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±1℃.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℃,空间分辨率为1m,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 ± 1 °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 °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℃的温 度,空间分辨率优于 1m,且温度分辨率可达 0.01 ℃, 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

http://www.photon.ac.cn

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

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^[69].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

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

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1m,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1m的要求,激光 脉宽不能大于10ns.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1550nm的窄脉宽高功 率激光光源,其脉冲宽度为1~40ns可调,线宽为 0.9nm,最大输出功率为24W;

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 °C), 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 $1 \sim 2$ 个数量级, 故系统传感光纤采用 $50 \ \mu m/125 \ \mu m$ 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 °C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 °C 和 40~100 °C 进行分段拟合),便可得到低温区 和高温区的拟合系数,进而拟合出温度定标曲线.

$$T = m_i \cdot \frac{F(T)}{F(T_0)} + a_i (i = 1, 2)$$
(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 T₀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 $0.0625 \,^{\circ}$,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 ℃、40 ℃、60 ℃、80 ℃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 ℃、环境温 度、40 ℃和 40 ℃、60 ℃、80 ℃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 ℃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 ℃、58.8 ℃、60.6 ℃、61.1 ℃、 60.9 ℃、58.9℃、59.5℃、58.8 ℃、60.9 ℃、61.0 ℃.同 时结合恒温槽的温度标准值,计算标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Xn - \overline{X})^2}{n - 1}} \tag{3}$$

因此温度分辨率为 $\Delta = 6\sigma/10 = 0.7$ ℃. 计算结果 表明: $\Delta T < 1$ ℃,满足系统实际要求;同时测量了室温 (21.8 ℃)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 ℃<1 ℃. 因此,系统 能够分辨出来待测温度场 1 ℃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 $\mathbb{C} \sim 90 \mathbb{C}$ 温度范围内,每 5 \mathbb{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 5 000 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 30~90 ℃加温曲线 Fig. 5 The graph of 30~90 ℃

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 ℃,平均误差为 0.7 ℃,其测温精度在 1 ℃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 ℃,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.





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℃,分别间隔1h,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℃) Table 1 Repeatability test(60℃)

Time 9:00 10:0011:0012:0013:0014:0015:0016:0017:00 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℃时,用该系

统测得的实际温度在 60 ℃±1 ℃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 ℃,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.
 黃尚廉,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 Transductor 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

與民双,陈伟氏,與同康.尤纣中尤散别及任分布式传感技术中 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 Ramanbased 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器温度分辨率的研究 [J].仪器仪表学报,2007,**28**(4):475-477.