散射(包括斯托克斯光与反斯托克斯光),拉曼散射光强大小取决于光纤所在位置温度的高低。后向散射的拉曼光(主要探测反斯托克斯光)经特定滤波器送到光电探

测器转换成电信号进行信号处理(提高信噪比),最后通过光强大小(预先已定标)来确定沿光纤各处的温度。由于光在光纤中具有传播时间,因此利用光纤前端(发送端也是接收端)接收拉曼光的时间长短即可计算出对应温度的空间位置(距离)。

2.1 解调方法

反斯托克斯背向散射到入射端光子数^[3]:

$$N_a(T) = N_e K_a S \nu_a^4 R_a(T) \exp[-(a_0 + a_a)l], \quad (1)$$

瑞利背向散射到入射端光子数^[3]:

$$N_R = N_e K_R S \nu_0^4 \exp[-(a_0 + a_a)l], \quad (2)$$

式中 N_e 为入射进光纤的每个激光脉冲所包含的光子数, l 为光纤的长度, K_a 、 K_R 分别为与光纤反斯托克斯散射截面、瑞利截面等有关的系数, S 为光纤背向散射因子, ν_0 、 ν_a 分别为瑞利和反斯托克斯光子频率, a_0 、 a_a 为在光纤中入射光、反斯托克斯散射光平均传输损耗系数; T 为温度; $R_a(T)$ 为光纤拉曼散射的分子上、下能级的布居数^[3],表示为

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

其中 $\Delta\nu$ 为拉曼声子频率, h 为普朗克常量, k 为波尔兹曼常量。

用光纤的瑞利散射光时域反射仪曲线解调光纤的反斯托克斯散射光时域反射仪曲线。其方法是预先测得温度 T_0 的定标曲线与温度测量过程中曲线作比较,有

$$r = \frac{\frac{N_a(T)}{N_R} \cdot \eta \chi_{\text{SNR}} + e(T)}{\frac{N_a(T_0)}{N_R} \cdot \eta \chi_{\text{SNR}} + e(T_0)} = \frac{\frac{R_a(T)}{R_a(T_0)} + \frac{e(T)N_R}{\eta \chi_{\text{SNR}} N_a(T_0)}}{1 + \frac{e(T_0)N_R}{\eta \chi_{\text{SNR}} N_a(T_0)}}, \quad (4)$$

整理(4)式得

$$r - \frac{R_a(T)}{R_a(T_0)} = \frac{e(T) - re(T_0)}{\eta \chi_{\text{SNR}} N_a(T_0)} N_R, \quad (5)$$

式中 χ_{SNR} 为数字平均的信噪比改善因子, η 为光子数转换为电平信号的因子, $e(T)$ 、 $e(T_0)$ 为系统在温度 T 、 T_0 时的噪声,包括随机噪声、温漂噪声和瑞利散射光串扰反斯托克斯散射光噪声。

(5)式消除了光源的波动、滤波组件对两种波长光信号的滤波系数和雪崩光电二极管探测器对两种波长光信号响应度差异引起的误差。理论上我们认为(5)式右端为零时,已知温度 T_0 可计算出 T 。但实际上(5)式右端不能绝对为零,而且当 T 越大于 T_0 , r 就越大,尽管 $e(T)$ 、 $e(T_0)$ 为同数量级,但调解

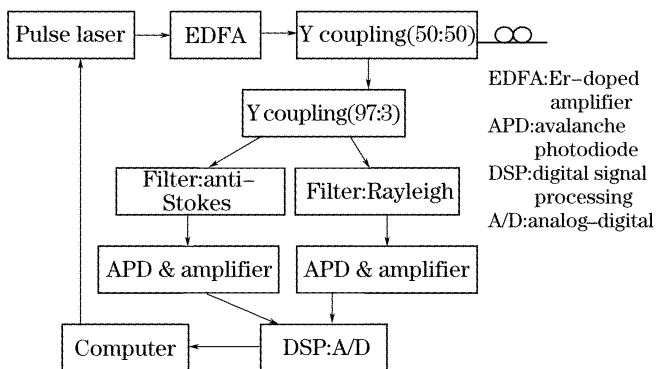


图1 分布式光纤拉曼温度传感系统

Fig.1 Distributed optical fiber Raman temperature sensor system

误差不可避免。文献[5]采取循环解调法,限制 r 变大,以提高系统测温精度。随机噪声随系统平均次数增加而减少,温漂噪声随系统平均次数增加而积累;定标时,选择系统稳定时进行,温漂噪声可以忽略,但在测量过程中,将激光二极管和雪崩光电二极管放置在低温致冷恒温器内,虽然提高了系统的稳定性,但仍存在长时间的温度漂移,也带来了开关电源的严重干扰,因而温漂噪声也不能忽略;而瑞利散射光串扰反斯托克斯散射光噪声由于选用的拉曼滤波器的隔离度不够也不可避免。

2.2 改进的解调方法

随系统的长时间工作, $e(t)$ 以 $e(T_0)$ 为中心波动,当系统使用的拉曼滤波器的隔离度低于 60 dB 时,瑞利背向散射光串扰反斯托克斯背向散射光时,(4)式第二式中分子、分母的第一项并非远远大于第二项, $e(T)$ 、 $e(T_0)$ 同数量级,由(5)式知误差与 r 的取值有关。 r 的范围由系统测温范围 $[T_0, T_N]$ 决定,如系统测温范围在 $(0 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C})$, $r \in [1, 2.3]$ 时。假如一直以 T_0 作为解调温度的标定温度,(5)式说明当 T 越大于 T_0 时, r 越大于 1,解调误差越大。文献[2]为了修正这种误差,在传感光纤过盲端加光纤取样环。

将测量温度范围分成数段,用(5)式获取待测温度后,判断该温度属于某段内,再用该对称的数段边界标定温度解调得偶数个温度测量值,取平均值作为测量值就可以避免上述问题。设测量温度范围分成如下数段:

$$\begin{cases} [T_0, T_N] = \bigcup_{i=0}^{n-1} A_i, & A_i = [T_i, T_{i+1}]; \\ T_{i+1} - T_i = \frac{T_N - T_0}{n}. & i = 0, 1, \dots, n-1 \end{cases} \quad (6)$$

用(5)式获取待测温度 $T \in A_i$, 取 $j = \min\{i, n-i-1\}$, $\min\{\}$ 表示取最小值。定标温度为 T_m

$$m = i - j, i - j + 1, \dots, i, i + 1, \dots, i + j + 1. \quad (7)$$

利用上述定标温度和(5)式获得 $2(j+1)$ 个测量温度 T_{im} :

$$r_m - \frac{R_a(T_{im})}{R_a(T_m)} = \frac{e(T_{im}) - r_m e(T_m)}{\eta \chi_{\text{SNR}} N_a(T_m)} N_R, \quad (8)$$

$m = i - j, i - j + 1, \dots, i, i + 1, \dots, i + j + 1$
 T_{im} 取平均值作为测量值 T_R :

$$T_R = \frac{1}{2(j+1)} \sum_{m=i-j}^{i+j+1} T_{im}, \quad (9)$$

(7)式的误差公式:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j+1} \sum_{m=0}^j \left\{ r_{i-m} + r_{i+m+1} - \frac{R_a[T_{i(i-m)}]}{R_a(T_{i-m})} - \frac{R_a[T_{i(i+m+1)})]}{R_a(T_{i+m+1})} \right\} = \\ & \frac{1}{j+1} \sum_{m=0}^j \left\{ \frac{e[T_{i(i-m)}]}{\eta \chi_{\text{SNR}} N_a(T_{i-m})} N_R + \frac{e[T_{i(i+m+1)}]}{\eta \chi_{\text{SNR}} N_a(T_{i+m+1})} N_R \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式说明误差趋于稳定,表明(9)式的温度值比(5)式计算温度的精度高且稳定性好。

3 测温实验

光纤拉曼温度传感器是基于自发拉曼散射效应工作的,因此不允许光纤中产生受激拉曼散射效应,即入射光功率不允许超过光纤中的受激拉曼散射阈值。1.55 μm 波长、5 km 长的普通单模光纤中的受激拉曼散射阈值^[7]约为 1.5 W。

采用功率 100 mW, 波长 1.55 μm , 脉冲宽度 10 ns 脉冲激光器和 15 dB 前置掺铒光纤放大器(EDFA), 脉冲功率达 3 W, 据图 1 中耦合器系数, 耦合到光纤的功率为 1.5 W; 采用高灵敏度、低噪声光雪崩二极管组件和 100 M、14 bit 模-数转换卡, 测量 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围的模-数理论分辨力为 $0.0061 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此设计 5 km 长度, 空间分辨力 1 m (由 10 ns 脉冲激光器和 100 M 模-数卡保证), 温度

分辨力 $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ 的光纤拉曼温度传感器是可行的。

本实验考虑将脉冲激光器和高灵敏度、低噪声光雪崩二极管组件等关键部件放在恒温槽中, 5 km 长光纤放在恒温箱中, 开机 10 min 后, 调节恒温箱的温

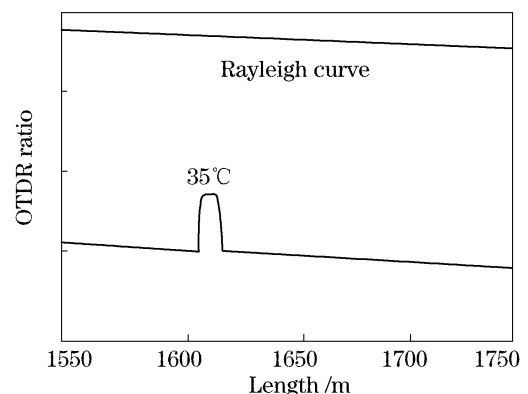


图 2 拉曼温度 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的光时域反射仪曲线
Fig. 2 Optical time domain reflectometer curve at Raman temperature $35 \text{ }^\circ\text{C}$

度,待稳定后分别作 0 °C, 10 °C, 20 °C, ..., 110 °C, 120 °C 的标定瑞利散射光时域反射仪曲线和反斯托克斯散射光时域反射仪曲线;然后将光纤线中部(离入射端 1610 m)20 m 长的光纤预留在恒温箱中,调节恒温箱的温度,待稳定后分别按照(5)式和(7)式计算恒温箱的温度:15 °C, 35 °C, 75 °C。

图 2 显示了测温的曲线,外界温度 5 °C;表 1~表 3 列出了一组(5)式和(9)式解调测温实验数据。由此可见,(5)式解调温度越远离标定温度,误差越大,而(9)式解调温度稳定,且精度高,误差稳定在 ±0.05 °C 内。实验结果与理论分析一致。

表 1 实验测得的温度数据(恒温箱内 15 °C)

Table 1 Experimental temperature datum
(thermostat's temperature: 15 °C)

Demarcated temperature	Formula (5) demodulation	Formula (9) demodulation
0	14.79	14.79
10		14.93
20		15.06
30		15.17
Average	14.79	14.987
Error	0.21	0.013

表 2 实验测得的温度数据(恒温箱内 35 °C)

Table 2 Experimental temperature datum
(thermostat's temperature: 35 °C)

Demarcated temperature	Formula (5) demodulation	Formula (9) demodulation
0	34.54	34.67
10		34.71
20		34.75
30		34.86
40		35.12
50		35.21
60		35.28
70		35.34
Average	34.54	34.993
Error	0.46	-0.007

表 3 实验测得的温度数据(恒温箱内 75 °C)

Table 3 Experimental temperature datum
(thermostat's temperature: 75 °C)

Demarcated temperature	Formula (5) demodulation	Formula (9) demodulation
0	74.01	
50		74.76
60		74.87
70		74.95
80		75.04
90		75.11
100	75.18	
Average	74.01	75.045
Error	0.99	-0.045

4 结 论

分布式光纤拉曼温度传感器系统是光机电和计算机一体化的测量系统,本文改进了传统的解调方法,将测量温度范围分成数段,用传统解调方法获取待测温度后,判断该温度属于某段内,再用该对称的数段边界标定温度解调得偶数个测量温度,取平均值作为测量值。该方法提高了系统的测温精度和稳定性。

参 考 文 献

- 1 Fredrik Jensen, Eiji Takada, Masaharu Nakazawa *et al.*. Distributed Raman temperature measurement system for monitoring of nuclear power plant coolant loops[C]. *SPIE*, 1996, **2895**: 132~141
- 2 R. Claps, M. Fink, P. Varghese. Raman measurement in gas flows using a high power laser diode[C]. *SPIE*, 1999, **3859**: 2~13
- 3 Zhang Zaixuan, Liu Tianfu, Zhang Buxin *et al.*. Laser Raman type distributed optical fiber temperature sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1985, **15**(11): 1586~1589 (in Chinese)
张在宣,刘天夫,张步新等. 激光拉曼型分布光纤温度传感器系统[J]. *光学学报*, 1985, **15**(11): 1586~1589
- 4 Zhang Zaixun, Wang Jianfeng, Liu Honglin *et al.*. Experimental Research of 30 km long distance distributed optical fiber Raman temperature sensor system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(5): 612~616 (in Chinese)
张在宣,王剑锋,刘红林等. 30 km 长分布式光纤拉曼温度传感器系统的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 612~616
- 5 Zhang Lixun, Ou Zhonghua, Liu Yongzhi *et al.*. A circulated demodulated method of distributed fiber Raman temperature sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1176~1178 (in Chinese)
张利勋,欧中华,刘永智等. 分布式光纤拉曼温度传感器的循环解调法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1176~1178
- 6 Zhang Lixun, Ou Zhonghua, Liu Yongzhi *et al.*. Distributed optical fiber Raman temperature sensor with amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 55~561 (in Chinese)
张利勋,欧中华,刘永智等. 带光放大器的分布式光纤拉曼温度系统[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(4): 559~561
- 7 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* trans., Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2002
Agrawal G P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方,余震虹,谈斌等译. 北京:电子工业出版社, 2002