

doi: 10.3788/gzxb20154401.0106002

基于多模光纤的分布式喇曼测温系统

朱海鹏, 金钟燮

(重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要: 基于喇曼散射和光时域反射原理, 分析后向散射光中反斯托克斯光和斯托克斯光光强比值, 研制了基于多模光纤的分布式喇曼温度传感系统. 采用对低、高温段温度分别进行拟合的动态温度标定方案, 将测温精度提升至 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. 分别对系统温度分辨率、测温精度、空间分辨率以及重复性进行了实验, 结果表明: 系统温度分辨率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 空间分辨率为 1 m , 系统稳定性良好, 能够适应复杂环境变化.

关键词: 喇曼散射; 分布式测温; 动态标定; 温度分辨率; 空间分辨率

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0106002-5

Distributed Raman Temperature Measurement System Based on Multi-mode Fiber

ZHU Hai-peng, JIN Zhong-xie

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Through the analysis of the intensity ratio of anti-stokes and stokes light of the backscattering light, a multimode optical fiber Raman temperature sensing system had been developed based on Raman scattering and optical time domain reflection principle. Using a new type of dynamic temperature calibration program for fitting low and high temperature zone respectively, which improved the measuring-temperature accuracy up to $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. This paper respectively conducted the system temperature resolution, temperature measurement precision, spatial resolution and repeatability experimental verification. The experimental results show that the temperature resolution of $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the spatial resolution of 1 m , the system stability is good and can adapt to the complex environmental change.

Key words: Raman scattering; Distributed temperature measurement; Dynamic calibration; Temperature resolution; Spatial resolution

OCIS Codes: 060.2370; 290.5860; 300.6230; 330.6130

0 引言

分布式光纤温度测量系统是利用光纤作为传感媒介和传输介质, 并将光纤的自发喇曼散射效应和光时域反射(Optical Time Domain Reflection, OTDR)原理相结合同时实现光纤传输方向上的温度传感与定位系统. 由于它具有抗辐射、耐高电流高电压、抗电磁干扰能力而受到人们的青睐, 并广泛应用于武器装备地下洞库、电力系统以及桥梁隧道等特殊领域. 1983 年英国的 Hartog 对分布式光纤测温系统进行了原理性实

验研究^[1]; 1985 年 J. P. Dakin 利用光纤的自发喇曼散射效应成功完成了分布式温度测量实验^[2-3], 同年 Hartog 和 Dakin 使用半导体激光光源, 分别对分布式光纤温度传感系统进行了研究, 并研制了台式机^[4]. 近年来, 英国的 Sensor net 公司研制的分布式温度传感器的最大测量距离为 60 km , 最高可测量 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度, 空间分辨率优于 1 m , 且温度分辨率可达 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, 代表了现有利用分布式光纤测温的国际最高水平. 此外, 德国、美国、日本等国家也在此方面进行了相关研究. 例如, 德国 AP Sensing 公司研制了空间分辨率低

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61376121)、中央高校资助项目(Nos. 106112013CDJZR120008, 125502, 120003)资助

第一作者: 朱海鹏(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤与光栅传感. Email: 20120802010@cqu.edu.cn

导师: 金钟燮(1970-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤传感与信号处理. Email: jinzhongxie@cqu.edu.cn

收稿日期: 2014-05-26; 录用日期: 2014-07-17

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

至 1m, 温度分辨率低至 0.1℃ 的分布式光纤温度传感器^[5].

在国内, 重庆大学于 1987 年率先对分布式光纤温度传感系统的进行了研究, 并于 1991 年成功研制出了空间分辨率为 6m, 温度分辨率为 ±3℃, 响应时间为 30 s 的分布式光纤温度传感系统^[6-9]. 中国计量学院于 1993 年开始进行分布式光纤温度测量技术的研究, 并依次完成了 2 km、5 km、10 km 和 30 km 的测温系统^[10]. 电子科技大学于 2004 年针对如何提高分布式测温系统的空间分辨率和温度分辨率分别进行了相关实验研究^[11-12]. 重庆大学金钟燮等于 2010 年对分布式光纤测温系统进行了相关研究, 研制出了测量距离为 10 km, 空间分辨率优于 1 m, 测温分辨率优于 1℃ 的基于单模光纤的分布式测温系统^[13-15]. 此外, 国内其他高校如上海交通大学, 北京理工大学等高校也对分布式光纤测温系统进行了探索研究.

本文将探测模块集成为 APD 模块, 采用分段拟合低、高温区域的新型动态温度标定方案, 研究了一种测温精度高、空间分辨率高、稳定性好且价格便宜的分布式光纤测温系统.

1 理论分析

1.1 系统测温原理

系统结构图如图 1. 由激光器发出的激光脉冲经波分复用器(Wavelength Divided Module, WDM)进入温度标定机箱进行温度标定, 之后进入置于待测空间温度场的传感光纤, 激光脉冲在光纤中发生散射, 其后向散射光经 WDM 后分离出携带有空间温度场信息的 Stokes 光(参考光)和 Anti-stokes 光, 光信号进入雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)后转换成电信号并被放大器放大, 然后由高速数据采集卡进行数据采集, 最后由计算机进行数字信号处理(包括信号的累加平均、小波处理等)后, 即可在显示屏上显示出待测温度场的信息.

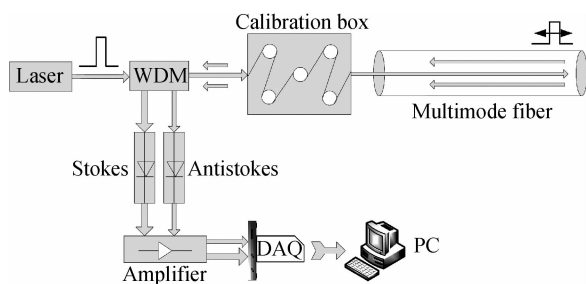


图 1 分布式光纤喇曼测温系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed temperature system based on Raman scattering

其中, Anti-stokes 光和 Stokes 光强度比和温度 (T) 的关系表达式为

$$F(T) = \frac{I_{as}}{I_s} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right)^4 \exp \left(\frac{-hc\Delta\gamma}{kT} \right) \quad (1)$$

式中, λ_s 、 λ_{as} 分别为 Stokes 光和 Anti-stokes 光的波长, h 为普朗克常量, c 为光在真空中传播速度, $\Delta\gamma$ 为波数, k 为玻尔兹曼常量, T 为绝对温度^[16-17].

1.2 系统所用元器件

根据图 1 所示的系统原理图, 为使温度分辨率达到 1℃ 且空间分辨率达到 1 m, 必须严格选择系统元器件, 本系统所用原器件及性能参量如下:

1) 光源: 为达到空间分辨率优于 1 m 的要求, 激光脉宽不能大于 10 ns. 此外, 还要求脉冲激光器具有稳定的工作模式、超窄线宽、高峰值功率、带多模光纤尾纤、体积小、可靠性高等特点. 系统采用北京华源拓达激光技术公司的中心波长为 1 550 nm 的窄脉宽高功率激光光源, 其脉冲宽度为 1~40 ns 可调, 线宽为 0.9 nm, 最大输出功率为 24 W;

2) WDM: WDM 用来滤出 Anti-stokes 光和 Stokes 光, 抑制瑞利光的输出. 系统采用深圳明鑫公司的 1×3 1450/1550/1663 多模 WDM, 其 1 450 nm 和 1 663 nm 窗口的带宽分别为 18 nm、30 nm;

3) APD: APD 性能指标的好坏, 对整个测温系统起着至关重要的作用, 尤其是对空间分辨率有决定性的影响. 实验时使用金属外壳将 InGaAs 雪崩光电二极管、信号探测电路、放大电路、温控电路等集成为 APD 模块, 温控电路可保证 APD 工作在一定的温度(恒温 25℃), 即使外界环境温度变化, APD 始终能保持一致的工作状态. APD 峰值波长为 1 550 nm, 光谱响应范围为 1 100~1 700 nm, 暗电流为 10~150 nA;

4) 数据采集卡: 由于系统空间分辨率及其响应时间与采集卡的采样率有关, 为达到系统指标要求, 同时控制系统成本. 系统采用 AlazarTech 公司的 14 位双通道高速数据采集卡 ATS460, 其采样率为 125 M/s, 支持外部触发和内部触发;

5) 传感光纤: 由于多模光纤相对于单模光纤存在更多的散射, 喇曼散射比普通光纤高 1~2 个数量级, 故系统传感光纤采用 50 μm/125 μm 的多模光纤, 传感距离为 4 128 m.

2 实验研究

2.1 新型动态温度标定方案

温度标定对分布式光纤测温系统至关重要, 通过研究温度 T 与光强比 $F(T)/F(T_0)$ 的关系曲线, 发现 T 与 $F(T)/F(T_0)$ 在 0~100℃ 之间近似呈线性关系; 因此, 定标时通过测量不同温度 T 下 $F(T)/F(T_0)$ 的值, 将 T 与 $F(T)/F(T_0)$ 进行线性拟合(本系统在 0~40℃ 和 40~100℃ 进行分段拟合), 便可得到低温区 and 高温区的拟合系数, 进而拟合出温度定标曲线.

$$T = m_i \cdot \frac{F(T)}{F(T_0)} + a_i, (i=1,2) \quad (2)$$

式中, m_i 为比例系数, a_i 为常量, $F(T)$ 、 $F(T_0)$ 分别为待测温度 T 与标定温度 T_0 的 Anti-stokes 和 Stokes 分量的光强比。

实验时在标定区取四段光纤, 并将四段光纤依次缠绕在由半导体温控器 (Temperature controller, TEC) 控制的铜柱上, TEC 的温度控制精度为 $0.0625\text{ }^\circ\text{C}$, 同时用导热硅脂在铜柱周围对光纤进行涂抹固定, 以保证标定区光纤受热均匀, 如图 2。



图 2 用 TEC 控制的温度标定铜块

Fig. 2 The copper blocks used for temperature calibration by TEC controller

实验时选用 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 及环境温度作为标定温度, 将环境温度与四段标定光纤的不同温度进行分段线性拟合。通过将标定区中 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、环境温度、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 分别与每段温度标定光纤所得的喇曼比值 $F(T)/F(T_0)$ 的平均值进行线性拟合, 便可得到低温区拟合系数 m_1 、 a_1 和高温区拟合系数 m_2 、 a_2 ; 进而得到采用动态温度标定方案的喇曼比值与距离关系曲线, 如图 3。

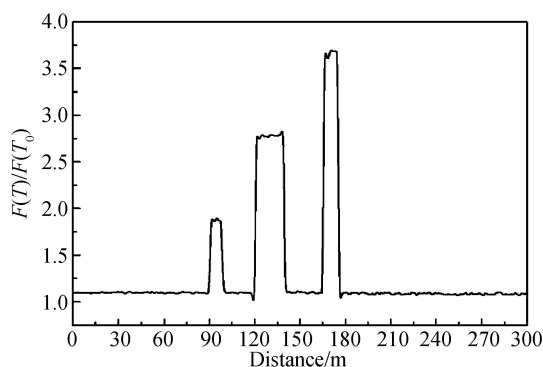


图 3 动态标定得到的光强比值与距离曲线

Fig. 3 The graph of light intensity ratio and distance using dynamic calibration

2.2 温度分辨率

温度分辨率是指测量点温度变化时, 系统所能感知的最小温度变化量。实验时在前端 440 m 处取一个长度为 30 m 的光纤环, 待恒温水槽加温至 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 后将光纤环放入其中。之后便可开始测量, 实验时连续测量 10 组数据为 $58.8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $58.8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60.6\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $61.1\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $58.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $59.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $58.8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $61.0\text{ }^\circ\text{C}$ 。同

时结合恒温槽的温度标准值, 计算标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_n - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

因此温度分辨率为 $\Delta = 6\sigma/10 = 0.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。计算结果表明: $\Delta T < 1\text{ }^\circ\text{C}$, 满足系统实际要求; 同时测量了室温 ($21.8\text{ }^\circ\text{C}$) 的温度距离曲线如图 4, 由局部放大图可以看出, 实际的温度分辨率和计算结果基本一致, 温度波动的最大值与最小值之差为 $0.8\text{ }^\circ\text{C} < 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此, 系统能够分辨出来待测温度场 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化。

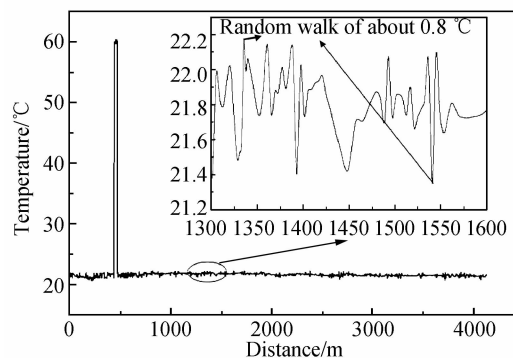


图 4 温度分辨率曲线

Fig. 4 The graph of temperature resolution

2.3 测温精度

测温精度表示测温系统的实际测量温度与真实温度的偏离范围, 它与定标温度误差、光纤中 Stokes 和 Anti-stokes 光的不等衰减、APD 噪声等因素有关。实验时用前面所缠绕的 30 m 的光纤环, 在 $30\text{ }^\circ\text{C} \sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, 每 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 为一个间隔, 分别进行测量。激光器参数设置为: 脉宽 10 ns , 重复频率 5000 Hz , 峰值功率 12 W , 累加 40 万次。利用 origin 软件将不同温度下的曲线进行叠加处理, 得到图 5。

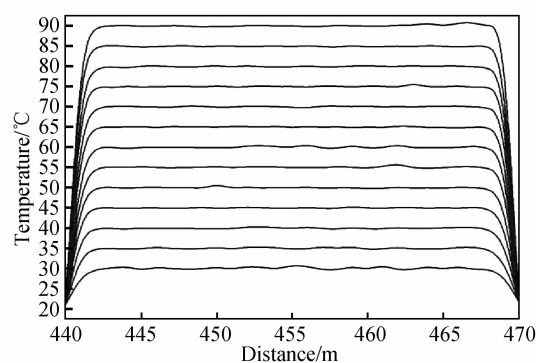


图 5 $30\text{ }^\circ\text{C} \sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ 加温曲线

Fig. 5 The graph of $30\text{ }^\circ\text{C} \sim 90\text{ }^\circ\text{C}$

由图 5 可知, 测试数据与所设温度基本一致, 最大误差测量为 $1.1\text{ }^\circ\text{C}$, 平均误差为 $0.7\text{ }^\circ\text{C}$, 其测温精度在 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 表明采用动态定标方案的可行性, 满足系统设计要求。

2.4 空间分辨率

空间分辨率是指能够准确实现温度测量的最小单元,即能够实现温度准确测量的光纤的最短长度,可用系统能够分辨温度的最小空间间隔来表示.它与 LD 激光脉冲前沿、多模光纤的传输带宽、APD 的响应时间、放大电路的带宽及延时、数据采集卡的带宽等多种因素有关.实验时,在光纤前端 250 m 处,分别缠绕 3 个长度为 1 m 的光纤环,将两端的两个光纤环放入恒温水槽,中间的一个光纤环置于空气中,如图 6.由瑞利判据可知,若恒温水槽中的两个光纤环恰好能够被区分,其间距就等于系统的空间分辨率.

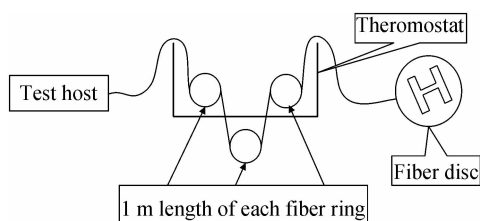


图 6 测试系统空间分辨率示意图

Fig. 6 The schematic diagram of the test system spatial resolution

将恒温水槽加热至 40 °C,得到如图 7 所示的测试结果.由图 7 可知:凹点处的峰值与两尖峰值之比均小于 81%,根据瑞利判据,可知该多模测温系统的空间分辨率优于 1 m.

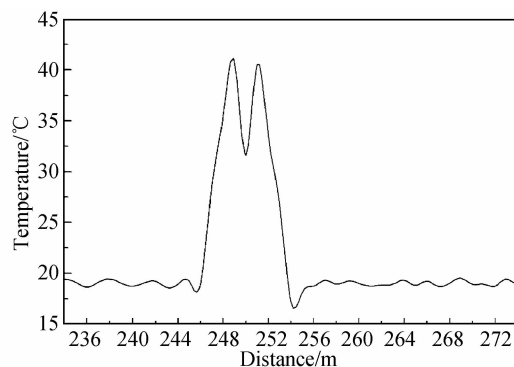


图 7 相隔 1 m 的两个 1 m 光纤环加热曲线

Fig. 7 The heating graph of two 1 m optical fiber rings apart 1 m

2.5 系统重复性

在实际工业应用中,系统的重复性至关重要.因此,对本系统的重复性进行了测试,在前端缠绕一个数十米的光纤环放入恒温槽中,加热恒温槽温度至 60 °C,分别间隔 1 h,利用光纤测量恒温槽的温度,测量数据如表 1.

表 1 重复性测试(60 °C)
Table 1 Repeatability test(60 °C)

Time	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Temp	59.7	60.2	59.5	59.8	60.4	60.3	59.8	60.2	60.6	59.6

由表 1 可知,当恒温槽温度设为 60 °C 时,用该系

统测得的实际温度在 60 °C ± 1 °C 范围内,可知在不同的时间段都可以较准确地测量出实际温度,说明系统解调和标定方案的可行性,能反映真实的温度场信息,系统测试的重复性较好.

3 结论

本文以喇曼测温的基本原理为依据,研制了一种能够实时、连续地在线监测空间温度场的基于多模光纤的分布式测温系统.实验采用新型动态温度标定方法进行温度标定,抑制了 APD 的温漂,提高了系统的温度测量的准确性和稳定性;通过对温度分辨率的分析与测试,表明系统的温度分辨率优于 1 °C,同时对系统空间分辨率进行了实验验证,实验证明系统能够准确测量两个长度分别为 1 m 且相隔 1 m 的光纤环,即系统空间分辨率达到 1 m.系统重复性良好,满足实际应用要求.

参考文献

- [1] HARTOG A H. A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers[J]. *Lightwave Technology*, 1983, **1**(3):498-509.
- [2] DAKIN J P, PRATT D J. Fiber-optic distributed temperature measurement: A comparative study of techniques[J]. *IEEE Digest*, 1986, **74**(10):1-4.
- [3] DAKIN J P, PRATT D J. Distributed and multiplexed fiber optic sensors[C]. SPIE, 1985, **1797**:76-108.
- [4] HARTOG A H, LEACH A P, GOLD M P. Distributed temperature sensing in solid-core fibers [J]. *Electronics Letters*, 1985, **21**(23):1061-1062.
- [5] <http://www.apsensing.com/cn/applications/>.
- [6] HUANG Shang-lian, LIANG Da-wei, LIU Gong. A study on the distributed fiber optic temperature sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1991, **12**(4):359-364. 黄尚廉, 梁大巍, 刘龚. 分布式光纤温度传感器系统的研究[J]. *仪器仪表学报*, 1991, **12**(4):359-364.
- [7] LIANG Da-wei, HUANG Shang-lian. Research status and development of distributed optical-fiber temperature sensor [J]. *Applied Optics*, 1991, **12**(2):1-6. 梁大巍, 黄尚廉. 分布式光纤温度传感器的研究现状及发展[J]. *应用光学*, 1991, **12**(2):1-6.
- [8] 黄尚廉. 光纤智能材料系统与结构的研究发展评述[R]. 合肥:中国光学学会第四届光电技术与系统学术会议特邀报告, Vol. 8, No. 1, 1991.
- [9] HUANG Shuang-min, CHEN Wei-min, HUANG Shang-lian. Light scattering in optical-fiber and its application in distributed optical-fiber sensor [J]. *Journal of Transducer Technology*, 1995, **2**:49-51. 黄民双, 陈伟民, 黄尚廉. 光纤中光散射及在分布式传感技术中的应用[J]. *传感器技术*, 1995, **2**:49-51.
- [10] ZHANG Zai-xuan, LIU Tian-fu, CHEN Xiao-zu. Laser Raman spectrum of optical fiber and the measurement of temperature field in space[C]. SPIE, 1994, **2321**:186-190.
- [11] 黄松. 拉曼分布式光纤温度传感器及其空间分辨率研究[D]. 成都:电子科技大学, 2004.
- [12] 方曼. 分布式拉曼光纤温度传感器系统及温度分辨率提高的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2004.
- [13] JIN Zhong-xie, CUI Hai-jun, NING Feng, et al. Distributed optical fiber Raman temperature measurement system based

- on the dynamic multi-section temperature calibration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9):1297-1302.
- 金钟燮,崔海军,宁枫,等. 基于动态多段温度标定的分布式光纤 Raman 测温系统[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9):1297-1302.
- [14] NING Feng, ZHU Yong. A linear correcting algorithm for improving space resolution of distributed optical fiber Raman temperature measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4):408-413.
- 宁枫,朱永. 一种提高分布式光纤测温系统空间分辨率的线性修正算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4):408-413.
- [15] JIN Zhong-xie, ZHU Hai-peng. Spatial resolution improvement of distributed optical fiber Raman temperature sensor system by using Amplitude modification algorithm[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, **552**:393-397.
- [16] MARCELO A, SIGNORINI A. High-performance Raman-based distributed fiber-optic sensing under a loop scheme using anti-stokes only [J]. *Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(9):534-536.
- [17] YU Ming-fei, CHEN Xiao-jun. Study of temperature resolution of distributed Raman optical fiber temperature sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(4):475-477.
- 于明飞,陈孝君. 分布式拉曼光纤温度传感器温度分辨率的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(4):475-477.