

文章编号: 0258-7025(2004)05-0613-04

30 km 远程分布光纤拉曼温度传感器系统的 实验研究

张在宣¹, 王剑锋¹, 刘红林¹, 余向东¹, 郭 宁¹, Insoo S. KIM²

(¹ 中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310034; ² 韩国电气技术研究院, 汉城)

摘要 研制成功一套 30 km 远程分布光纤拉曼温度传感器(DOFRTS)系统,采用了新的光纤放大的反斯托克斯背向拉曼自发散射测温原理和 1550 nm 掺铒光纤激光器作为抽运源及高速瞬态波形采样技术,累加平均等信号处理技术,提高了信噪比,解决了弱信号检测问题。使用智能化恒温技术,使主要元器件在恒温条件下工作,解决了工程应用中环境的适应性问题。经鉴定,远程分布光纤拉曼温度传感器系统的主要技术指标如下:光纤长度为 31 km,测温范围为 0~100℃(可扩展),温度测量不确定度为±2℃,温度分辨率为 0.1℃,测量时间为 432 s,空间分辨率为 4 m。最后给出了远程分布光纤温度传感器系统性能的国内外对比表。

关键词 传感器技术;光纤传感器;背向拉曼散射;光纤放大反斯托克斯拉曼自发散射;光时域反射技术

中图分类号 TN 247;O 551.2 **文献标识码** A

Experimental Research of 30 km Long Distance Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor System

ZHANG Zai-xuan¹, WANG Jian-feng¹, LIU Hong-lin¹,
YU Xian-dong¹, GUO Ning¹, Insoo S. KIM²

(¹ *Institute of Optoelectronics Technology, China Institute of Metrology, Hangzhou, Zhejiang 310034, China*)
(² *Optical Technology Research Center, Korea Electric Research Institute, Seoul, 437-808, Korea*)

Abstract A 30 km long range distributed optical fiber Raman temperature sensor (DOFRTS) system has been made, it use new measuring temperature principle of optical fiber amplified anti-Stokes Raman spontaneous scattering. In the system, 1550 nm erbium-doped optical fiber laser, high speed data acquisition card and signal processing technique are used. By using these technique, the problem of weak signal detection is resolved and signal to noise ratio is increased. All components of system are put into an intellectualized constant temperature box and work in constant temperature condition. Stability and environment adaptability are improved. By appraisal, performance of the system is listed as follows; optical single mode fiber: 31 km, temperature rang: 0~100℃ (can be expanded), temperature measuring uncertainty: ±2℃, temperature resolution: 0.1℃, measurement time: 432 s, spatial resolution: 4 m. The contrast table of the performance of DOFRTS system is given in the paper.

Key words sensor technique; optical fiber sensors; Raman backscattering; optical fiber amplification of anti-Stokes Raman spontaneous scattering; optical time domain reflection (OTDR) technology

1 引 言

分布光纤拉曼温度传感器(DOFRTS)系统是

一种用于实时测量空间温度场分布的传感系统,在系统中光纤既是传输媒体也是传感媒体。利用光纤的拉曼光谱温度效应^[1],光纤所处空间各点温度场

收稿日期:2003-02-10;收到修改稿日期:2003-05-22

基金项目:浙江省重点科研(011101981)和韩国科学技术部韩中光技术研究中心基金资助项目。

作者简介:张在宣(1936—),男,教授,中国计量学院光电子技术研究所所长,主要从事分布光纤拉曼温度传感器和激光光谱测量研究。E-mail:zhangzx@mail.hz.zj.cn

调制了光纤中传输的拉曼光散射波,经解调后,将空间温度场的信息实时显示出来。它是一个光纤测量网络;利用光纤的光时域反射(OTDR)技术,由光纤中光的传播速度和背向光回波的时间,对所测量温度点的定位,它是光纤激光拉曼温度雷达^[2]。

近年来,根据应用的需求,由近程^[3,4]、中程^[5]向远程分布光纤拉曼温度传感器系统发展。随着光纤长度的增加,光纤损耗也增加,以 30 km 为例,即使在 1550 nm 单模光纤低损耗区,前向传输的损耗达 7.5 dB(0.25 dB/km),背向反斯托克斯拉曼回波 1450 nm 单模光纤传输的损耗达 10.5 dB(0.35 dB/km),光纤尾端的反斯托克斯拉曼回波的总损耗达 18 dB。因此实现远程分布光纤拉曼温度传感器系统的关键在于,选择新的工作原理和新的技术,提高系统的信噪比,提高测量精度。

2 远程分布光纤拉曼温度传感器的新工作原理

从实验中发现,当进入光纤的激光功率超过一个阈值时,光纤的背向反斯托克斯拉曼自发散射时域曲线出现放大的反斯托克斯拉曼自发散射现象。所得到的是背向放大的反斯托克斯拉曼自发散射(ASR)的光时域反射曲线。实验证明光纤放大的背向反斯托克斯拉曼自发散射同样存在温度效应,文献[6]首次观察到了这一效应,用此效应作为一种分布式光纤温度传感器的新的测温原理已经被实验证实。

在光纤 L 处局域放大的反斯托克斯拉曼散射光子通量 $\phi_a(T)$

$$\phi_a(T) = K_a \cdot G \cdot S \cdot \nu_a^4 \cdot \phi_e \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a) \cdot L] \cdot R_a(T) \quad (1)$$

K_a 为与光纤斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射截面有关的系数, G 为放大因子, S 为光纤的背向散射因子, ν_a 为光纤斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射光子频率, α_0, α_a 分别为入射光、反斯托克斯拉曼散射光的光纤传输损耗, L 为光纤待测局域处的长度, $R_a(T)$ 为与光纤分子低能级和高能级上的布居数有关的系数,与光纤局域处的温度有关

$$R_a(T) = [\exp(h\Delta\nu/kT) - 1]^{-1} \quad (2)$$

其中 h 为普朗克常数, $\Delta\nu$ 为 Raman 频移量。当 $T = T_0$ 时,由(1)式

$$\phi_a(T_0) = K_a \cdot G \cdot S \cdot \nu_a^4 \cdot \phi_e \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a) \cdot L] \cdot R_a(T_0) \quad (3)$$

(3)式除(1)式得到放大的反斯托克斯拉曼自发散射

的强度比

$$\frac{\phi_a(T)}{\phi_a(T_0)} = \frac{\exp(h\Delta\nu/kT) - 1}{\exp(h\Delta\nu/kT_0) - 1} \quad (4)$$

由(4)式,由实验上测定 $\frac{\phi_a(T)}{\phi_a(T_0)}$, 则可测定光纤局域处的温度。

图 1(a)为 $T = T_0$ 时在局域处未加温的反斯托克斯自发散射的光时域曲线(称为基线),图 1(b)为光纤的局域位置加温后的反斯托克斯自发散射的时域曲线图。图 2 为用反斯托克斯自发散射的时域曲线基线解调后的传感光纤的温度分布曲线。图 3 为分布光纤拉曼温度传感器系统的温度定标曲线和线性 y 度,线性度达到 0.9996。

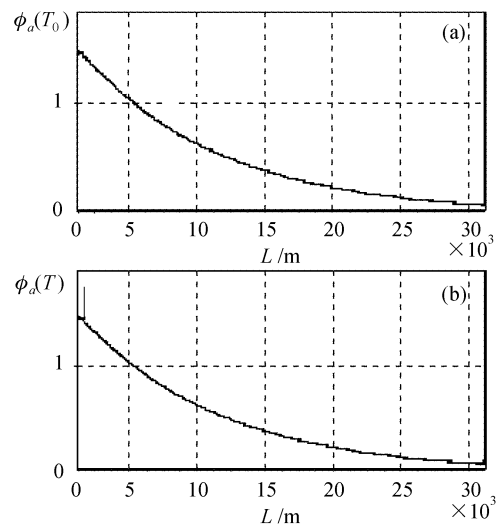


图 1 局域处的 ASR OTDR 曲线

Fig. 1 ASR OTDR curve

(a) $T = 26^\circ\text{C}$; (b) $T = 93^\circ\text{C}$

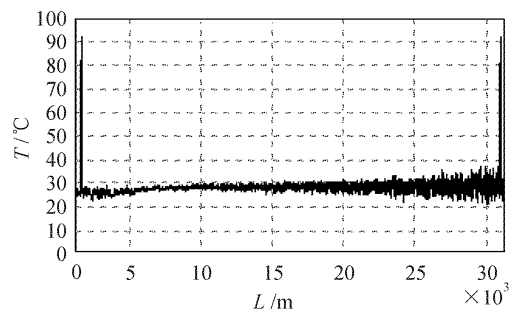


图 2 解调后传感光纤的温度分布曲线

Fig. 2 Temperature distribution curve along demodulated sensor fiber

3 远程分布式光纤拉曼温度传感器的结构设计

整个传感器分为主机、传感光纤和信号采集处

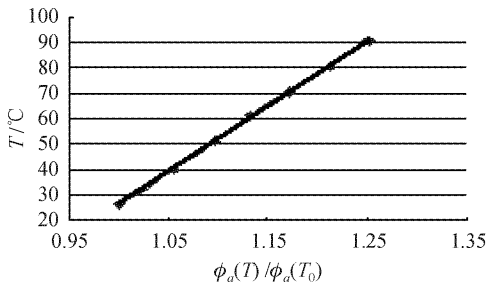


图 3 DOFRTS 系统的温度定标曲线

Fig. 3 Temperature calibration curve of DOFRTS

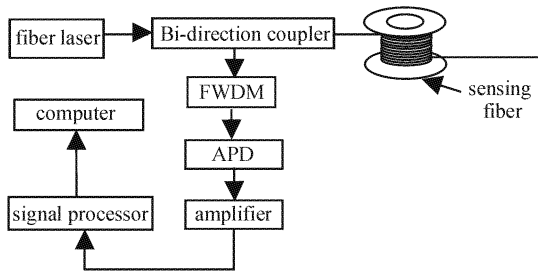


图 4 分布光纤拉曼温度传感器系统的结构

Fig. 4 Configuration of DOFRTS system

理三个部分。

3.1 主机部分

由光源、光纤波分复用系统以及光电接收和放大模块构成,如图 4 所示。

1) 光源模块:采用脉冲掺铒光纤激光器,激光中心波长 1547.4 nm,光谱带宽 0.075 nm,脉冲重复频率 2 kHz,脉冲宽度 10 ns,激光输出功率 0~100 W 可调。

2) 光纤波分复用器(OWDM)模块:由 1×2 双向耦合器和光纤光学干涉滤光器(FWDM)组成。双向耦合器一端与光纤激光器相连,另一端与传感光纤相连,背向散射回波光与光纤干涉滤光器相连,FWDM 允许背向反斯托克斯拉曼散射光通过。

3) 光电接收、放大模块:由带尾纤和前置放大

器的光雪崩二极管(APD)以及高增益、宽带、低噪声的放大器组成。

为了确保稳定性,主机部分放置在专门设计制造的智能化超级恒温槽内,温度为 20℃±0.1℃。

3.2 光纤传感探头

采用 31 km G652 单模光纤作为系统的传感和传输光纤,由线型光纤温度传感探头和光纤绕组温度传感探头组成。根据不同的应用场合采用不同封装的光缆。根据不同应用的需要可采取接触测温方式,也可采用非接触测温方式(例如:对流传热、辐射传热方式)。

3.3 信号采集和处理部分

可以分为硬件和软件两部分,其中硬件由数据采集累加卡和计算机构成;软件由数据采集累加卡控制和数据采集程序,保存和管理数据的数据库管理系统,数据处理和显示软件等三部分构成。

4 实验结果与讨论

4.1 温度定标数据,线性度和温度测量不确定度

在光纤长度范围内,将任意位置(通常是光纤的头和尾端)的光纤绕组和标准石英晶振测温计放在双层杜瓦结构的定温恒温槽内,恒温槽的温度可设定为 40℃,50℃,60℃,70℃,80℃和 90℃,温度稳定性<0.1℃,对分布光纤拉曼温度传感器系统进行逐点温度定标(量值传递),表 1 为温度定标数据,对任选的一个温度值(如 91.8℃),在规定的测量时间内进行多次(现设定为 10 次)测量取平均值与标准测温计的指示值进行比较,求出偏差,计算标准偏差,数据见表 2,确定不确定度<±2℃。

4.2 测量结果与国外结果的比较

远程分布光纤 Raman 温度传感器系统与英国 SENSE 公司及 BICC 公司的相关产品对比如表 3。

表 1 温度定标数据(单位:℃)

Table 1 Temperature calibration date (Unit: °C)

Standard temperature value	26.3	40.1	51.3	60.0	70.4	80.5	90.7
Display value of DOFRTS system	26.2	40.6	51.3	60.1	70.4	80.7	90.8

表 2 温度不确定度(单位:℃)

Table 2 Temperature uncertainty (Standard temperature vaule: 91.8℃, measure time: 432 s, Unit: °C)

Fiber position/m	Temperature time										Average	Uncertainty
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1,650 m	92.4	92.7	92.5	93.1	92.1	91.8	92.0	91.6	92.0	91.3	91.9	0.9
30,972 m	93.2	89.4	92.7	91.2	95.4	92.0	93.9	94.9	95.0	94.7	93.0	1.6

表 3 国内外远程分布光纤拉曼温度传感器系统性能对比
Table 3 Performance of long range DOFRIS system

	FTR300(BICC)	DTS800(SANSA)	FGC-W30(CIM)
Fiber length /km	30	30	31
Wave length /nm	1550 (LD+EDFA)	1550 (LD+EDFA)	1550 (fiber laser)
Temperature uncertainty / $^{\circ}\text{C}$	± 1	± 2	± 2
Temperature resolution / $^{\circ}\text{C}$	0.1	2.0	0.1
Spatial resolution/m	5	8	4
Measuring time /s	600	600	432
Main unit operation temperature range / $^{\circ}\text{C}$	0~30		0~40

5 结 论

采用了新的光纤放大的反斯托克斯拉曼散射测温原理,用先进的 1550 nm 功率可调的掺铒光纤激光器作为抽运源,有效地控制入射到单模光纤的功率,抑制光纤的非线性效应。有别于国外采用的激光二极管(LD)加掺铒光纤放大器(EDFA)的方案,在原理上有创新,具有我国自主知识产权。

采用了自行设计和制造的高速瞬态波形采样技术和累加卡,采用累加平均等信号处理技术,提高了信噪比,较好地解决了弱信号检测问题。

采用了智能化恒温技术,较好地解决了工程应用中的环境适应性问题。是一种很有实用价值的、先进的光纤温度传感系统。

致谢 感谢韩国科学技术部韩中光技术研究中心金仁洙先生的关心;感谢南都集团的资助;感谢台湾中央大学梁忠义教授的关心和讨论。

参 考 文 献

- 1 A. H. Hartog, A. P. Leach, M. P. Gold. Distributed temperature sensor in solid-core fibers [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**:1061~1062
- 2 Zhang Zaixuan, Liu Honglin, Guo Ning *et al.*. 30 km distributed optical fiber Raman photons temperature lidar, remote [C]. *SPIE*, 2002, **4893**:78~82
- 3 Huang Shanglian, Liang Dawei, Liu Yan. The research of distributed optical fiber temperature sensor [J]. *Chinese Journal Scientific Instrument*, 1991, **12**(4):359~364
黄尚廉,梁大巍,刘 龚. 分布光纤温度传感器研究[J]. *仪器仪表学报*, 1991, **12**(4):359~364
- 4 Zhang Zaixuan, Liu Tianfu, Zhang Buxin *et al.*. Laser Raman type distributed optical fiber temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1985, **15**(11):1586~1589
张在宣,刘天夫,张步新 等. 激光拉曼分布光纤温度传感器系统 [J]. *光学学报*, 1985, **15**(11):1586~1589
- 5 Zhang Zaixuan, Insoo S. KIM, Wang Jianfeng. 10 km distributed optical fiber sensors system and application [C]. *SPIE*, 2001, **4540**:386~390
- 6 Zhang Zaixuan, Liu Honglin, Guo Ning. Optimum designs of 30 km distributed optical fiber Raman photon temperature sensors and measurement network [C]. *SPIE*, 2002, **4920**:268~273