

doi: 10.3788/gzxb20124107.0831

光纤分布式测温系统中基于迭代法的高准确度温度解调算法

夏涛, 李小兵, 郭江涛, 张睿, 茅昕

(光纤光缆制备技术国家重点实验室; 长飞光纤光缆有限公司研发中心, 武汉 430074)

摘 要:提出了一种利用喇曼散射原理的光纤分布式测温系统中基于迭代的高准确度温度解调算法. 针对于常规的反斯托克斯-斯托克斯双光路比值的温度解调算法, 该迭代算法进一步校正了光纤中双光路衰减系数差对温度敏感带来的温度测量误差, 尤其适用于中距离且温度场复杂的测温环境, 实现了高准确度的温度测量. 通过理论分析确定了该迭代法的迭代格式, 测量了相应的光纤参量, 并在传感样机上编写相应的代码通过实验予以验证, 在 0~90℃ 温度范围, 5 km 测量长度输出的测温曲线符合预期的测温效果.

关键词:分布式测温; 喇曼散射; 衰减系数校正因子; 温度解调; 迭代法

中图分类号: O561.1; O437.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)07-0831-5

0 引言

温度是生活生产中的重要物理量之一, 人们采用了各种方式对其进行监控. 利用喇曼散射原理和光时域反射仪 (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR) 技术的光纤分布式温度传感器同时具有测温 and 定位的功能, 相对于传统的温度传感器, 分布式光纤温度传感器还具有单位成本低、抗电磁辐射干扰能力强、易于在各种复杂的待测地理环境中施工的一些优点, 常常被用做高压电力线路、变电站、地铁隧道、炼油厂、油井矿井等领域的温度监控手段^[1].

为了提高分布式测温系统的关键性能参量, 人们进行了大量的研究工作. 系统中各器件性能的相互制约关系限制了系统整体性能的提高, 通常根据实际应用的需要提高一部分性能而降低其它方面的性能^[2], 例如为了得到更高的温度分辨率, 一般采用增大脉冲宽度和增加累加平均次数的方法提高系统信噪比以提高温度分辨率, 但这同时降低了系统的空间分辨率和测量速度. 另一方面, 为了消除光功率波动等器件因素对温度解调的影响, 一般采用温度敏感的反斯托克斯光曲线与作为参考光的斯托克斯光曲线比值的相对强度对温度进行解调^[3]. 为了得到反映温度分布的相对强度曲线, 需要对光纤中反斯托克斯波长和斯托克斯波长的衰减系数差对信号

带来的畸变进行校正, 常规校正方法中采用的衰减系数校正因子通常为预先测定的常量. 但是在温度场分布复杂的实际应用环境下, 由于光纤衰耗对温度的敏感性, 常规的校正方法限制了系统温度解调准确度的进一步提高.

文中提出了一种基于迭代格式的高准确度温度解调算法: 在待测环境的温度分布未知的情况下, 利用传统的温度解调方法对光纤中的温度分布进行粗测, 同时根据粗测的结果得到光纤中的衰耗分布 (衰减系数对温度的敏感关系需要预先测定), 利用得到的衰减系数分布对测温喇曼信号的畸变进行校正, 得到更精确的温度分布, 同时计算出更精确的衰减系数分布, 利用两者的相互校正关系, 通过有限的迭代次数, 将系统的测温准确度提高到预设的误差限度以内. 同时由于数据采集和解调算法在不同的处理单元中同步进行, 在提高系统测温准确度的同时不会影响系统的空间分辨率和测温速度等其它性能.

1 温度解调方法理论分析

1.1 传统的温度解调方法

双通道温度解调系统的搭建如图 1^[4], 其工作流程为: 脉冲光源将探测光脉冲经过喇曼滤波器注入测温传感光纤中, 沿光纤长度返回注入端含有温度信息的后向喇曼散射时序信号由喇曼滤波器过滤

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB735904) 和国家自然科学基金 (No. 61007054) 资助

第一作者: 夏涛 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤制造及传感技术. Email: Xiatao@yofc.com

导 师: 姚端正 (1946-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为数学物理方法及其在非线性光学中的应用. Email: dzyao@whu.edu.cn

收稿日期: 2012-02-22; **修回日期:** 2012-03-30

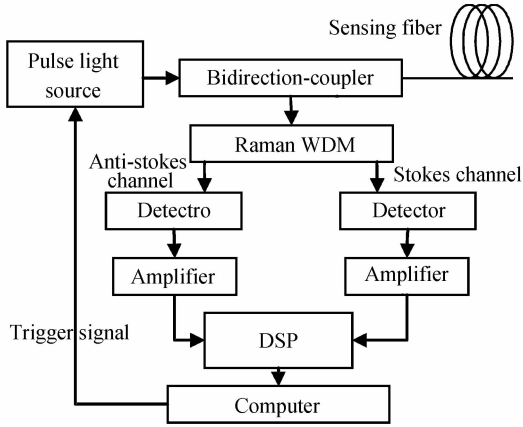


图1 双通道温度解调系统搭建

Fig. 1 Distributed temperature sensing system based on Raman scattering

并分别注入到光电转换放大单元中,光电转换放大模块输出的电压信号经过 A/D 转换及累加去噪后输入数据处理模块进行温度解调,数据处理单元将解调后的温度信号输出到监测终端进行温度监测.系统测量到的喇曼散射信号,传统的解调方式如式(1)

$$\left(\frac{P_{as}(z)}{P_s(z)}\right) \cdot e^{-\Delta\alpha \cdot z} = c \cdot e^{-\frac{h\Delta\nu}{kT(z)}} \quad (1)$$

式中 $P_{as}(z)$ 和 $P_s(z)$ 分别为和检测端距离为 z 的后向喇曼散射反斯托克斯和斯托克斯相对光功率强度, $\Delta\alpha$ 为光纤中反斯托克斯和斯托克斯波长的衰减系数差, c 为光纤的定标常量, h 为普朗克常量, $\Delta\nu$ 为喇曼跃迁频率, k 为波尔兹曼常量, $T(z)$ 为光纤中的温度分布.

由于光纤对双光路信号的衰减系数的不同, P_{as} 和 P_s 经历了不同的衰减,接收端接收到的信号比值比实际发生散射位置的信号产生了随距离而增大的畸变.式(1)中的指数项 $e^{-\Delta\alpha \cdot z}$ 称为衰减系数校正因子,通过衰减系数校正因子,对光纤中喇曼散射双光路的衰减系数差对解调原始信号的畸变进行了校正,传统的解调方法中把光纤对两个散射波长的衰减系数差作为一个常量.

在实验中发现,由于光纤分子热振动对传输光的影响,其衰减系数表现出对温度的敏感性.因此,随着测温环境的温度分布变化,光纤中的衰减分布也产生相对应的变化,对于将衰减系数作为常量的传统解调手段,其长距离的解调准确度仅能达到 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ [5].

1.2 基于迭代法的改进型温度解调算法

针对传统解调手段的不足,本文将反斯托克斯波长及斯托克斯波长的衰减系数差写为光纤中温度分布的函数 $\Delta\alpha[T(z)]$,同时,相应地将温度解调式(1)改写为

$$\left(\frac{P_{as}(z)}{P_s(z)}\right) \cdot \exp\left(-\int_0^z \Delta\alpha[T(z)] dz\right) = c \cdot e^{-\frac{h\Delta\nu}{kT(z)}} \quad (2)$$

该解调算法需要将带测量温度分布作为参量得到光纤中的衰减系数分布,同时用得到的衰减系数分布作为校正参量来得到更精确地温度分布.基于此原理我们提出一种改进的温度解调算法,该算法的计算流程为:

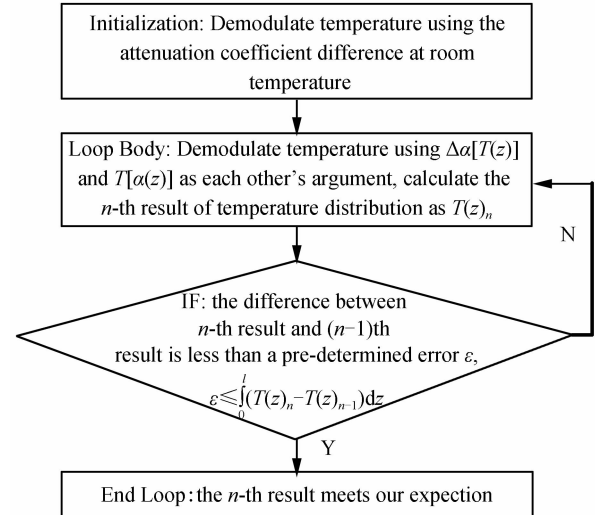


图2 基于迭代的温度解调算法流程

Fig. 2 Signal demodulation procedure based on iteration technique

在实验过程中,用数据采集卡采集到的信号是离散信号,为了便于该迭代法在计算机上执行,将解调式(2)改写为

$$\left(\frac{P_{as}^n}{P_s^n}\right) \cdot \exp\left(-\sum_{n=0}^i \alpha(T_n) \cdot \tau\right) = c \cdot e^{-\frac{h\Delta\nu}{kT_n}} \quad (3)$$

式中, $\exp\left(-\sum_{n=0}^i \alpha(T_n) \cdot \tau\right)$ 为改进解调算法中的衰减系数校正因子, n 为采样点的序列, τ 为采样步长.实验使用的采集卡采样速率为 100 MHz,相应的采样步长约为 1 m.

2 实验方案及实验结果

通过上述理论分析,改进的解调算法实验主要包括以下几个过程:1)测量并拟合光纤 1 451 nm 和 1 663 nm 波长衰减系数差的温度敏感关系 $\Delta\alpha(T)$; 2)利用式(1)所示的解调公式计算光纤中的温度分布 $T(z)_0$,利用该温度分布计算出光纤中的衰减系数分布 $\Delta\alpha[T(z)_0]$,并将该衰减系数分布作为校正因子对原始数据进行校正,得到光纤温度分布 $T(z)_1$; 3)重复过程(2),将第 n 次迭代得到的温度分布和衰减系数分布分别记为 $T(z)_n$ 和 $\Delta\alpha[T(z)]_n$,同时将测温结果在感兴趣点和实际温度进行比较,判断是否达到解调准确度.

在实验使用的传感单元是武汉长飞生产的 HiBand OM1 光纤,其主要特征为:芯径 $62.5 \mu\text{m}$,数值孔径 0.29, 1550 nm 波长的衰减系数小于 0.3 dB/km ,带宽大于 600 MHz . 该光纤后向散射信号收集能力强,对信号的衰减及展宽较小,较一般类型的光纤更适宜作为分布式测温的传感单元. 对于本文使用的传感光纤,如图 3 所示在不同温度下,均匀温度分布的光纤后向散射 ($P_{\text{as}}/P_{\text{s}}$) 功率曲线由于衰减系数对温度的敏感而表现出不同的斜率.

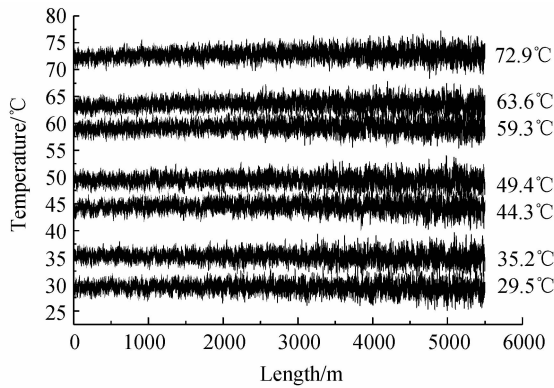


图 3 不同温度下的 ($P_{\text{as}}/P_{\text{s}}$) 原始曲线
Fig. 3 Anti-stokes to Stokes ratio lengthwise

利用以上数据拟合出了该光纤不同温度下的衰减系数及相应的衰减系数-温度的变化关系,如图 4.

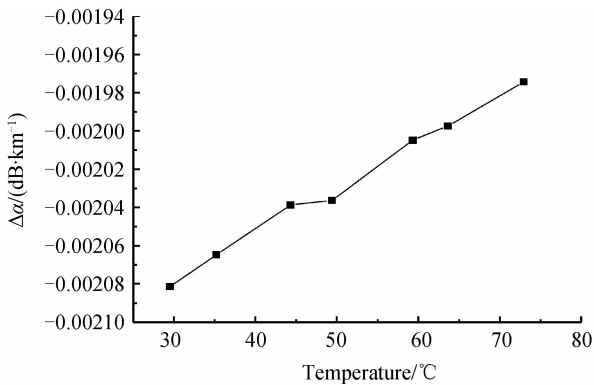


图 4 传感光纤衰减系数差与温度的关系
Fig. 4 Attenuation coefficient dependence with temperature

拟合得到的 $\Delta\alpha$ 与温度的关系式为
$$\Delta\alpha(T) = 2 \times 10^{-6} T - 0.0028 \quad (4)$$

利用关系式(4),在实验平台上进行了温度解调试验,记录了多次迭代后得到的温度曲线.

如图 5 所示,测温环一的中心位置距离探测端 4340 m ,使用 16 位有效准确度的电子温度计测温测得该点的温度值为 67.563°C ,以此为依据,得到迭代次数与温度解调误差的关系如图 6.

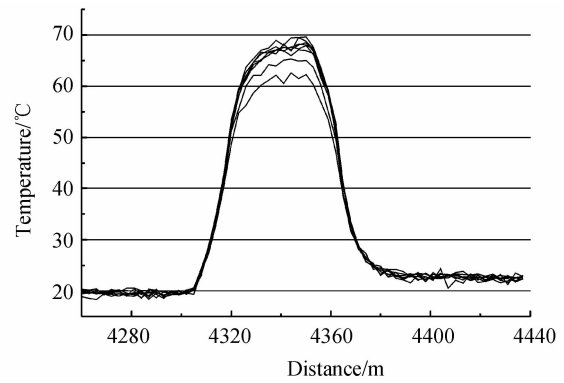


图 5 测温环一的测温曲线(迭代 8 次)
Fig. 5 Temperature of fiber coil 1(iteration for 8 times)

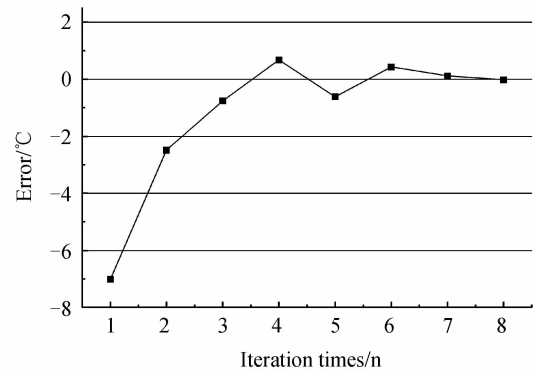


图 6 迭代次数与解调误差的关系
Fig. 6 Error decrease with the increase of iteration times

从图 6 可以看出,对于测温环一,随着迭代次数的增加,温度解调误差呈近似振荡收敛的效果,第三次之后的迭代输出结果误差小于 1°C ,第八次迭代后的测温结果达到本文预设误差 0.02°C .

图 7 所示测温环二距探测端的位置 5035 m ,电子式温度计测得该点的温度值为 79.625°C ,以此为依据得到与图 6 类似的迭代次数-解调误差关系,如图 8.

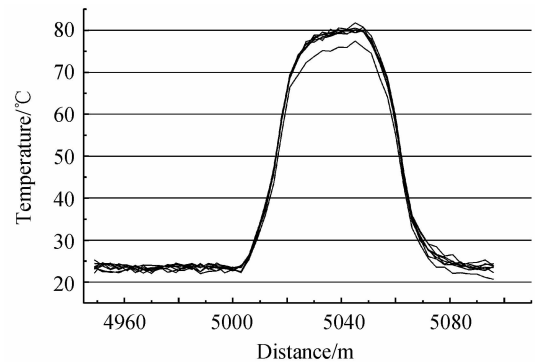


图 7 测温环二的测温曲线(迭代 8 次)
Fig. 7 Temperature of fiber coil 2(iteration for 8 times)

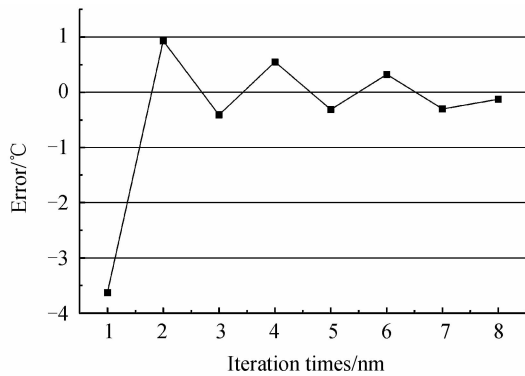


图8 迭代次数与解调误差的关系

Fig.8 Error decrease with the increase of iteration times

3 结论

相对于单通道温度解调,双通道解调在系统稳定性上具有不可比拟的优势,但是由于光纤衰减谱对温度敏感的特性,需要设计算法来对其进行校正,达到高准确度的温度解调。

在实验中本文采用的光源调制频率为 10 kHz,为提高信噪比采用的累加平均次数为 2^{15} 次,单次测量时间约为 3.5 s.从图 6 和图 8 看出,通过该迭代解调算法的实施,第四次的迭代结果,距离为 4 340 m 和 5 040 m 的两个测温环的测温准确度均达到了 1°C 以内,通过 8 次迭代(耗时 30 s 以内),两个测温环的温度准确度均达到了 0.02°C ,取得了我们预期的实验效果.该算法进一步提高了分布式光纤测温系统在变电站、大型建筑、隧道、工业生产中等温度监测领域的实用性。

参考文献

[1] XIE Chun-jian. Studying principle and constructing system of distributed optical fiber temperature sensor [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
谢春建. 分布式光纤传感器原理研究与系统构建[D]. 南京:东南大学 2005.

[2] 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, **38**(10): 2584-2587.
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研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(10):2584-2587.

[3] DAKIN J P, PRATT D J, BIBBY G W, *et al.* Temperature distribution measurement using Raman ratio thermometry[C]. *SPIE*, 1985, **566**: 249-253.

[4] ZHAO Wei, ZHAO Xiao-ming, WANG Lian-fen, *et al.* The theory study of temperature demodulation based on temperature domino effect of anti-stokes Raman scattering[J]. *Optoelectric Technology & Information*, 2005, **18**(2): 38-42.
赵玮,赵晓铭,王莲芬,等. 基于 anti-Stokes Raman 散射温度效应的温度解调理论研究[J]. 光电子技术与信息, 2005, **18**(2):38-42.

[5] ZHANG Li-xun, LIAO Yun, LIU Yong-zhi, *et al.* Circulation demodulation method for 1.55 μm Raman temperature sensors[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 165-167.
张利勋,廖云,刘永智,等. 1.55 μm 喇曼温度传感器的强循环解调方法[J]. 激光技术, 2006, **30**(2):165-167.

[6] ZHANG Lei, FENG Xue, ZHANG Wei, *et al.* Numerical comparison on the measurement time of long range fiber Raman distributed temperature sensors operating at 1.66 μm and 1.55 μm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2805-2809.
张磊,冯雪,张巍,等. 1.66 μm 和 1.55 μm 光源对长距离光纤喇曼温度传感器测量时间影响的理论对比[J]. 光子学报, 2009, **38**(11):2805-2809.

[7] JONGHAN P, BOLOGNINI G, DUCKEY L, *et al.* Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **19**(17): 1879-1881.

[8] 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. 光子学报, 2011, **40**(9):1297-1302.

[9] TANNER M G, DYER S D, BAEK B, *et al.* High-resolution single-mode fiber-optic distributed Raman sensor for absolute temperature measurement using superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(20): 201110-201110-3.

[10] MARK B H, FRANCISCO S, KENNETH E G, *et al.* Calibrating single-ended fiber-optic raman spectra distributed temperature sensing data [J]. *Sensors*, 2011, **11**(11): 10859-10879.

[11] BERNINI R, MINARDO A, ZENI L, *et al.* Distributed sensing at centimeter-scale spatial resolution by BOFDA: Measurements and signal processing [J]. *Photonics Journal, IEEE*, 2012, **4**(1): 48-56.

High Precision Temperature Calculation Method of Fiber-optic Distributed Temperature Sensing System Based on Iteration Technique

XIA Tao, LI Xiao-bing, GUO Jiang-tao, ZHANG Rui, MAO Xin

(State Key Laboratory of Fiber and Cable Manufacturing Technology; Research and Develop Center of Yangtze Optical Fiber and Cable Company, Wuhan 430074, China)

Abstract: A high precision temperature calculation method of fiber-optic distributed temperature sensing system based on iteration technique is introduced. Compared with the traditional calculation methods, this iteration-based method further corrects the attenuation coefficient difference of the Raman anti-stokes wavelength and stokes wavelength in optical fiber which is temperature-sensitive, thus increases the precision of temperature measurement. It especially works well with the measurements of normal-distance, complex temperature distribution fields. The iterative formula is established by theoretical analysis, the corresponding fiber parameters are pre-measured, by programming on data processing module of the sensing system. The result shows great accordance between calculation and actual temperature distribution within the range from 0 to 90°C along a whole fiber of 5 km.

Key words: Distributed temperature sensing; Raman scattering; Attenuation coefficient correction factor; Temperature calculation; Iteration technique