

doi:10.3788/gzxb20124104.0408

# 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

宁枫, 朱永, 崔海军, 李小琴, 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:** 由于分布式光纤喇曼测温系统带宽不足, 导致系统的空间分辨率低; 当光纤的感温区域长度接近空间分辨率的时候, 系统温度响应幅值不够, 导致测温不准. 为解决此问题, 本文提出了一种线性修正算法; 在分析温度与喇曼比值关系及系统的频率响应特性的基础上, 建立了该算法的数学模型, 搭建了基于单模光纤的 10 km 分布式测温系统, 并利用该算法进行了相关测温实验. 实验结果与理论分析一致, 该算法能有效修正 3~6 m 光纤的温度响应幅值, 使系统测温准确度达  $1^{\circ}\text{C}$ , 测量时间为 40 s. 本算法在不增加系统成本的同时, 克服了系统带宽不足, 优化了空间分辨率、温度分辨率及测量时间.

**关键词:** 喇曼测温; 带宽; 线性修正算法; 频率响应; 空间分辨率

**中图分类号:** OTN29

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)04-0408-6

## 0 引言

分布式光纤喇曼测温系统基于自发喇曼散射原理, 是一种实时测量沿光纤分布温度场的系统<sup>[1]</sup>. 在该系统中, 光纤既作为传感媒介, 又作为传输媒介, 运用光时域反射 (Optical Time Domain Reflection, OTDR) 原理, 能精确测定光纤上每点温度, 对施加在光纤上的温度场进行测量和定位<sup>[2]</sup>. 经多年发展, 分布式光纤温度传感技术以其独特优势, 广泛应用于油田、电力、水库大坝、桥梁隧道等领域, 日益受到人们的重视和青睐, 显示出巨大的市场价值<sup>[3-5]</sup>. 国外对分布式光纤测温技术的研究较早, 1981 年由英国南安普敦大学提出其测温原理, 1983 年英国的 Hartog 用液体光纤进行了分布光纤温度传感器原理性实验, 1985 年英国的 Dakin 将氦离子激光器作为光源, 运用石英光纤的喇曼光谱效应进行分布光纤温度传感器测温实验, 同年 Hartog 和 Dakin 用半导体激光器作为光源, 研制出分布光纤温度传感器实验装置, 之后分布光纤温度传感器得到了很大的发展, 已经从理论研究走向实际应用<sup>[6]</sup>. 如英国 York Sensors Limited 公司, 将光纤分布式测温系统并使之商品化已达 20 多年. 英国 sensor net 公司开发的分布式光纤测量系统广泛应用于水库大坝、油田等进行温度和应力的分布式测量中. 韩国 SHINKWANG 公司、美国 SENSORTARN 公司、

SUMITOMO 公司也陆续推出不同类型的产品<sup>[7]</sup>. 在国内, 重庆大学、中国计量学院和北京航空航天大学等从事分布式光纤传感的研究工作开始于 80 年代后期, 主要从事原理性研究和实验研究, 目前已经研制出实用化的测温系统, 但稳定性、空间分辨率等指标与国外相比还有一定差距.

系统带宽对系统的空间分辨率, 温度分辨率与测量时间有着重要的影响. 当系统带宽低时, 系统的温度分辨率提高, 测量时间缩短, 但会导致系统空间分辨率降低, 无法实现准确的温度响应; 而高带宽系统则会导致温度分辨率偏低和测量时间延长, 且系统成本增加. 目前在国内市场产品中, 系统带宽普遍偏低, 严重影响着空间分辨率和测温的准确性. 如果仅从硬件上增加系统带宽, 系统的白噪音会显著增加, 系统空间分辨率虽有提高, 但需要经过更多次的平均才能保证温度测量的分辨率, 导致系统测量时间变长, 测量实时性降低. 此外, 高带宽的探测器模块的采用也会导致系统成本也会大幅度增加. 为此, 本文提出一种线性修正算法, 在不改动现有系统硬件的情况下, 修正 3~6 m 感温光纤对温度响应幅值, 从而实现准确测温, 使得系统各项指标得到了优化.

## 1 理论分析

### 1.1 分布式光纤喇曼测温原理

光纤喇曼测温系统是基于自发喇曼原理设计

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费科研专项自然科学基金类项目资助 (No. CDJZR10120011)

**第一作者:** 宁枫 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与通信. Email: maplening@yahoo.cn

**导师 (通讯作者):** 朱永 (1973—), 男, 教授, 主要研究方向为光纤传感、光谱技术及仪器等. Email: yongzhu@cqu.edu.cn

**收稿日期:** 2011-11-09; **修回日期:** 2012-01-09

的.在光纤生产阶段,各种应力导致光纤内部形成一些分布不均的粒子.当激光注入到光纤中,光子与这些粒子发生弹性碰撞和非弹性碰撞,其中弹性碰撞宏观上表现为瑞利散射,非弹性碰撞则表现为布里渊和喇曼散射<sup>[8]</sup>.

系统结构如图 1,激光器发出光脉冲,经波分复用器(Wavelength Divide Multiplexing, WDM)耦合进入传感光纤,传感光纤则置于待测温度场,光脉冲在光纤中各点位置引发散射光(含喇曼成分),其中后向散射光沿光纤向后传播,经 WDM 后,分离出载有温度信号的反斯托克斯光和用作参考信号的斯托克斯光,光电探测器将其转化成电信号后,进行放大,之后由数据采集卡(Data Acquisition Card, DAQ)采集,最终在计算机上进行数字信号处理(包括累加平均,小波去噪等)后,完成对待测温度场的测量.

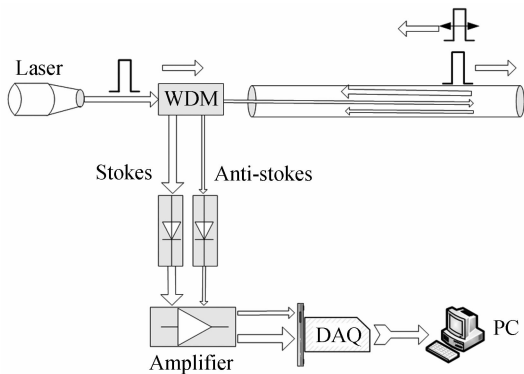


图 1 分布式光纤喇曼测温系统原理

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

常用的温度解调如式(1)<sup>[9]</sup>

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{\kappa}{h \Delta \nu} \left| \ln \frac{R_1}{R_2} \right| \quad (1)$$

式中,  $T$  为所需求解的温度,  $T_0$  为参考温度(常用室温作为参考温度),  $K$  为波尔兹曼常量,  $h$  为普朗克常量,  $R_1$  为在温度  $T$  下的喇曼比值(即反斯托克斯光强与斯托克斯光强之比),  $R_2$  为在温度  $T_0$  下的喇曼比值. 式(1)表明,  $T$  与  $T_0$  成非线性关系, 如图 2

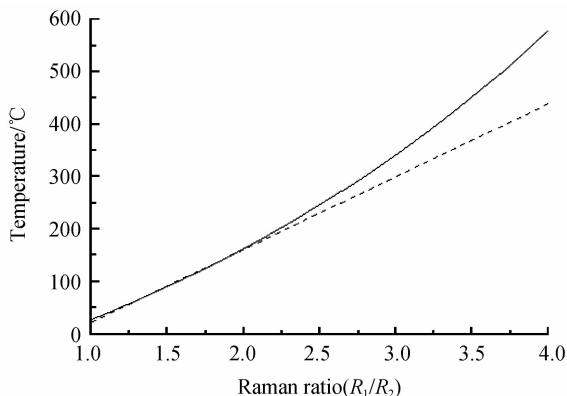


图 2 温度  $T$  与光强比  $R_1/R_2$  的关系

Fig. 2 The relation of temperature  $T$  and Raman ratio  $R_1/R_2$

中实线所示,随测量温度的升高,其非线性增强,但在  $0 \sim 120^\circ\text{C}$ , 光强比值  $R_1/R_2$  与温度  $T$  的曲线近似趋近于线性.

## 1.2 带宽对系统性能的影响

在分布式光纤喇曼测温系统中,空间分辨率、温度分辨率和测量时间都与带宽有着密切联系. 系统空间分辨率由式(2)决定<sup>[10]</sup>

$$\sigma z = \max\{\sigma z_1, \sigma z_2, \sigma z_3\} = \max\left\{\frac{\Delta T \cdot \nu}{2}, \frac{\tau \cdot \nu}{2}, \frac{t \cdot \nu}{2}\right\} \quad (2)$$

式中,  $\nu$  为光波在光纤中传播速度,  $\Delta T$  为激光脉冲宽度,  $\tau$  为探测模块响应时间,  $t$  为采集卡 A/D 转化时间. 例如:若实际系统要达 1 m 空间分辨率,需设定激光器脉冲宽度为 10 ns,探测模块响应时间需在 10 ns 以下,而采集卡采样率需达 100 M/s 以上. 如今,脉冲激光器的脉冲宽度可达飞秒(femtosecond, fs)级别,很容易达到 10 ns 以下,而采集卡的采样率也能达上百兆至几百兆. 因此,实际限制系统空间分辨率由探测模块的响应时间决定,其与带宽关系为

$$B_w \cdot \tau = C \quad (3)$$

式中,  $B_w$  为带宽,  $C$  为常量. 由式(2)和式(3)可知:若要提高空间分辨率,需要增加系统带宽,然而带宽增加同时,无疑给系统引入大量白噪音,这里主要指热噪音与闪粒噪音,其与带宽关系如式(4)和式(5)所示<sup>[11]</sup>

$$\overline{i_{NT}^2} = \frac{4\kappa T_a B_w}{R_L} \quad (4)$$

$$\overline{i_{NS}^2} = 2e(\overline{i_s} + I_D) B_w \quad (5)$$

式中,  $\overline{i_{NT}^2}$ ,  $\overline{i_{NS}^2}$  为热噪音与散粒噪音均方根,  $T_a$  为绝对温度,  $R_L$  为理想电阻,  $e$  为电子电量,  $\overline{i_s}$  为光电流,  $I_D$  为暗电流.

系统温度分辨率与测量时间由式(6)和式(7)决定<sup>[12]</sup>

$$\sigma T = \frac{\kappa T^2}{h c \nu} \cdot \frac{1}{\text{SNR}_{as}} \quad (6)$$

$$t \approx N/f \quad (7)$$

式中,  $\sigma T$  为温度分辨率,  $\text{SNR}_{as}$  为系统信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)的信号平均次数,  $f$  为脉冲激光器的发射频率. 式(6)表明,白噪音的引入降低了系统信噪比,导致温度分辨率降低. 一种有效压制系统白噪音(提高 SNR)的方法是将信号进行累加平均<sup>[13]</sup>,当带宽增加后,若要达到同样温度分辨率,必然增加平均次数. 式(7)表明,平均次数的增加使得测量时间延长,导致系统实时性降低.

## 1.3 实际系统频率响应模型

在实际分布式光纤喇曼测温系统中,空间分辨

率与能否实现准确测温均受系统带宽制约,即与系统频率响应相关.设探测模块中光电二级管的传递函数为 $h(\omega_1)$ ,放大电路部分为 $h(\omega_2)$ ,采集卡为 $h(\omega_3)$ ,则系统传递函数为

$$h(\omega)=h(\omega_1)h(\omega_2)h(\omega_3) \tag{8}$$

对于实际的光纤喇曼测温系统,限制系统频率响应由探测模块的放大电路部分决定,即在式(8)中, $\omega_2$ 最小.分布式光纤系统在测量过程中,沿传感光纤有一处或几处温度上升区域时,温度测量信号与非周期脉冲信号类似.根据中华人民共和国国家标准对线性光纤感温火灾探测器的规定<sup>[14]</sup>,针对空间分辨率为1 m的分布式光纤测温系统,要求3 m测温长度有准确的温度响应.为此,首先将探测模块中的放大电路部分可以等效为一个截止频率为100 MHz的二阶低通滤波系统,将光纤感温区域信号长度分别为3~6 m和20 m的实际温度测量信号等效成脉冲宽度为30~60 ns以及200 ns的脉冲信号,测温过程等效成脉冲信号经过一个低通滤波系统.图3为一组非周期性脉冲信号.

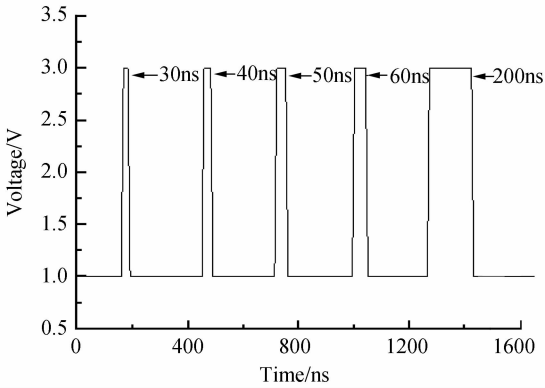


图3 非周期型脉冲信号  
Fig. 3 The non-periodic pulse signal

将脉冲信号通过二阶低通滤波电路,结果如图4所示.

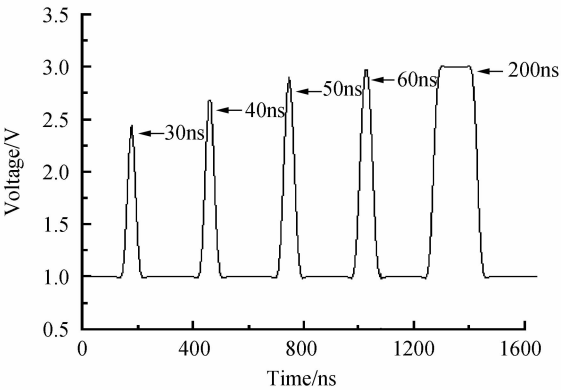


图4 低通滤波后的非周期脉冲信号  
Fig. 4 The non-periodic pulse signal after passing a low pass filter

图4表明,与原始信号相比,脉宽为30~50 ns

的幅值变小,而60 ns和200 ns幅值保持不变.由于30~50 ns含有截止频率外的信号,因此其幅值降低,因而不能实现准确的温度响应.

由1.2节分析可知,小的系统带宽能提高温度分辨率、降低测量时间,但会导致系统空间分辨率降低,同时会造成施加在较短区域光纤上的温度场得不到准确响应.为达到1 m空间分辨率,实现对温度准确测量,一种方法是增加探测模块放大电路带宽,该方法为系统引入了大量白噪音,利用累加平均进行降噪处理需要耗费大量时间,这对提高系统实时性不利;另一方面,目前国内使用的高带宽(上百兆至几百兆)光电探测模块几乎靠进口,价格十分昂贵,不利于系统生产与推广;另一种方法是运用合理的算法,通过软件的方式对温度值进行补偿.由1.3节分析可知:在分布式光纤喇曼测温系统中,探测模块放大电路带宽不足,使得系统存在一个较低的截止频率,导致在一定长度范围内的测温光纤温度响应不足.考虑到系统对每个频率的响应是确定的,并且喇曼比值与温度在0℃~120℃的范围内成线性关系.因此,本文提出一种线性修正算法,利用大量实验结果统计的办法,找出3~6 m感温长度的信号的修正系数,并对系统进行修正.

2 实验研究

2.1 系统构建

根据图1的分布式光纤喇曼测温系统,系统所用器件及其性能参量如表1.在该系统中采用标准单模光纤 G652. D 作为传感光纤,传感距离为10 km.

表1 分布式喇曼测温系统采用器件及其性能参量  
Table 1 The devices and theirs' parameters of distributed optical fiber Raman temperature measurement system

Devices	Laser	WDM	Detecting module	DAQ
Parameters	Center wavelength:			
	1 550 nm;		Low-noise;	Two channels;
	Pulse width:		Avalanche photodiode;	14 bits;
	6~20 ns;	1 450±7 nm	Including preamplifier	The maximum sample
	Repetition frequency:	1 663±8 nm	and main amplifier	rate;
	1~20 kHz;			125 M/s
	The maximum peak power:			
	24 W			

利用该系统进行测温实验,将长度为3 m,4 m,5 m,6 m,20 m单模光纤环放入高准确度(温度准确度达0.1℃)恒温槽进行测温实验(设定恒温槽中的温度为80℃),实验结果如图5.

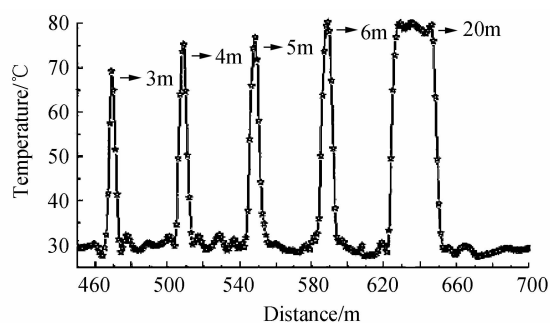


图5 原始的距离温度曲线

Fig. 5 The curve of distance and temperature without using the new arithmetic

由图5可知,6 m与20 m幅值高度几乎一致,均能达到80℃水平,即6 m以上光纤长度均能实现温度的准确测量,因而将6 m光纤长度作为能够实现温度准确测量的最小值,其幅值可作为实现温度准确测量的标准值.由于系统带宽不足,导致3~5 m光纤测温环温度响应不足,不能到达与6 m相同水平,测量值与实际温度存在误差.实验结果表明,其误差范围从几摄氏度到十几摄氏度.

## 2.2 光纤升温区域的高斯拟合

为实现对3~6 m测温光纤的温度幅值修正,首先需准确求出幅值大小,再根据幅值大小与标准值比较,确定修正系数.实验中,将3 m光纤环置于恒温水槽,从40℃~80℃,每隔10℃加热恒温水槽,待其稳定后,采集每个温度下10组数据并保存,图6为3 m光纤测温区域在不同温度下的曲线.

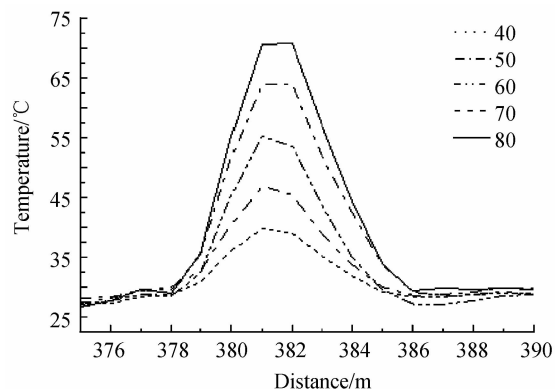


图6 3 m光纤测温区域在不同温度下的曲线

Fig. 6 The curve of 3 meters at different temperatures

图6表明,3 m光纤环在每个温度下均不能达到预设温度,测量值偏低,需要进行修正,使之达到6 m水平.大量数据分析表明,3~5 m的光纤升温区域的温度响应曲线近似高斯分布,因此对其进行高斯拟合,将拟合后的曲线进行峰值查找,然后与6 m的幅值进行比较,确定3 m光纤环的放大系数.图7表示从40℃~80℃,3 m光纤测温区域经高斯拟合后的温度距离曲线.

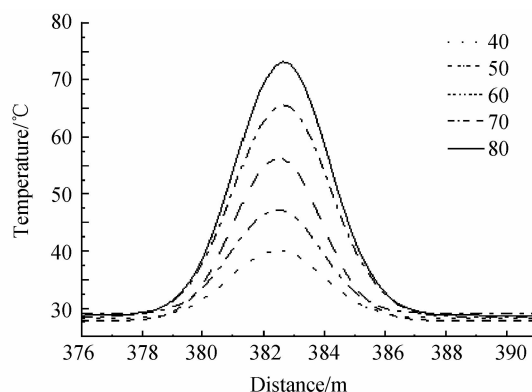


图7 3 m光纤测温区域经高斯拟合后在不同温

Fig. 7 The curve of 3 meters at different temperatures after gauss fitting

经高斯拟合后,查找出峰值并计算出3 m光纤测温区域的半高宽度(Full Width Half Maximum, FWHM).由正态分布下的 $3\sigma$ 判定原则可知,设定一个置信区间( $FWHM-3\sigma$ ,  $FWHM+3\sigma$ ),来判定升温区域是否为3 m,其准确率达到99.73%<sup>[15]</sup>.同样,对4 m,5 m光纤升温区域采取与3 m相同操作,即高斯拟合后,进行峰值查找并计算各自半高宽度,设定相应的置信区间,进而判断升温区域长度为4 m还是5 m.在实际测温过程中,根据每个置信区间范围,便可判段光纤升温区域长度.

## 2.3 线性修正算法

分析可知,根据置信区间判定升温区域长度,确定升温区域宽度后,利用相应的放大系数,将3~6 m的测温幅值提升到6 m水平,从而实现温度的准确测量.具体步骤为:

- 1)准确定位传感光纤的温度上升区域;
- 2)将上升区域部分进行高斯拟合,读取并保存幅值和半高宽度;
- 3)判断半高宽度所在的置信区间,确定升温区域宽度(即判断升温区域为3 m,4 m,还是5 m,如果实际升温区域在3~4 m之间,则采用3 m放大系数;在4~5 m之间,则采用4 m放大系数;在5~6 m之间,采用5 m放大系数.实验结果表明,小范围内采用同一放大系数满足测温准确度要求);
- 4)利用相应的放大系数将高斯拟合后的幅值进行线性修正,使之达到6 m水平.

将算法植入采集程序,得到修正后的温度距离曲线如图8.图8表明,在80℃的恒温槽中,长度3~5 m的光纤环幅值与6 m处于同一水平,经修正后的幅值与20 m光纤环高度一致,实现了温度的准确测量,证明了本算法的可行性.

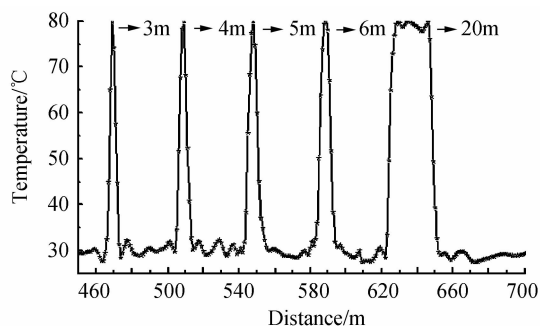


图8 系数修正后的距离温度曲线

Fig. 8 The relationship between distance and temperature after coefficients corrected

为测试光纤尾端性能,在8~9 km处,分别绕出长为3~10 m,20 m的光纤环(从右至左,每段递增1 m,间隔30 m),将其置入80℃的恒温水槽中,间隔段暴露在室温下。图9为达到稳态后实时采集的距离温度曲线,实验结果表明:采用修正算法后,3~5 m光纤环温度幅值与6~10 m,20 m高度几乎一致,实现了温度的准确测量。

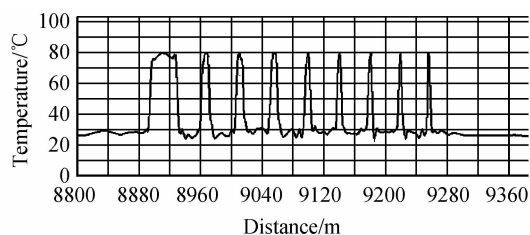


图9 实时采集的距离温度曲线

Fig. 9 The curve of distance and temperature in real-time acquisition

为了分析修正后测温准确度及其稳定性,将系统进行5天的连续测量和一个月的间断性测量,随机抽取光纤后端3 m光纤环在不同温度下的测量值。将测量值与标准温度统计如表2。结果表明,实测温度值与标准温度值最大误差不超过2℃,平均温度

表2 标准温度值和实测温度值对比表

Table 2 Contrast between standard temperature and test temperature

Standard/ (°C)	Actual/ (°C)	Average/ (°C)	Error/ (°C)	Average error/(°C)
30	31.5	31.4	0.1	1.4
35	35.2	34.3	0.9	-0.4
40	40.6	40.3	0.3	-0.7
45	44.8	45.0	0.2	0.5
50	49.7	48.8	0.9	-1.1
55	55.5	54.8	0.7	-0.1
60	60.6	58.8	1.8	0.1
65	64.0	64.8	0.8	0.6
70	68.5	68.2	0.3	-1.2
80	80.3	80.9	0.6	0.6
85	85.3	84.4	0.9	0.4

90 89.7 90.6 90.7 90.3 90.3 0.3

误差为0.9℃,测温准确度在1℃范围内,说明采用该算法后系统测温准确度高,系统稳定性良好。

### 3 结论

本文从分布式光纤喇曼测温原理出发,在分析喇曼比值强度与温度关系的基础上得出,在0~120℃内,喇曼比值与温度近似线性。同时分析了带宽与空间分辨率,温度分辨率与测量时间的相互关系及其频率响应特性。设计并制作了10 km单模光纤测温系统,在实际系统中因探测模块带宽不足而导致3~6 m光纤测温不准,影响了系统测温的准确性。基于系统硬件实现和实际推广考虑,提出一种线性修正算法实现温度准确测量。算法中,首先将升温区域进行高斯拟合,确定其幅值大小和半高宽度,根据置信区间判断升温区域宽度后,利用相应的放大系数进行线性修正,从而将3~6 m光纤升温区域幅值提升至6 m水平,使3 m以上的光纤具有准确的温度相应。为验证系统测温准确度与稳定性,在10 km传感光纤尾端抽出3 m进行测温实验,结果表明,其准确度在1℃之内,系统稳定性好,满足了实际应用要求。

### 参考文献

- [1] ZHANG Zai-xuan, WANG Jiang-feng, LIU Hong-lin, *et al.* Experiment research of 30 km long distance distributed optical fiber raman temperature sensor system[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2004, **31**(5): 613-614.  
张在宣,王剑锋,刘红林,等.30 km远程分布光纤喇曼温度传感器系统的实验研究[J].中国激光,2004,**31**(5):613-614.
- [2] YU Xiang-dong, Zhang Zai-xuan, ZHU Hai-zhong, *et al.* An intelligent temperature compensating circuit for distributed optical fiber raman temperature sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1870-1871.  
余向东,张在宣,祝海忠,等.采用智能温度补偿电路的分布式光纤喇曼温度传感器[J].光子学报,2011,**40**(12):1870-1871.
- [3] ZHEN Yan-ling, YI Tao, ZHANG Guan-jun, *et al.* On-line temperature monitoring of 10 kV underground cables-in-pipe row based on distributed optical fiber sensing technology[J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, **46**(11): 49-50.  
郑雁翎,仪涛,张冠军,等.10 kV地下排管电缆的分布式光纤在线测温技术的应用研究[J].高压电器,2010,**46**(10):49-52.
- [4] WU Yong-hong, Su HUAI-zhi, XU Hong-zhong, *et al.* Study on multi-plexing capability of huge concrete dam crack distributed Fiber optic monitoring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 722-725.  
吴永红,苏怀智,徐洪钟,等.混凝土大坝裂缝光纤分布式检测[J].光子学报,2007,**36**(4):722-725.
- [5] SUN Guo-shan, HOU Si-zu, CHEN Chao. Raman optical fiber temperature measurement principle and application in power system[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2010, **3**(5): 26-29.  
孙国善,侯思祖,陈超.喇曼光纤测温原理及在电力系统中的应用[J].电力科学工程,2010,**3**(5):26-29.
- [6] ZHANG Zai-xuan, WANG Jiang-feng, LIU Hong-lin, *et al.*

- Experiment research of 30 km long distance distributed optical fiber raman temperature sensor system[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2004, **31**(5): 613-614.
- 张在宣,王剑锋,刘红林,等. KIM 30 km 远程分布光纤喇曼温度传感器系统的实验研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 613-614.
- [7] 方曼. 分布式喇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: 4-6.
- [8] 方容川. 固体光谱学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 294-297.
- [9] ZHANG Zai-xuan, WANG Jian-feng, YU Xiang-dong, *et al.* The research of raman type ditributed optical fiber temperature measuring method[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(6): 597-598.
- 张在宣,王剑锋,余向东,等. Raman 散射型分布式光纤温度测量方法的研究[J]. 光电子 • 激光, 2001, **12**(6): 597-598.
- [10] ZHANG Lei, FENG Xue, ZHANG Wei, *et al.* Fiber raman distributed temperature sensor based on the light source with adjustable pulsewidth[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **10**(38): 2584-2586.
- 张磊,冯雪,张巍,等. 基于变脉宽光源的分布式光纤喇曼温度传感器[J]. 光子学报, 2009, **10**(38): 2584-2586.
- [11] PALAIS J C. Fiber optic communications[M]. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998: 274-277.
- [12] 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): 475-476.
- 于明飞,陈孝君. 分布式喇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): 475-476.
- [13] BOLOGNINI G, PARK J, SOTO M A, *et al.* Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(32): 3213-3214.
- [14] 全国消防标准化委员会第六分技术委员会. GB/T 21197-2007 线性光纤感温火灾探测器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [15] 杨虎,刘琼荪,钟波. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 93-98.

## A Linear Correcting Algorithm for Improving Space Resolution of Distributed Optical Fiber Raman Temperature Measurement System

NING Feng, ZHU Yong, CUI Hai-jun, LI Xiao-qin, JIN Zhong-xie

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

**Abstract:** Because of deficient bandwidth, the space resolution of Distributed Optical Fiber Raman Temperature Sensor (DOFRTS) is low. When the sensing length of fiber is close to space resolution, there is no accurate temperature response. For solving the problems, a new linear algorithm is proposed. Firstly, the relationship between Raman ratio and temperature and the characteristics of frequency response are analyzed, and then a mathematical model is built up for this algorithm. A single-mode temperature sensor system for 10 km long is built up, some related experiments are carried out by using the algorithm. Experiment results are consistent with theoretical analysis, the temperature amplitudes of testing fiber from 3 meters to 6 meters are corrected. The temperature measurement accuracy reaches 1°C and measuring time is 40 seconds. By applying this algorithm, the limit of bandwidth can be overcome effectively and the system cost is cut down obviously, at the same time, space resolution, temperature resolution and measuring time are optimized.

**Key words:** Raman measure temperature; Bandwidth; Linear correcting algorithm; Frequency response; Space resolution