

分布式单模光纤测温技术改进及应用研究

张彦琴¹, 宁提纲¹, 雷煜卿²

(1.北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044;2.中国电力科学研究院有限公司,北京 100085)

摘要:智能电网建设是智慧城市建设必不可少的一部分。为解决光纤复合低压电缆(OPLC)温度的实时监测、故障定位与隐患发现等问题,在基于喇曼散射的单模光纤分布式测温系统的温度解调模块中,提出利用背向瑞利散射光与反斯托克斯光比值的双路解调的优化方案;在数字处理模块中,提出多次累加平均与多小波算法相结合的方法。通过改进这两项技术进一步实现了测温高精度、定位高精度和空间高分辨率的在线实时测量目标,同时还在 OPLC 状态监测及安全运行评估系统中得到了验证。通过对温度、光功率和负荷电流等参量一体化测量,为 OPLC 安全运行评估、运维检修工作的简化、易行提供了技术支持。

关键词:电力光纤到户;OPLC;分布式测温;温度解调;数据处理

中图分类号: TN818 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)01-0037-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.01.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improvement and application study of distributed single mode optical fiber temperature measurement technology

ZHANG Yanqin¹, NING Tigang¹, LEI Yuqing²

(1. Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Smart grid construction is an essential part of smart city construction. In order to solve the real-time monitoring of optical fiber composite low-voltage cable (OPLC) temperature, fault location and hidden problems found, this paper proposes a dual-channel demodulation optimization scheme that uses the ratio of back Rayleigh scattered light to anti-Stokes light in the temperature demodulation module of distributed temperature measurement system based on Raman scattering for single-mode fiber. In the digital processing module, a method that combines multiple averaging and multi-wavelet algorithms is proposed. The optimization system further realizes on-line real-time measurement targets with high temperature accuracy, high positioning accuracy and high spatial resolution. At the same time, it has also been verified on the OPLC multi-level condition monitoring and safety operation evaluation system. The temperature of the cable, the load current and the optical power of the optical cable are concentrated on one device, which provides technical support for OPLC's safe operation evaluation and maintenance and repair work.

Key words: power fiber to the home; OPLC; distributed temperature measurement; temperature demodulation; data processing

0 引言

在智能电网建设中,随着电力行业的迅速发展,

收稿日期:2018-08-13。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0901200,电力光纤到户关键技术研究示范)资助。

作者简介:张彦琴(1992-),女,河北张家口人,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感。曾参与的项目是电力光纤到户。本科期间连续3年获得国家励志奖学金,河北省优秀毕业生的光荣称号;研究生期间获得一等学业奖学金、二等学业奖学金、暑期实践优秀成员和研会优秀理事等荣誉。



各种适用于电力系统的电力设备容量也大大增加。但由于电力设备的制造缺陷和运行单位的检修水平等原因,在使用过程中往往由故障引发大面积停电和火灾事故,这种现象在负荷增长较快的地区尤为常见。因此,输变电状态和电网设备的实时温度检测是重要的一环,它对运行安全状态的评估、隐患发现与故障定位等具有重要意义^[1-3]。

目前,国内分布式光纤传感测温技术已经具有最大监测距离为30km、空间分辨率达1~3m、测温精度为±1℃和温度分辨率达0.1℃的技术能力;国外最新的

息。同时背向反斯托克斯光与瑞利光是同时采集的, 激光器的功率是相同的, 激光器的波动被消除了, 从而使测量系统更加稳定, 测量的灵敏度和精度也更高。研究表明, 在 0~120℃反斯托克斯光功率和瑞利后向散射光比值解调方式的平均测温灵敏度为 1.065%/℃, 而通过反斯托克斯光与斯托克斯光比值双路解调的平均测温灵敏度只能达到 0.862%/℃。因此, 在本系统中, 通过选择较为合适的 WDM 可以达到较为理想的效果。从推导的公式结果可以看出, 解调温度的灵敏度仅与温度有关, 而与其它散射因子、损耗因子等无关, 所以采用该方法解调温度信号会得到更好的效果。

1.2 累加平均与多小波算法结合提高信噪比

分布式光纤测温传感系统的噪声来源有光纤传感的喇曼扩大形成的自发辐射噪声, 喇曼散射光在光电转换和信号放大的过程中形成对系统扰动性很强的噪声。在分析噪声的过程中, 其处理方法主要采用累加平均和滑动平均方法。累加平均去噪技术通过对温度信号进行多次测量累加, 能很好地滤除微弱光信号中的白噪声, 但累加平均次数过多会影响测温实时性, 另外累加平均对白噪声以外的噪声不能达到有效去噪的效果, 最终这类噪声的存在使得系统的温度分辨率难以提高。滑动平均技术可以滤除高频噪声, 但是得以降低空间分辨率为代价, 容易把突变点当噪声过滤, 造成漏报情况^[11]。

通过相关研究发现^[12-15], 采用累加平均算法, 其累加次数超过 10000 次之后, 累加次数的递增会加大系统的响应时间, 也会影响系统的响应速度, 对系统信噪比的提升效果不再明显。为了提高测温系统的精确性, 本文在采用累加平均算法的同时也采用多小波算法加以辅助, 即可在提升系统信噪比的前提下, 提高响应速度。经过相关研究发现多小波与传统小波的去噪原理十分相似, 即在多小波分解系数的基础上, 设置阈值处理多小波系数, 将与噪声相应的系数置零, 然后利用多小波重构信号。多小波去噪的每一层阈值可以根据实际情况设置多个, 而单小波去噪在每层只能设置一个阈值。因此, 多小波除了具有单小波去噪拥有的光滑性、紧支撑性、对称性和正交性优点外, 还具有精确性高、灵活实用等优点, 在实际应用中更加广泛, 其基本过程如图 2 所示。与单小波不同的是, 多小波与尺度函数的关系不再是一列数据, 而是矩阵。因此, 在分解前对输入数据进行预处理, 之后还要对重构后的数据进行处理才能得到需要的结果。

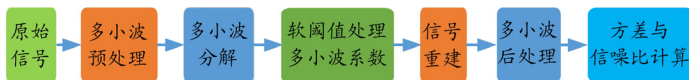


图2 多小波信号去噪过程

在该测温系统中, 本文采用传统单小波 db4 小波和 DGHM 多小波进行去噪处理。其中, 多小波的预处理采用改进的矩阵预处理法、软阈值形式, 单小波采用给定的软阈值来处理, 分解层数均为 5 层, 采用的改进软阈值公式为:

$$\delta = k\sigma\sqrt{2\lg N} / \ln(e+j-1) \quad (6)$$

其中, j 为分解尺度, N 为信号长度, k 为正整数, 取 $1 \leq k \leq \delta$, δ 为噪声估计方差。通常情况下, k 取 1、2、3 可取得较好结果(本文中 k 取 2), 噪声估计方差 δ 取尺度 $j=1$ 时小波分解与重构滤波的均方根误差(RMSE)。

图 3 为测温系统的原始数据图, 采样的点数为 1024。可以发现, 波形中有很多小的波动, 这些波动都是由多种噪声引起的。要想提高系统的精度, 必须采用一定的方法尽最大可能来消除噪声。

本文采用分解层数为 5 层、给定软阈值处理的单小波 db4 小波对原始数据做了处理, 得到的消噪结果如图 4 所示。同时, 采用分解层数为 5 层、改进软阈值处理的多小波 DGHM 对原始测温数据进行处理, 得到的消噪结果如图 5 所示。

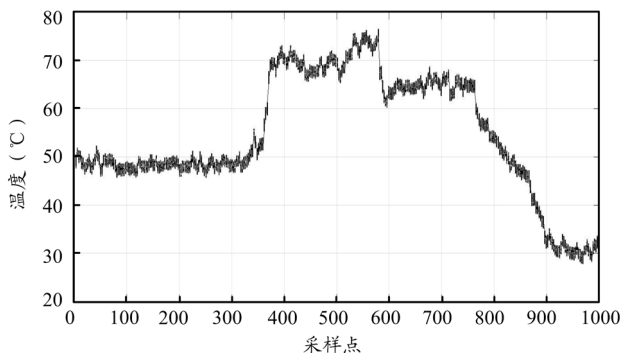


图3 原始测温数据图

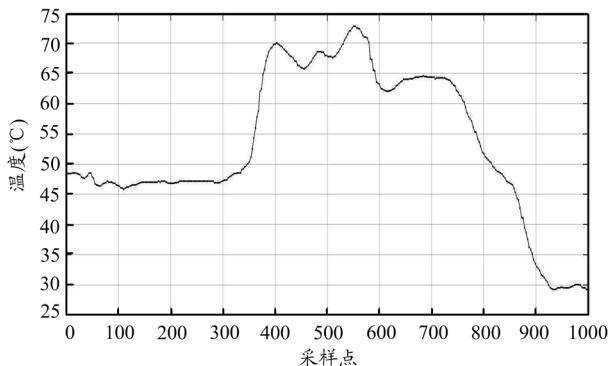


图4 db4 给定软阈值的消噪后的信号

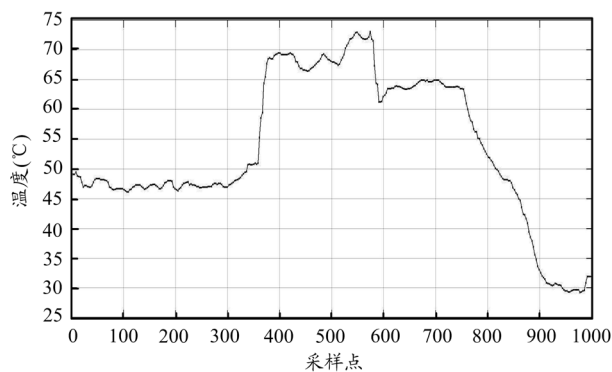


图5 DGHM改进矩阵预处理软阈值的消噪后的信号

从图4和图5可以看出,采用多小波改进的矩阵预处理、软阈值形式消噪比单小波消噪的效果更好,从而验证了多小波处理噪声信号的优越性。

2 实验结果与分析

本文对分布式光纤测温系统的温度解调方法、信号处理方法进行优化,将改变单模光纤测温时的不稳定性,同时提升测温数据的精度。OPLC状态分析仪通常设置两个温度测量通道,通过两个通道同时测量,获得温度数据,然后在系统内部进行数据解调处理,进一步提高了系统的测温精度。同时两个通道也可以互为备用通道,在其中一个通道出现故障时,可以通过另一个通道开展运维、检修工作,降低了设备的报修率。本文对油槽进行了双通道温度测量,得到的分布式测温系统的温度测量结果如表1所示。

表1 分布式光纤测温系统测温数据对比

通道	油槽设定温度(°C)	光缆实测温度(°C)
通道1(5150m)	85	85.6
	55	54.3
	39	37.8
通道2(5150m)	85	86.6
	55	55.7
	39	39

从表1中的两个通道的温度测量数据对比可以看出,通道1和通道2所测的光缆实际温度相差不大,其测温精度基本稳定在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。因此,该测温系统可以更好地实现双通道同时测量,并通过优化的数据解调处理技术,得到了更高测温精度的测量指标。

图6是OPLC进行导体温度、负载电流和光功率综合实时测量的原理图。通过该实验研究OPLC导线

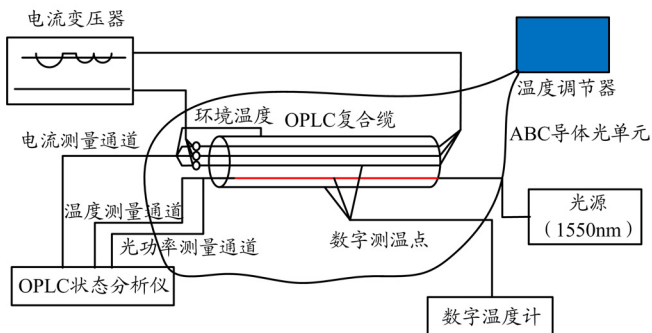


图6 实验装置原理图

温度、内嵌的光纤光功率随负荷电流、环境温度的变化规律,研究电缆运行温度对电缆热老化等状态的影响。在实验中,我们选取OPLC较为合适的点(一般选取所截取电缆的中心位置和两端的位置3个测量点,尽量减小误差)进行测量,用数字温度计测量电缆表面,它的采样频率很高(达到100ms以上),因此电缆的表面温度的稳定时间可以近似忽略。同时我们也对电缆表面对应的光纤位置进行温度测量,通过OPLC状态检测仪的温度测量通道获得光纤的温度,电缆内的光纤温度的稳定时间如同电缆表面一样,可以近似忽略不计。在实验中,我们记录了OPLC从 25°C 升温到 35°C 所需要的时间大约是30min左右。实验实物图如图7所示,测量得到的OPLC运行状态数据如表2所示。



图7 实验实物图

从表2可以看出,OPLC状态监测装置在测温精度上实现了 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的测量要求。在OPLC运行过程中,随着负荷电流的变化,OPLC的运行温度也相应变动。OPLC的线芯温度与电缆表面的温度不相同,这是由于电缆的传热特性,温度由内到外逐渐降低。电缆外护套的温度较低,铜导体的温度较高,也证明了对O-

表 2 测量得到的 OPLC 运行状态数据

升温 电流(A)	稳定后 表面温度(℃)	光纤 测温数值(℃)	光纤 损耗(dB)
67.5	26	26.5	-7.8
90	29	32	-7.8
112.5	30	34.5	-7.8
135	36	43	-7.78
157.5	41	51	-7.78
180	44	56	-7.78
202.5	48	67	-7.76
225	59	80	-7.75

PLC 内部纤芯温度测量的方式能更好地监测电缆的温度运行情况, 所以该优化测温系统能更好地实时在线测量电缆的温度和故障, 对于电缆的保护起到更加显著的作用。

3 结束语

本文研究了分布式喇曼测温系统的温度解调和数据处理技术, 在 OPLC 状态监测和运行状态评估系统的面向单模光纤的分布式喇曼测温模块中, 提出了温度解调优化和数据处理优化技术, 使该系统进一步实现了温度精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的在线实时测量目标。通过试验验证 OPLC 内部纤芯的温度测量方式能更好监测电缆的温度运行情况, 对电缆保护起到更加显著的作用。该技术对电力光纤到户的进展工作起到重要的作用, 并在推动智能电网建设的道路上扮演了重要角色。

参考文献:

- [1] 张旭苹, 武剑灵, 单媛媛, 等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J]. 光电子技术, 2017, 37(4): 221-229.
- [2] 余鹏, 段绍辉, 周正仙, 等. 光纤传感技术在电力电缆中的研究进展[J]. 光通信技术, 2013, 37(11): 42-44.

- [3] 佟显义, 宋丽萍. 光纤高温传感器研究现状及应用前景[J]. 光通信技术, 2014, 38(10): 8-10.
- [4] ZHANG Xuping, QIAO Weiyan, DAN Yuanyuan, et al. A distributed optical fiber sensing system for synchronous vibration and loss measurement[J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(5): 375-378.
- [5] 费芹. 基于拉曼散射的分布式光纤测温系统的设计与优化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [6] 宋牟平, 鲍翀, 叶险峰. 采用 Simplex 编码光外调制的拉曼散射分布式光纤传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1462-1466.
- [7] 陈福昌, 戴杰, 余超群, 等. 光纤环校正双端探测分布式拉曼光纤传感系统[J]. 光电工程, 2016, 43(8): 33-38.
- [8] 艾幕. 基于拉曼散射的光纤测温系统的改进与优化[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [9] XU Pengbai, DONG Yongkang, ZHOU Dengwang, et al. 1200 $^\circ\text{C}$ high-temperature distributed optical fiber sensing using Brillouin optical time domain analysis[J]. Applied optics, 2016, 55(21): 5471-5478.
- [10] 王春丽, 张春蕾. 分布式光纤温度传感系统测温精度的提高[J]. 光通信技术, 2014, 38(11): 8-10.
- [11] 孙柏宁. 分布式拉曼光纤温度传感系统的噪声分析及优化 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [12] HE Jianping, ZHOU Zhi, OU Jinping. Simultaneous measurement of strain and temperature using a hybrid local and distributed optical fiber sensing system[J]. Measurement, 2014, 47(1): 698-706.
- [13] CHEN Chi, CHEN Rong, WEI Fang. Experimental and application of spiral distributed optical fiber sensors based on OTDR [C]// 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, ICE-ICE 2011-Proceedings, April 15-17, 2011, Wuhan, China. Wuhan: IEEE Computer Society, 2011.
- [14] YANG Xiaojun, ZHU Xiaofei, DENG Chi, et al. Application of distributed optical fiber sensing technologies to the monitoring of leakage and abnormal disturbance of oil pipeline[C]//Applied Optics and Photonics China: Fiber Optic Sensing and Optical Communications, AOPC 2017, June 4-6, 2017, Beijing, China. Beijing: SPIE, 2017.
- [15] 龚昌来. 基于小波变换和均值滤波的图像去噪方法 [J]. 光电工程, 2007, 34(1): 72-75.

《光通信技术》加入 OSID 开放学科计划

本刊自 2018 年 9 月 3 日起加入 OSID(Open Science Identity)开放科学计划。通过在期刊每篇文章上添加 OSID 开放科学(资源服务)标识码, 可以使论文成果更加立体化展现, 增强论文质量, 促进传播与交流; 使作者获得直接拓展学术人脉的渠道, 并为作者与研究同领域课题的学者交流互动提供途径。操作流程如下: 作者在收到电子版稿件录用通知时, 编辑部会为每篇录用的文章创建一个 OSID 码, 作者根据邮件说明通过微信注册 OSID 帐号、录制并上传 1~5 段(每段时长 1 分钟)的语音到 OSID 码中, 这样, 全世界都能听到您的声音!

《光通信技术》编辑部