

# 分布式光纤喇曼温度传感器的循环解调法

张利勋<sup>1</sup> 欧中华<sup>1</sup> 刘永智<sup>1</sup> 代志勇<sup>1</sup> 彭增寿<sup>1</sup> 王大文<sup>2</sup>

(1 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2 中电科技集团八所, 安徽淮南 210053)

**摘 要** 为了抑制温漂噪声积累, 瑞利背向散射光窜扰反斯托克斯背向散射光, 考虑了最近测量瑞利背散射光曲线解调反斯托克斯背向散射光温度曲线方法, 即循环解调方法; 该方法提高了系统的测温精度、稳定性, 降低了系统的成本. 实验结果与理论分析一致, 系统的测温精度达  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ .

**关键词** 瑞利背散射; 喇曼背散射; 分布式光纤喇曼温度传感器; 光学时域反射技术

**中图分类号** TP212; TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

基于分布式光纤喇曼温度系统中, 已知温度的定标 OTDR (光时域反射技术) 曲线解调测量时, OTDR 曲线<sup>[1]</sup>的传统温度解调方法随系统的长时间工作、热漂噪声积累和滤波片的劣化, 瑞利背向散射光子窜扰反斯托克斯背向散射光子, 使得测温精度越来越低, 而要重新定标几乎不可能. 本文采用考虑最近已知温度 OTDR 曲线解调测量时的 OTDR 曲线的循环解调方法, 不需要恒温槽就获得了良好的结果, 降低了系统成本. 实验表明测温精度可达  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ .

## 1 分布式光纤喇曼温度传感器原理

在分布式光纤喇曼温度传感器系统<sup>[1]</sup>中, 与三种散射光有关, 即斯托克斯散射光、反斯托克斯散射光、瑞利散射光. 为了消除光纤特性、注入光脉冲功率的变化等对系统的影响, 常用双波长方式即瑞利散射光解调斯托克斯散射光或反斯托克斯散射光, 斯托克斯散射光解调反斯托克斯散射光, 他们的相对灵敏度为 0.104%、1.065%、0.806%<sup>[2]</sup>. 瑞利散射光比斯托克斯散射光强 3 个数量级左右, 比反斯托克斯散射光强 4 个数量级左右. 现在常用瑞利散射光解调反斯托克斯散射光, 系统测温原理如图 1. 由计算机启动同步控制单元产生同步触发脉冲, 启动半导体激光器 (LD) 的驱动源产生一大电流的窄脉冲, 该脉冲驱动半导体激光器产生大功率的光脉冲, 经过光路耦合器 (50:50) 后进入传感光纤. 这时携带温度信息的背向喇曼散射光经过定向耦合器 (97:3, 97 为反斯托克斯光) 耦合到接收通道, 分光器由二个不同中心波长的滤光片组成, 它们分别滤出瑞利光与反斯托克斯光, 并且将它们送入信号接

收与处理单元, 并由计算机计算、存储、打印分布温度值.

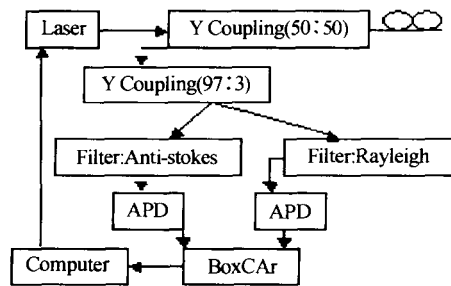


图 1 喇曼散射分布式测温系统

Fig. 1 Distributed temperature system based on Raman scattering

### 1.1 解调方法

反斯托克斯背向散射到入射端光子数

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

瑞利背向散射到入射端光子数

$$N_r(T, l) = N_e K_r S \nu_r^4 \exp[-(a_0 + a_r)l] \quad (2)$$

式中  $N_e$  为入射进光纤的每个激光脉冲所包含的光子数;  $l$  为入射端到测温点的长度;  $K_a, K_r$  分别为与光纤反斯托克斯散射截面、瑞利散射截面等有关的系数;  $S$  为光纤背向散射因子;  $\nu_0, \nu_a$  分别为瑞利和反斯托克斯光子频率;  $a_0, a_a$  为在光纤中入射光子、反斯托克斯散射光平均传输损耗系数;  $R_a(T)$  为光纤喇曼散射的分子上、下能级的布居数

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

其中  $\Delta\nu = 13.2 \text{ THz}$  为喇曼声子频率,  $h$  为普朗克常数,  $k$  为波尔兹曼常数.

光纤的瑞利散射 OTDR 曲线解调反斯托克斯散射 OTDR 曲线, 此时

$$\frac{N_a(T, l)}{N_r(T, l)} = \left(\frac{K_a}{K_r}\right) (\nu_a/\nu_0)^4 R_a(T) \cdot \exp[-(a_a - a_0)l] \quad (4)$$

$$S_a(T) = \frac{N_a(T, l)/N_r(T, l)}{N_a(T_0, l)/N_r(T_0, l)} = \frac{R_a(T)}{R_a(T_0)} = \frac{\exp(h\Delta\nu/kT_0) - 1}{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1} \quad (5)$$

在实际测量时, 已知起始温度  $T_0$ , 则从式(5)中可确定光纤上各点的温度.

### 1.2 改进的解调方法

式(5)左端改为实际光电转换后, 经数字平均  $2^{14} \sim 2^{16}$  后的信号电平比

$$r_{s_a} = \frac{SNR\eta N_a(T, l)/N_R(T, l) + e(T)}{SNR\eta N_a(T_0, l)/N_R(T_0, l) + e(T_0)} \quad (6)$$

式中  $SNR$  为数字平均的信噪比改善因子,  $e(T)$ ,  $e(T_0)$  为系统在不同温度下的噪声,  $\eta$  为光子数转化为电平的系数. 由式(5)和(6)得

$$\left| r_{s_a} - \frac{R_a(T)}{R_a(T_0)} \right| = \left| \frac{e(T) - r_{s_a} e(T_0)}{SNR\eta N_a(T_0, l)/N_R(T_0, l)} \right| \quad (7)$$

式(7)说明用式(5)解调温度, 随系统的长时间工作, 热漂噪声积累和滤波片的劣化, 瑞利背向散射光子窜扰反斯托克斯背向散射光子, 使得  $e(T)$  比  $e(T_0)$  大几个数量级, 这样测温精度越来越低, 而要重新定标几乎不可能. 因此采用循环解调法可以避免上述问题, 在系统的长时间工作中, 用最近已知 OTDR 温度 ( $T_n$ ) 曲线解调待测 OTDR 温度 ( $T_{n+1}$ ) 曲线, 测温精度会一直保持较高水平. 式(5)变为

$$S_i(T) = \frac{N_a(T_{n+1}, l)/N_R(T_{n+1}, l)}{N_a(T_n, l)/N_R(T_n, l)} = \frac{R_a(T_{n+1})}{R_a(T_n)} = \frac{\exp(h\Delta\nu/kT_n) - 1}{\exp[h\Delta\nu/kT_{n+1}] - 1} \quad (8)$$

式(7)变为

$$\left| r_{s_a} - \frac{R_a(T_{n+1})}{R_a(T_n)} \right| = \left| \frac{e(T_{n+1}) - r_{s_a} e(T_n)}{SNR\eta N_a(T_n, l)/N_R(T_n, l)} \right| \quad (9)$$

$r_{s_a} \propto 1$ ,  $e(T_{n+1})$  与  $e(T_n)$  相当, 用式(8)计算温度比式(5)计算温度的精度高,  $n$  为测量次数.

## 2 测温实验

由于滤波片的劣化需要特别长的时间才呈显, 所以本实验考虑热漂噪声积累的影响, 脉冲激光器和灵敏度高、低噪声光雪崩二极管组件 APD 等关键部件没有放在恒温槽中, 开机 10 min 后, 计量放在与室温相同的  $T_0 = 20.3^\circ\text{C}$  恒温箱中 2 千米长光纤的瑞利和反斯托克斯定标 OTDR 曲线; 然后将光纤线中部 (离入射端 980 m) 20 m 长的光纤预留在恒温箱中, 加热恒温箱至  $45.5^\circ\text{C}$ , 1 h 后每 2 h 进行一次测温实验, 共进行了 10 次实验.

图 2 显示了测温的曲线, 图中上线是瑞利 OTDR 曲线; 中线为多次测量的反斯托克斯 OTDR 曲线的重叠; 下线为 APD 主放大器降低一倍时其中一次反斯托克斯 OTDR 曲线 (图 2 中没有显示端面反射是由于待激光器脉冲发出后, A/D 滞后采集

的结果). 表 1 列出了一组式(5)和式(8)解调测温实验数据. 由此可见, 式(5)解调测温精度达到  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ ; 式(6)解调测温精度达  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ , 与理论分析一致.

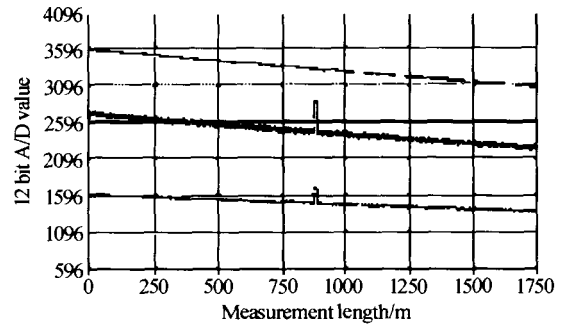


图 2 光纤喇曼 OTDR 曲线

Fig. 2 The raman OTDR curves of fiber

表 1 测温实验数据

序号	式(5)解调温度	式(6)解调温度
1	45.52	45.52
2	45.58	45.53
3	45.49	45.49
4	45.57	45.54
5	45.59	45.49
6	45.71	45.52
7	45.75	45.53
8	46.23	45.48
9	46.57	45.49
10	46.58	45.51
T(平均值)	45.89	45.51
不确定差	1.18	0.04

## 3 结论

分布式光纤喇曼光子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, 采用循环解调方法, 抑制了温漂噪声积累, 瑞利背向散射光子窜扰反斯托克斯背向散射光子, 提高了系统的测温精度和稳定性; 取消了恒温槽, 降低了系统成本.

### 参考文献

- 1 苏国彬, 李铮. 分布式光纤喇曼测温系统光接收机的动态范围及测温数据的修正. 光子学报, 2002, 31(4): 475~479  
Su G B, Li Z. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(4): 475~479
- 2 张在宣, 沈为民, 郭宁, 等. 分布光纤喇曼光子传感器系统的一种解调方法. 光子学报, 1998, 27(5): 467~471  
Zhang Z X, Shen W M, Guo N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(5): 467~471
- 3 Lees G P. Advances in optical fiber distributed temperature sensing using the Landau-Placzek ratio. *IEEE Photonics Technol*, 1998, 10(1): 126~128
- 4 Wakami T, Tanaka S. 1.55  $\mu\text{m}$  long span fiber optic distributed temperature sensor, International Conference on

- Optical fiber Sensors OFS94, Glasgow UK, 1994. 134~137
- 5 耿军平, 许家栋, 李焱, 等. 基于光频域喇曼散射的全分布式光纤温度传感器模型研究. 光子学报, 2002, **31**(10): 1262~1265
- Geng J P, Xu J D, Li Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1262~1265
- 6 宋牟平, 范胜利, 陈好, 等. 基于光相干外差检测的布里渊散射 DOFS 的研究. 光子学报, 2005, **34**(2): 233~236
- Song M P, Fan S L, Chen H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 233~236

## A Circulated Demodulated Method of Distributed Fiber Raman Temperature Sensor

Zhang Lixun<sup>1</sup>, Ou Zhonghua<sup>1</sup>, Liu Yongzhi<sup>1</sup>, Dai Zhiyong<sup>1</sup>, Peng Zengshou<sup>1</sup>, Wang Dawen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-electronic Information UESTC, Cheng du, Sichuan 610054

<sup>2</sup> Eighth Graduate School of China-Electronic Science Group, Huainan, Anhui 210053

Received date: 2005-01-06

**Abstract** In order to restrain the temperature excursion accumulation and Anti-Stokes back scattering intermingled with Rayleigh back scattering, a new type of demodulation method for distributed fiber Raman temperature sensor is proposed. By this method, which is named as circulated demodulated method(CDM), the Anti-Stokes optical time domain reflectance (OTDR) curves is demodulated by Rayleigh OTDR curves. The remedy increases the temperature precision, stability and sensitivity of system, reduces the cost of the system. The experiment results agree with the theory and the precision reaches at  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ .

**Keywords** Rayleigh back scattering; Raman back scattering; Distributed fiber Raman temperature sensor; Optical time domain reflectance



**Zhang Lixun** was Born in 1968, graduated from University of Electronic Science and Technology of China. He is a Ph. D. candidate in School of Opto-electronic Information of UESTC. His research interests include: nonlinear optics, opto-electronic sensor and fiber optical communication.