

文章编号: 1001-3806(2006)02-0165-03

1 55 μ m 喇曼温度传感器的强循环解调方法

张利勋, 廖云, 刘永智*, 欧中华, 代志勇, 彭增寿
(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 针对 1.55 μ m 喇曼滤波器的隔离度不高的情况, 提出了抑制背景噪声、热漂噪声积累、瑞利背向散射光窜扰反斯托克斯背向散射光的喇曼温度传感器的强循环解调方法。提高了系统的灵敏度、温度测量精度和稳定性; 取消了恒温槽, 降低了系统成本。实验表明, 该解调方法使温度测量精度达到 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 散射; 喇曼; 瑞利; 分布式光纤温度传感器

中图分类号: TP212 TN25 **文献标识码:** A

Circulation demodulation method for 1.55 μ m Raman temperature sensors

ZHANG Li-xun, LIAO Yun, LIU Yong-zhi, OU Zhong-hua, DAI Zhi-yong, PENG Zeng-shou

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054 China)

Abstract Because the isolation performance of Raman filter is not high, a new demodulation method is proposed to suppress the system background noise, heat excursion accumulation and anti-Stokes backward scattering intermingled with Rayleigh backward scattering. The new method can improve the temperature precision, stability and sensitivity of system and reduce the system cost with the constant temperature groove abrogated. The experimental results show its measurement precision is better than 0.05°C .

Key words scattering Raman; Rayleigh distributed optical fiber temperature sensor

引 言

温度是一切物理、化学和生物过程的重要状态参量之一, 温度测量在工程应用和科学研究中占有十分重要的位置。光纤本身不受射频场和其它电磁辐射干扰的影响, 不产生电火花并且绝缘性好等特性, 使得光纤温度传感器成为军用和民用蒙皮结构中有效的分布温度测量手段^[1-4]。

基于分布式光纤喇曼温度传感器系统^[1]中, 为了消除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, 它们的相对灵敏度为 0.104%, 1.063%, 0.806%^[1]。瑞利散射光比斯托克斯散射光强 30dB 左右, 比反斯托克斯散射光强 40dB 左右。在设计喇曼滤波器的隔离度时要求至少达到 60dB 以上, 才能

使进入后向反斯托克斯喇曼散射光信号通道的后向瑞利散射光在 1% 左右, 才能保证系统的温度灵敏度。传统的温度解调方法^[2]是已知温度的定标光时域反射 (optical time domain reflection, OTDR) 曲线解调测量时的 OTDR 曲线, 测量时的系统噪声就以定标时的系统噪声为中心波动, 测温稳定差。1.55 μ m 脉冲激光入射到单模光纤产生的喇曼频移, 斯托克斯光波长 1.64 μ m, 反斯托克斯散射光波长 1.46 μ m, 在 1.46 μ m~1.64 μ m 波段内, 以现在的工艺制造喇曼滤波器的隔离度达 60dB 以上是困难的。作者提出了瑞利散射光曲线解调反斯托克斯背向散射光温度曲线的强循环解调方法, 即首先减去背景噪声, 然后用最近已知 OTDR 温度曲线解调待测 OTDR 温度曲线, 抑制了热漂噪声积累, 瑞利背向散射光窜扰反斯托克斯背向散射光。取消了恒温槽, 降低了系统成本; 提高了系统的灵敏度、测温精度和稳定性。实验表明, 该解调方法使温度测量精度达到 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。

1 分布式光纤喇曼温度传感器原理

分布式光纤喇曼温度传感器系统主要依据 OTDR 原理和光纤背向自发反斯托克斯散射光的温度效应 (见图 1)。

作者简介: 张利勋 (1968-), 男, 讲师, 在职博士研究生, 主要从事非线性光学及光电信息处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yzliu123@uestc.edu.cn

收稿日期: 2005-03-14 收到修改稿日期: 2005-06-13

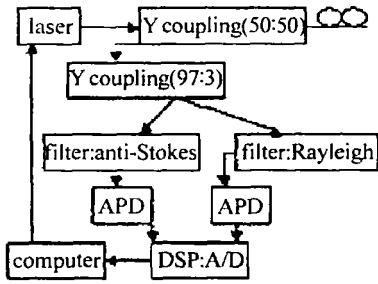


Fig 1 Distributed temperature system based on Raman scattering

1.1 传统的解调方法

反斯托克斯背向散射到入射端光子数^[1]:

$$N_a(T, l) = N_0 K_a S \nu_a^\dagger R_a(T) \exp[-(a_0 + a_a)l] \quad (1)$$

瑞利背向散射到入射端光子数^[1]:

$$N_s(T, l) = N_0 K_R S \nu_0^\dagger \exp(-2a_0 l) \quad (2)$$

式中, N_0 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; 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、下能级的布居数^[1]:

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

式中, $\Delta\nu = 13.2$ THz 为喇曼声子频率, h 为普朗克常数, k 为玻耳兹曼常数。

光纤的瑞利散射 OTDR 曲线解调反斯托克斯散射 OTDR 曲线, 此时:

$$N_a(T, l) N_R(T, l) = (K_a K_R) \cdot (\nu_a \nu_0) \cdot R_a(T) \cdot \exp[-(a_a - a_0) \cdot l] \quad (4)$$

$$S_1(T) = \frac{N_a(T, l) N_R(T, l)}{N_a(T_0, l) N_R(T_0, l)} = \frac{R_a(T)}{R_a(T_0)} = \frac{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1}{\exp(h\Delta\nu/kT_0) - 1} \quad (5)$$

$S_1(T)$ 为解调的理论值比, 在实际测量时, 已知起始温度 T_0 , 则从 (5) 式中可确定光纤上各点的温度。

1.2 改进的解调方法

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

$$r_1 = \frac{X_{SNR} \cdot \eta N_a(T, l) N_R(T, l) + e(T)}{X_{SNR} \cdot \eta N_a(T_0, l) N_R(T_0, l) + e(T_0)} \quad (6)$$

式中, X_{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, η 为光电转化系数。由 (5) 式和 (6) 式得:

$$\left| r_1 - \frac{R_a(T)}{R_a(T_0)} \right| = \left| \frac{e(T) - r_1 e(T_0)}{X_{SNR} \cdot \eta N_a(T_0, l) N_R(T_0, l)} \right| \quad (7)$$

随系统的长时间工作, $e(T)$ 以 $e(T_0)$ 为中心波动, 当瑞利背向散射光窜扰反斯托克斯背向散射光时, (6) 式中分子、分母的第 1 项不是远远大于第 2 项; 在 $0 \sim$

120°C 范围内, $r_1 \in [1.0 \sim 3]$, $r_1 > 1$ 时, (7) 式中 $e(T) - r_1 e(T_0)$ 没有最大程度地消除噪声, 说明用 (5) 式解调温度, 测温不稳定且温漂大。通常在相邻的测量时间内, 外界温度的变化量不大, 因此, 提出瑞利散射光曲线解调反斯托克斯背向散射光温度曲线的强循环解调方法, 即首先减去背景噪声 $e(T_0)$, 然后用最近已知 OTDR 温度曲线解调待测 OTDR 温度曲线来抑制热漂噪声积累, 瑞利背向散射光窜扰反斯托克斯背向散射光。新的解调公式为:

$$S_2(T) = \frac{N_a(T_{n+1}, l) N_R(T_{n+1}, l) - N_a(T_0, l) N_R(T_0, l)}{N_a(T_n, l) N_R(T_n, l) - N_a(T_0, l) N_R(T_0, l)} = \frac{R_a(T_{n+1}) - R_a(T_0)}{R_a(T_n) - R_a(T_0)} \quad (8)$$

$S_2(T)$ 为新解调的理论值比, n 为测量次数。相应地, 按 (6) 式和 (7) 式的关系有 (r_{s_2} 为 $S_2(T)$ 的信号电平比):

$$\left| r_{s_2} - \frac{R_a(T_{n+1}) - R_a(T_0)}{R_a(T_n) - R_a(T_0)} \right| = \left| \frac{e(T_{n+1}) - e(T_0) - r_{s_2} [e(T_n) - e(T_0)]}{X_{SNR} \cdot \eta [N_a(T_n, l) N_s(T_n, l) - N_a(T_0, l) N_s(T_0, l)]} \right| \quad (9)$$

$e(T_{n+1})$ 与 $e(T_n)$ 相当, $r_{s_2} \approx 1$, (9) 式说明, 用 (8) 式计算温度比用 (5) 式计算温度的精度高且稳定。

1.3 系统的灵敏度

由 (5) 式和 (8) 式得^[5]:

$$\begin{cases} \frac{dS_1(T)}{S_1(T) dT} = \frac{h\Delta\nu}{kT^2} \\ \frac{dS_2(T)}{S_2(T) dT} = \frac{h\Delta\nu}{kT^2} \cdot \frac{\exp(-h\Delta\nu/kT)}{[\exp(-h\Delta\nu/kT) - \exp(h\Delta\nu/kT_0)]} \end{cases} \quad (10)$$

两种解调方法的温度曲线是非线性的, 在局部温度 $0 \sim 120^\circ\text{C}$ 范围内, 可得到平均温度灵敏度^[1] $S_1(T) = 1.065\% / ^\circ\text{C}$ 。 $S_1(T)$ 的灵敏度与 T_0 取值有关, 通常 T_0 取起始温度值, $T_0 = 0^\circ\text{C}$, 此时的 $S_2(T)$ 的平均灵敏度为 $S_2(T) = 4.5\% / ^\circ\text{C}$; $S_2(T)$ 比 $S_1(T)$ 的温度灵敏度高约 3 倍。

2 测温实验

分布式光纤喇曼传感器测温系统见图 1。 1.55 μm 脉冲激光器和高灵敏度、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, 喇曼滤波器的隔离度为 45 dB; 开机 10 min 后, 计量放在 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 恒温箱中, 2 km 长光纤的瑞利和反斯托克斯定标 OTDR 曲线; 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, 调恒温箱至 45°C , 1 h 后, 每 2 h 进

行 1 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

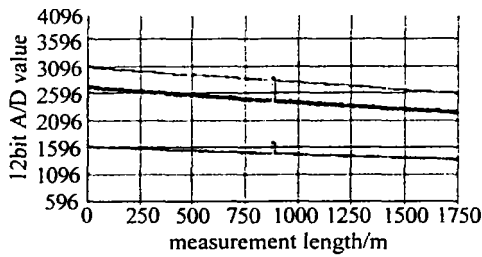


Fig 2 The curves of optical fiber Raman

Table 1 Test datum of temperature / $^{\circ}\text{C}$

number	demodulated temperature of formula (5)	demodulated temperature of formula (8)
1	46.58	45.52
2	46.57	45.53
3	46.59	45.49
4	46.52	45.54
5	46.49	45.49
6	46.71	45.52
7	46.75	45.53
8	47.57	45.48
9	47.53	45.49
10	47.58	45.51
average	46.89	45.51
uncertain	2.18	0.04

叠;下线为 APD 主放大器降低 1 倍时其中 1 次反斯托克斯 OTDR 曲线,表 1 中列出了 1 组 (5) 式和 (8) 式解调测温实验数据。由此可见: (5) 式解调温度测量精度达到 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$; (8) 式解调温度测量精度达 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$,与理论分析一致。

3 结 论

分布光纤喇曼温度传感器系统是光机电和计算机一体化的测量系统,选 1.55 μm 脉冲激光器构建长距离分布式温度传感器系统,须用新的解调方法来抑制热噪声积累,瑞利背向散射光干扰反斯托克斯背向散射光才能提高系统的灵敏度、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] ZHANG Z X, LIU T F, ZHANG B X *et al*. Laser Raman type distributed optical fiber temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica* 1995, 15(11): 1585~1589(in Chinese).

[2] ZHANG Z X, SHEN W M, GUO N *et al*. A demodulated method of distributed optical fiber Raman photons sensors system [J]. *Acta Photonica Sinica* 1998, 27(5): 467~471(in Chinese).

[3] XIE A D, SHI D H, CHEN Y K *et al*. Temperature measurement sensitivity of a practical real-time temperature measurement system [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 625~629(in Chinese).

[4] LIU S H, JIN X D. Design of a fiber optical thermometer [J]. *Laser Technology* 1995, 19(6): 338~340(in Chinese).

[5] LEES G P. Advances in fiber distributed temperature sensing using the Landau-Placzek ratio [J]. *IEEE Photonics Technology*, 1998, 10(1): 126~128

(上接第 135 页)

激光器、棒状的固体激光器等。“猫眼”谐振腔激光器很可能成为将来最常用的具有高稳定性的激光器之一。

参 考 文 献

[1] SVELTO O, HANNA D C. Principle of lasers [M]. New York Plenum Publishing Corporation, 1998 161~171

[2] OU J M, LI Y, ZHANG S L *et al*. He-Ne laser with a CER cavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* 2000, 415(7): 27~30(in Chinese).

[3] LIN Y B, ZHANG G X, LI Z. An improved “cat’s eye” retroreflector used in a laser tracking interferometer system [J]. *Measurement Science & Technology*, 2003, 14(6): 36~40.

[4] TAKATSU J I, GOTO M, OSAWA S *et al*. Whole-viewing angle “cat’s eye” retroreflector as a target of laser trackers [J]. *Measurement Science & Technology*, 1999, 10(7): 87~90.

[5] ALASIA F, BIRELLO G, CAPELLIA *et al*. The HG5 laser interferometer mercury manometer of the MGC [J]. *Metrologia*, 1999, 36(6): 499~503

[6] ZURCHER W, LOSER R, KYLE S A. Improved reflector for interferometric tracking in 3 dimensions [J]. *Opt Engng* 1995, 34(9): 2740~2473

[7] LIT, SMITH P W, LAB C H *et al*. Mode selection and mode volume

enhancement in a gas laser with internal lens [J]. *Proc IEEE*, 1965, 53(4): 399~400

[8] DMAKOV S A, KLMENTEV S I, KYPRENYUK V *et al*. Low-sensitive to misalignments resonator [J]. *Proc SPIE*, 1994, 2257: 187~192

[9] SHERSTOBITOV V E, AGEICH K A A, BULAEV V D *et al*. Phase conjugation in a high-power E-beam sustained CO₂ laser [J]. *Proc SPIE*, 1991, 1841: 135~145.

[10] DMAKOV S A, HABICH U, KLMENTEV S I *et al*. Comparison of radiation characteristics of lasers equipped with ordinary stable resonator and resonator with cat-eye type mirror [A]. *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe Technical Digest* [C]. Piscataway IEEE, 1998 218~218

[11] DMAKOV S A, KLMENTEV S I, KHLOPONNA V. Cavity with a cat’s eye reflector based on elements of conical optics [J]. *Journal of Optical Technology*, 2002, 69(8): 536~540

[12] FERMIER B, LUCAS-LECLIN G, DUPONT J *et al*. Self aligned external cavity semiconductor lasers for high resolution spectroscopy [J]. *Opt Commun* 1998, 153 73~77.

[13] RAMOSIZQUIERDO L, BUFTON J L, HAYES P. Optical system design and integration of the Mars observer laser altimeter [J]. *Appl Opt* 1994, 33(3): 307~322

[14] CHENG Y, CHEN B, WANG X B *et al*. Study on diode pumped solid laser (DPSSL) with alignment-free resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2003, 30(11): 973~976(in Chinese).