

分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度*

王 玮 周邦全

(中国计量学院基础部, 杭州 310034)

张在宣 吴孝彪 郭 宁 余向东 王其良

(中国计量学院光电子技术研究所, 杭州 310034)

摘 要 在分布型光纤拉曼光子温度传感器(DOFRPTS)系统中, 自发拉曼光子是温度信息的载体, 在 2 km 光纤上实时采样 1000 个点, 用于空间温度场分布的测量。系统采用拉曼光时域反射技术, 对所测点进行定位。对分布光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度进行了讨论, 由系统的信噪比来确定测温精度, 提出了改善测温精度的方法, 实际系统的测温精度达 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

关键词 拉曼光子, 分布光纤传感器, 光时域反射技术, 测温精度。

1 引 言

分布型光纤拉曼光子传感器是一种用于测量空间温度场、压力场、应力场分布的光子传感器系统^[1-3]。在系统中自发拉曼散射光子是温度信息的载体, 在 2 km 光纤上可实时采样 1000 个温度信息。利用光时域反射(OTDR)技术可对所测点进行精确定位。由于系统具有阻燃、防爆、抗腐蚀、抗电磁干扰、在有害环境中使用安全, 实现实时快速多点测温并定位, 具有程控报警电平, 系统本身具有自检测(即使光纤系统受损或断裂, 能自动检测断点位置, 系统仍能工作)、自标定和自较准功能, 是光机电、计算机一体化技术。近年来已开始应用于大型仓库、油库、危险品库、大型轮船的货轮、高层建筑、煤矿、隧道和输油管道的火灾防护及报警系统, 各种大、中型变压器及发电机组的温度分布测量、热保护和故障依断, 化工原料及油料生产过程中的在线、动态检测, 把它作为一种典型的机敏结构用于航空、航天飞行器的在线、动态检测系统和机器人的神经网络系统。

2 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统测温原理^[4, 5]

在分布型光纤拉曼光子温度传感器系统中, 温度信号通过自发拉曼散射效应调制了光纤中由脉冲激光产生的自发拉曼光子数, 经调制后得到空间温度场分布的信息。

* 国家首批产学研工程项目资助。

收稿日期: 1997-09-15; 收到修改稿日期: 1997-12-01

2.1 调制方法

斯托克斯拉曼光子数:

$$N_s = K_s S \gamma_s^4 N_e R_s(T) \quad (1)$$

反斯托克斯拉曼光子数:

$$N_a = K_a S \gamma_a^4 N_e R_a(T) \quad (2)$$

式中, N_e : 入射进光纤每个激光脉冲所包含的光子数, K_s 、 K_a : 分别为与光纤的斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射截面等有关的系数; S : 光纤的背向散射因子; γ_s 、 γ_a : 分别为斯托克斯和反斯托克斯拉曼光子频率, $R_s(T)$ 、 $R_a(T)$: 分别为与光纤分子(SiO_2)拉曼散射相关的分子上、下能级的布居数有关, 分子能级上的布居数与温度有关:

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

$$R_a(T) = [\exp(h\Delta\gamma/kT) - 1]^{-1} \quad (4)$$

式中, $\Delta\gamma$ 为拉曼声子频率, h 为普朗克常数, k 为玻耳兹曼常数。

有三种解调方法。若系统是稳定的, 光纤的起始的热力学温度为 T_0 , 之后上升到 T , 用 $N(T_0)$ 来解调 $N(T)$:

$$\frac{N_a(T)}{N_a(T_0)} = \frac{R_a(T)}{R_a(T_0)} = \frac{\exp(h\Delta\gamma/kT_0) - 1}{\exp(h\Delta\gamma/kT) - 1} \quad (5)$$

$$\frac{N_s(T)}{N_s(T_0)} = \frac{R_s(T)}{R_s(T_0)} = \frac{1 - \exp(-h\Delta\gamma/kT_0)}{1 - \exp(-h\Delta\gamma/kT)} \quad (6)$$

在(5)式、(6)式中, 对 SiO_2 分子来说拉曼声子频率 $\Delta\gamma_{\text{SiO}_2} = 1.32 \times 10^{13}$ Hz, 若起始热力学温度 T_0 已知, 通过测量 $N_a(T)/N_a(T_0)$ 或 $N_s(T)/N_s(T_0)$ 即可由(5)式、(6)式确定待测光纤温度。

为了消除系统的不稳定性以及环境的干扰、光纤在测量过程中弯曲、受压等变化影响, 常常采用双通道方式: 用斯托克斯拉曼光子数来解调反斯托克斯拉曼光子数

$$F(T) = N_a(T)/N_s(T) = \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_s}\right)^4 \exp(-h\Delta\gamma/kT) \quad (7)$$

在实际系统中, 并不是直接测量光子数而是经光电变换后测量信号电平。

2.2 系统的温度灵敏度^[5]

在分布型光纤拉曼光子温度传感器系统中, 当光纤温度每改变 1°C 时, 信号电平的变化量 ΔV 称为系统的温度灵敏度; 信号电平的相对变化量称为相对温度灵敏度。在 $100 \sim 1000$ K 的热力学温度范围内, 在局域里三种解调方法的热力学温度曲线如图 1 所示。在光纤为温度 T 时, 曲线斜率就是温度灵敏度。通常通信光纤耐温不超过 150°C , 特种光纤才耐高温。

要得到温度灵敏度的表达式, 只要求(5)式、(6)式和(7)式对 T 的偏微商, 就可得到以下的(8)式、(9)式和(10)式。在表达式中除 T 需设定外, 其它均为已知常数, 由此在定出热力学温度 T 后即可求得该温度的相对灵敏度。

$$S_a = \frac{h\Delta\gamma}{kT^2} [\exp(h\Delta\gamma/kT_0) - 1] [\exp(h\Delta\gamma/kT)] [\exp(h\Delta\gamma/kT) - 1]^{-2} \quad (8)$$

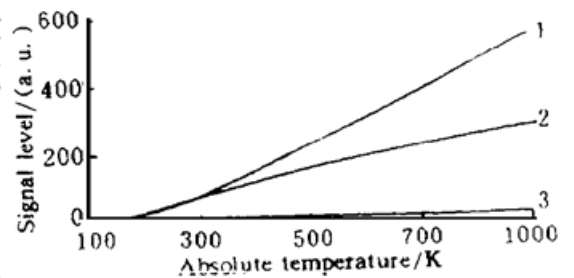


Fig.1 Temperature curves of three demodulated methods

$$S_s = \frac{h\Delta Y}{kT^2} [1 - \exp(-h\Delta Y/kT_0)] [\exp(-h\Delta Y/kT)] [1 - \exp(-h\Delta Y/kT)]^{-2} \quad (9)$$

$$S_F = \frac{h\Delta Y}{kT^2} \exp\left[\frac{h\Delta Y}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (10)$$

三种解调方法的温度曲线是非线性的，在局部温度范围内近似作为线性的，可得到平均温度灵敏度。在 0~ 120℃ 范围内 $\overline{S_a}$ 、 $\overline{S_s}$ 、 $\overline{S_r}$ 分别为 1.065%/℃、0.104%/℃ 和 0.862%/℃。

2.3 拉曼光时域反射

采用光时域反射技术，考虑到光纤的损耗，(1) 式、(2) 式改写为：

$$N_a(t) = K_a S Y_a^4 N_c R_a(t) \exp\left[-(\alpha_0 + \alpha_a) \frac{c}{2n} t\right] \quad (11)$$

$$N_s(t) = K_s S Y_s^4 N_c R_s(t) \exp\left[-(\alpha_0 + \alpha_s) \frac{c}{2n} t\right] \quad (12)$$

式中， α_0 、 α_s 、 α_a 表示在光纤中入射光子、斯托克斯的反斯托克斯拉曼光子的平均传输损耗。表 1 列出了多模光纤背向散射损耗和传输损耗。

Table 1. The back direction scattering and transmission losses of optical fiber

types of scattering	frequency/Hz	scattering loss/dB	transmission losses/dB
Rayleigh scattering	3.315×10^{14}	- 46	- 3.0
Stokes Ramanscattering	3.183×10^{14}	- 72	- 2.7
anti-Stokes Raman scattering	3.447×10^{14}	- 75	- 3.3

在时域里，(5) 式、(6) 式不变，但(7) 式由于多模光纤存在色散而修改为：

$$F(T) = N_a(T)/N_s(T) = \left(\frac{Y_a}{Y_s}\right)^4 \exp\left[-\frac{h\Delta Y}{kT} \exp\left[-(\alpha_a - \alpha_s) \frac{c}{2n} \Delta t\right]\right] \quad (13)$$

在光纤的局部位置， $\Delta l = \frac{c}{2n} \Delta t$ 。在系统中，每个测量点对应的 Δl 很小， Δt 也很小，因此两次色散项可以忽略。在 $T_0 = 27.1^\circ\text{C}$ ，与光子数相对应的 $V_a(T_0)$ (实线)、 $V_s(T_0)$ (虚线) 拉曼光时域反射曲线如图 2(a) 所示，当光纤的局部区域 A 处温度升高至 $T = 54.8^\circ\text{C}$ ，信号电平的拉曼光时域反射曲线受到温度调制，在局部区域 $V_a(T)$ 、 $V_s(T)$ 升高如图 2(b) 所示。用 T_0 时信号电平的拉曼光时域反射曲线解调 T 时信号电平的拉曼光时域反射曲线得到温度的空间分布曲线如图 2(c) 所示，测得该处的温度为 54.4°C ，标准偏差为 0.6°C ，略低于实际温度，但在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 误差范围内。

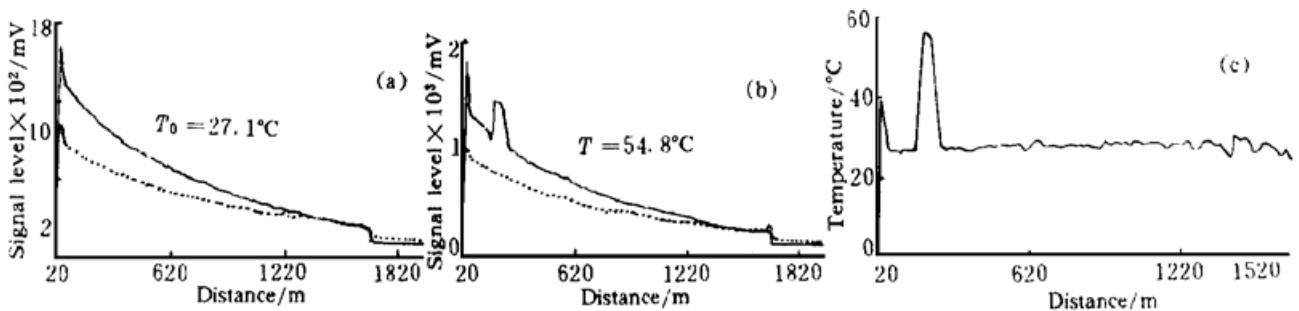


Fig. 2 (a) Raman OTDR curves of optical fiber for $T_0 = 27.1^\circ\text{C}$, (b) Raman OTDR curves of optical fiber for $T = 54.8^\circ\text{C}$, (c) Temperature distribution curve after demodulated

3 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度^[6]

3.1 系统的信噪比分析

要提高系统的测温精度必须对系统的信号和噪声进行分析。

3.1.1 系统的信号电平

在分布型光纤拉曼光子温度传感器系统中, 采用 10 W、50 ns、中心波长为 905 nm ($\nu = 3.313 \times 10^{14}$ Hz) 的激光二极管作光源, 每个激光脉冲的光子数 $N_0 = 2.277 \times 10^{12}$, 考虑到激光器与光纤连接的损耗、波分复用器的损耗、光纤背向散射和多模光纤的传输损耗等, 在光纤拉曼光时域反射曲线起始端的背向拉曼光子数为 $N = 910$ 个/脉冲。在时域里, 考虑到多模光纤的损耗, 得到离光纤起始端 1 km 处的背向拉曼光子数 $N_{ASR} = 213$ 个/脉冲; $N_{SR}(1\text{km}) = 237$ 个/脉冲。

考虑到实际系统的测温灵敏度, 当光纤的局域区温度每变化一度产生的反斯托克斯拉曼光子数和光子通量(重复频率为 1 kHz)即温度灵敏度为

$$S_{ASR} = 4.85 \text{ 个}/(\text{pulse}/^\circ\text{C}); \quad \Phi(\text{光子通量}) = 4846 \text{ 个}/(\text{s}/^\circ\text{C})$$

根据作者采用的带有前置放大的雪崩二极管和主放大器的主要参数, 可求得拉曼光时域反射曲线前端的信号电平 $V_{ASR} = 1663 \text{ mV}$ 。而实际分布型光纤拉曼光子温度传感器系统每变化 1°C , 相应的信号电平(温度灵敏度) $S_{ASR} = 8.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。

3.1.2 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统噪声电平

系统的噪声主要由激光器的光子起伏、雪崩二极管的噪声电平和主放大器的噪声电平三部分组成:

1) 光子起伏引起的电流噪声为:

$$i_{\text{shot}}^2 = 2eIB \quad (14)$$

其中, I 相当于平均光子数 \bar{N} 所产生的电流值, $I = \eta\bar{N}e = \eta P_e/h\nu$, B 为等效带宽。由接收的光子数来决定系统的误码率指标:

$$P(0) = \exp(-\bar{\Delta t}) \quad (15)$$

一般要求误码率指标为 10^{-9} (即 10 亿次传送信号中, 只发生一次误差), 则 $\bar{N} \approx 21$ 个, 即在一个脉冲内最小要达到 21 个光子。对于分布型光纤拉曼光子温度传感器系统, 相当于 38.3 mV(在主放大器的输出端)。

2) 带前置放大的雪崩二极管的输出噪声等效电平 V_{APD} , 由噪声等效功率、电压灵敏度、带宽和主放大器的增益决定:

$$V_{APD} = 76.3 \text{ mV}$$

3) 主放大器的输出噪声电平由主放大器的噪声电压、带宽和主放大器的增益决定:

$$V_{\text{amp}} = 141 \text{ mV}$$

系统的噪声电平由以上合成约为 256 mV。

3.2 提高系统信噪比的措施

由上节讨论可见, 温度信号是淹没在噪声中的, 要满足测温精度的要求必须采取一系列措施来优化系统, 提高信噪比。

1) 在系统的总体设计中, 采用了双波长、双光路比较系统, 提高了系统的稳定性和测温精度; 由于是弱信号检测系统, 采用了严格的电磁屏蔽和接地措施。

2) 选择了高功率短脉冲激光二极管, 提高信号功率并采用了低温恒温致冷; 采用了低损耗的波分复用器; 选择了低噪声高灵敏度光雪崩二极管, 并采用低温恒温致冷; 选择了低噪声高增益(60 dB) 宽带主放大器 and 高速瞬态数据采集卡。

3) 由于噪声是随机的而信号是有序的, 因此可以通过累加来提高信噪比, 信噪比的提高与累加次数的平方根成正比。采用软、硬件相结合的方法实现高速累加。根据测温精度确定累加次数, 通常采用 4k 次、16k 次。在实际系统中还受到信号处理卡的模数转换精度的限制, 在本系统中采用的高速瞬态 50 MHz 信号采集卡。

4) 从理论上由(5)式、(6)式可得到系统的温度曲线, 在不同的温度下对实际系统用标准铂电阻温度计进行校准, 修正温度曲线, 减少系统误差。

通过理论分析在累加 16k 次后, 系统的测温精度可达到 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

3.3 测温实验结果

使用自己制造的 FGC-W2A 型分布型光纤传感器系统, 用 2 km 光纤测量 1000 个点, 表 2 列出了一组测温实验数据。图 3 显示了测温的曲线, 图 3(a) 是在室温时的光纤拉曼光时域反射曲线, 横坐标是距离, 纵坐标是信号电平, 实线是反斯托克斯拉曼曲线; 图 3(b) 是在光纤前后端有两个光纤绕组加温时的光纤拉曼光时域反射曲线; 图 3(c) 是光纤拉曼光时域反射曲线解调后的温度分布曲线。

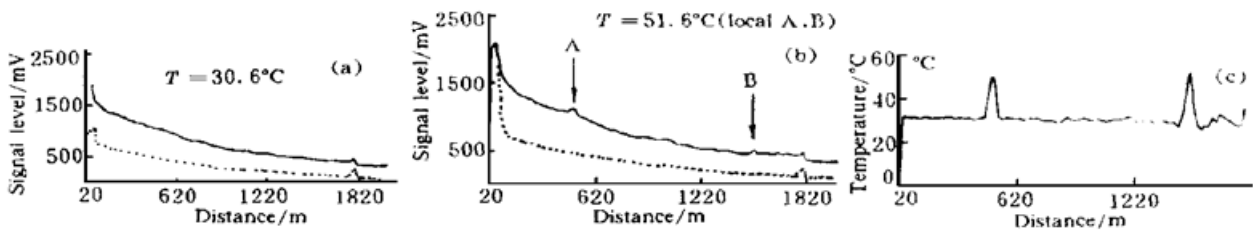


Fig. 3 (a) Raman OTDR curves of optical fiber for $T_0 = 30.1^\circ\text{C}$, (b) Raman OTDR curves for $T = 51.6^\circ\text{C}$, (c) Temperature distribution curve after demodulated

由此可见, 实际测温精度达到 $\pm 1^\circ\text{C}$, 与理论分析一致。

Table 2. Experimental dates. $T_0 = 30.1^\circ\text{C}$, Temperature of cell $T = 51.6^\circ\text{C}$

No.	front of fiber (472~ 482 m)/ $^\circ\text{C}$	end of fiber (1476~ 1484 m)/ $^\circ\text{C}$	No.	front of fiber (472~ 482 m)/ $^\circ\text{C}$	end of fiber (1476~ 1484 m)/ $^\circ\text{C}$
1	50.8	52.8	6	49.8	50.5
2	50.8	51.5	7	50.7	50.8
3	51.4	52.3	8	51.5	50.9
4	52.3	49.9	9	51.4	51.3
5	50.1	50.7	10	50.0	52.2
T				50.9	51.3
standard deviation				0.8	0.9
deviation				- 0.7	- 0.3

结 论 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统是光机电和计算机一体化的测量系统, 本文从光子学技术观点讨论了系统的测温原理, 重点分析和讨论了系统的测温精度, 采取了提高测温精度的一系列措施, 实际测温精度达到 $\pm 1^\circ\text{C}$, 与理论分析一致。

参 考 文 献

- [1] 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. 光学学报, 1995, **15**(11): 1585~1589
- [2] Zhang Zaixuan, Liu Tianfu, Chen Xiaozu *et al.*. Laser Raman spectrum of optical fiber and the measurement of temperature field in space. *Proc. SPIE*, 1994, **2321**: 186~ 190
- [3] A. J. Rogers. Distributed optical fiber sensors for the measurement of pressure, strain and temperature. *Phys. Rep.*, 1988, **162**(2): 99~ 143
- [4] 张在宣, 张步新, 陈 阳等. 光纤背向激光自发拉曼散射的温度效应研究. 光子学报, 1996, **25**(3): 273~ 278
- [5] 张在宣, 王其良, 周邦全等. DOFRTS 系统的温度灵敏度. 光学仪器, 1997, **19**(4~ 5): 70~ 73
- [6] Zhang Zaixuan, He Jiaming, Wang Wei *et al.*. Signal analysis of distributed optical fiber Raman photon temperature sensor (DOFROTS) system (invited paper). *Proc. SPIE*, 1996, **2895**: 126~ 131

Temperature Measurement Accuracy of the Distributed Optical Fiber Raman Photons Temperature Sensor System

Wang Wei Zhou Bangquan

(Fundament Department, China Institute of Metrology, Hangzhou 310034)

Zhang Zaixuan Wu Xiaobiao Guo Ning Yu Xiangdong Wang Qiliang
(Optoelectronics Technology Institute, China Institute of Metrology, Hangzhou 310034)

(Received 15 September 1997; revised 1 December 1997)

Abstract In the distributed optical fiber Raman photons temperature senser (DOFRPTS) system, spontaneous Raman photons are carriers of temperature signal. On the 2 km optical fiber, 1000 points have been sampled on time used for the measurement of temperature field in space. The position of measurement point was determined by Raman scattering optical time domain reflection (OTDR) technique. Signal and noise of the system have been discussed, the measured temperature accuracy of the DOFRPS system is $\pm 1^{\circ}\text{C}$ determined by S/N ratio.

Key words Raman photon, distributed optical fiber sensor, OTDR technique, measurement accuracy of temperature.