

基于 DSP 的分布式测温系统^①

向 进¹, 刘波峰¹, 李 亚²

¹(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

²(湖南工程学院 电气信息学院, 湘潭 411104)

摘 要: 分布式光纤测温系统具有本质安全、抗电磁干扰能力强、快速多点测量和定位、易于安装等特点。提出了以 DSP 为核心的分布式测温系统, 并针对拉曼散射温度信号完全淹没在噪声之中的特点, 采用一种改进的小波阈值函数和阈值选取方法来对拉曼散射温度信号进行去噪。仿真实验表明, 改进阈值函数的小波去噪有效地提高了去噪效果, 从而提高了分布式光纤测温系统的精度并简化了系统结构。

关键词: 分布式测温; DSP; 拉曼散射; 小波去噪; 能量熵

Fiber Optic Distributed Temperature Measurement System Based on DSP

XIANG Jin¹, LIU Bo-Feng¹, LI Ya²

¹(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

²(College of Electrical Information, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

Abstract: Distributed fiber optic temperature measurement system has the characteristics of intrinsic safety, strong anti-electromagnetic interference capability, fast multi-points measurement and positioning, easy to install and so on. This paper introduces a distributed temperature measurement system based on DSP. Because the Raman scattering signal including temperature information is completely submerged in noise. We pick up an improved threshold function and threshold selection method to denoise the Raman scattering signal. Simulation results show that the improved wavelet denoising threshold function can effectively improve the noise reduction effect, improve the accuracy of the distributed fiber optic temperature measurement system, and simplify the system structure.

Key words: distributed temperature measurement; DSP; raman scattering; wavelet denoising; energy entropy

分布式光纤测温系统是一种基于光时域反射(OTDR)来实现实时测量空间温度场分布的传感器系统。其测温原理之一是利用光纤后向拉曼散射光谱的温度效应来测量光纤所在的温度场信息, 并利用光纤的光时域反射技术对测量点进行定位。由于系统具有本质安全、抗电磁干扰能力强、能够快速多点测量并定位、易于安装等优点, 在实时检测温度场的空间连续分布的应用中受到重视, 并获得了广泛应用^[1,2]。系统工作过程是通过获取拉曼散射中反斯托克斯与斯托克斯光, 并取反斯托克斯与斯托克斯光强的比值作为温度的传感信号, 对传感信号进行数字信号处理, 通过温度信息的解调, 完成对待测温度场的温度测量。

现一般都采用高速瞬态记录仪或高速数据采集卡与计算机相结合的方式来实现数据采集与处理^[3]。并且由于拉曼散射光中携带温度信息的反斯托克斯光信号相当微弱, 在光纤中传输时, 会引入因介质不均匀和背向散射效应而产生的光噪声。此外, 在光电转换和放大的过程中会引入随机噪声, 使得本来十分微弱的携带温度信息的反斯托克斯信号被完全淹没在噪声中。因此, 微弱的反斯托克斯光信号去噪处理也成为分布式温度测量系统的一个重要部分。

本文采用德州仪器的 TMS320C5000 系列的 DSP 作为信号处理的核心单元, 并给出了改进的小波阈值函数来实现信号去噪。

① 收稿时间:2011-01-18;收到修改稿时间:2011-02-26

1 分布式光纤测温系统测温原理

1.1 分布式测温系统

分布式光纤测温系统^[4]如图 1 所示, 主要由传感光纤、耦合器、激光二极管、光学滤波器、光电接收与放大器件、信号采集与处理系统等单元组成。半导体激光器发出一系列光脉冲, 经过光纤耦合器进入光纤, 来自被测光纤的背向拉曼散射光经过光学滤波器, 分别滤出斯托克斯光和反斯托克斯光, 再送到雪崩光电二极管 APD 转换为电信号, 光电信号经过放大后, 通过高速 A/D 进行转换送入信号处理单元进行处理, 并得到与光电信号对应的温度信息。

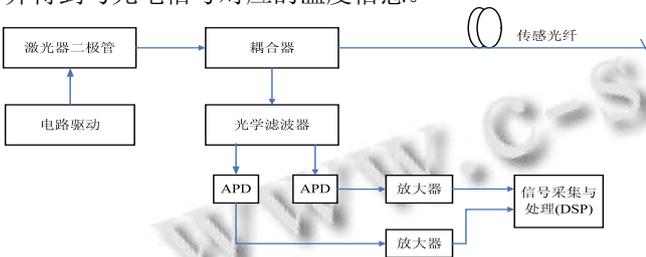


图 1 分布式拉曼散射光纤测温系统

1.2 分布式测温原理

当光波通过光纤时, 光纤中的光学光子和光学声子发生非弹性碰撞, 产生拉曼散射过程。在光谱图上, 拉曼散射频谱具有两条谱线, 分别分布在入射光谱线的两侧。其中, 波长大于入射光的为斯托克斯光, 波长小于入射光的为反斯托克斯光。在自发拉曼散射中, 斯托克斯光与反斯托克斯光的强度比和温度存在一定的关系, 可由下式表示^[5]。

$$R(T) = \frac{I_{as}(T)}{I_s(T)} = \left(\frac{\lambda_{as}}{\lambda_s}\right)^4 e^{\frac{hc\nu_0}{kT}} \quad (1)$$

式中, $I_{as}(T)$ 和 $I_s(T)$ 分别为反斯托克斯和斯托克斯光的光强, $h(J \cdot s)$ 为普朗克常数; c 为真空中的光速; $\nu_0(m^{-1})$ 为入射光频率; $k(JPK)$ 为玻尔兹曼常数; $T(K)$ 为绝对温度值。

由于上式可以看出, 自发拉曼散射光中斯托克斯光与反斯托克斯光的光强之比, 仅与介质处温度有关, 于注入光源的功率等其他条件无关。

2 DSP信号处理及实现

2.1 数字信号处理实现

由于系统采集到的数据含有很强的噪声, 因此信

号的去噪显得尤为重要。目前, 小波阈值去噪在信号去噪中得到了广泛研究并获得了非常好的效果, 成为信号去噪的主要方法之一。更由于 DSP 强大的数字信号处理功能, 使我们可以通过模块化软件编程来实现信号的去噪。数字信号处理模块可以分为小波分解、系数处理、小波重构三个模块。

Mallat 算法^[6]实现了小波分解和重构, 由于 $L^2(R) = \oplus_{j \in Z} W_j$, 所以对任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 有 $f(t) = \sum_{j,k \in Z} c_k^j \psi_{j,k}(t)$ 。

对于 $L^2(R)$ 中的任意子空间 V_j , 有

$$V_j = V_{j-1} \oplus W_{j-1} = V_{j-2} \oplus W_{j-2} \oplus W_{j-1} = \dots = V_M \oplus W_M \oplus \dots \oplus W_{j-1} (M < j) \quad (2)$$

因此, V_j 中的任意函数 f_j 都存在若下多分辨率表示:

$$f_j = f_{j-1} \oplus d_{j-1} = f_{j-2} \oplus d_{j-2} \oplus d_{j-1} = \dots = f_M \oplus d_M \oplus \dots \oplus d_{j-1} \quad (3)$$

其中:

$$f_l(t) = \sum_k c_k^l \phi_{l,k}(t) \in V_l, l = M, \dots, j \quad (4)$$

$$d_l(t) = \sum_k d_k^l \psi_{l,k}(t) \in W_l, l = M, \dots, j-1 \quad (5)$$

$f_l(t)$ 表示 f_j 的低频成分, 而 $d_l(t)$ 表示 f_j 在不同分辨率下的高频成分。

由下式

$$f_j(t) = \sum_k c_k^j \phi_{j,k}(t) = \sum_k c_k^{j-1} \phi_{j-1,k}(t) + \sum_k d_k^{j-1} \psi_{j-1,k}(t) \quad (6)$$

和 ϕ, ψ 及其二进平移和伸缩的正交性, 可得

$$f(t) = \sum_{j,k \in Z} \langle f, \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(t) \quad (7)$$

$$d_k^{j-1} = \sum_n c_n^j g_{n-2k}^* \quad (8)$$

$$c_k^j = \sum_n c_n^{j-1} h_{k-2n} + \sum_n d_n^{j-1} g_{k-2n} \quad (9)$$

其中 $\{h_k\}_{k \in Z}$ 可以看成低通滤波器, $\{g_k\}_{k \in Z}$ 可以看成高通滤波器。令 $c^j = \{c_k^j\}_{k \in Z}$ 、 $c^{j-1} = \{c_k^{j-1}\}_{k \in Z}$ 、 $d^{j-1} = \{d_k^{j-1}\}_{k \in Z}$, 则 c^{j-1} 和 d^{j-1} 可分别看成 c^j 的低频信号和细节信号。式 (7)、(8) 为小波分解算法, 式 (9) 为小波重构算法, 合起来就构成了 Mallat 算法。

2.2 改进小波阈值函数

小波函数去噪法主要可分为三个步骤^[7]:

1) 小波分解: 选择合适的小波和分解层数, 对含

噪信号进行小波变换, 得到小波系数 $w_{j,k}$ 。

2) 系数处理: 对小波系数 $w_{j,k}$ 根据阈值函数和阈值做阈值量化处理, 得到新的小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 。

3) 信号重构: 利用小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 进行小波重构, 得到去噪后的信号。目前, 系数处理方法中的阈值函数包括硬阈值、软阈值等。它们的定义式如下:

硬阈值函数:

$$\eta(w_{j,k}, \delta_j) = \begin{cases} w_{j,k}, (|w_{j,k}| \geq \delta_j) \\ 0, (|w_{j,k}| < \delta_j) \end{cases} \quad (10)$$

软阈值函数:

$$\eta(w_{j,k}, \delta_j) = \begin{cases} \text{sgn}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \delta_j), (|w_{j,k}| \geq \delta_j) \\ 0, (|w_{j,k}| < \delta_j) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, $k \in N$ 为调整系数, δ_j 为阈值, 它通常采用 Donoho 等提出的基于 SURE 法估计的小波阈值, 取值公式为:

$$\delta_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln(N_j)} \quad (12)$$

式中, N_j 为小波尺度 j 的小波系数长度, σ_j 为小波尺度 j 层噪声的标准方差, 由 $\text{median}(|w_{j,k}|) / q$ 估算, $\text{median}(\cdot)$ 表示取中值, q 为经验系数, 一般取 0.6745。

相比硬阈值, 软阈值估计得到的小波系数整体连续性要好, 但当 $w_{j,k} \geq \delta_j$ 时, 它与系数 $w_{j,k}$ 总存在恒定的偏差, 直接影响着重构信号和真实信号的逼近程度。硬阈值函数在 $\pm \delta_j$ 处是不连续的, 很容易产生 Pseudo-Gibbs 现象, 利用小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 重构的信号可能会产生附加振荡。

为了克服软硬阈值函数的缺点, 本文采用一种改进的阈值函数^[8], 它的表达式如下:

$$\hat{w}_{j,k} = \eta(w_{j,k}, \delta_j) = \begin{cases} \beta_j \cdot (w_{j,k} - \text{sgn}(w_{j,k}) \cdot \delta_j), (|w_{j,k}| > \delta_j) \\ 0, (|w_{j,k}| < \delta_j) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, δ_j 为阈值, β_j 为折中系数,

$\beta_j = \frac{\max_j(|w_{j,k}|)}{\max_j(|w_{j,k}|) - \delta_j}$, 新函数具备了连续性好、偏差小、

简便可行等优势。

若阈值选的过小, 去噪后仍留有噪声, 但阈值选的太大, 重要的有用信号特征会被滤掉, 从而引起偏差。因此, 为了克服上述缺点, 本文采用新的阈值选

取公式, 它随小波尺度的增加而逐步减小, 即:

$$\delta_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln(N_j)} \cdot (1 + 2^{-j}) \quad (14)$$

式中, N_j 为小波尺度 j 的小波系数长度, σ_j 为小波尺度 j 层噪声的标准方差, 它的传统计算方法多包含着经验系数, 带有着较大的主观性。由于噪声成分最多的数据区间具备和小波尺度 j 层噪声相近的特征信息, 因此采用该数据区间的标准方差作为 σ_j 的取值是合适的。

噪声成分最多的数据区间具有能量分布最均匀的特点, 而小波能量熵对信号时频上的能量分布特性具备定量描述的优点, 它的定义式如下:

$$\begin{cases} H_w = \sum_i -p \ln p \\ p_i = \frac{E_i}{\sum_i E_i} \end{cases} \quad (15)$$

式中, E_i 为尺度 i 时小波系数的能量。小波能量熵值越大, 相应信号的能量分布越平均, 噪声成分最多的数据区间所对应的小波能量熵将会在所有的数据区间中取到最大值。

3 仿真实验与讨论

为了考察改进阈值算法去噪的有用性和优越性, 现分别采用硬阈值、软阈值和改进阈值函数来对含有高斯白噪声信号进行去噪并作对比分析。去噪效果优劣的衡量指标是:

$$1) \text{ 方差误差 } \varepsilon = \frac{|D_1 - D_2|}{D_1}, \quad D_1、D_2 \text{ 分别为无噪信号和去噪信号的方差, } D_1、D_2 \text{ 越接近, 则 } \varepsilon \text{ 越小, 说明去噪效果越好。}$$

2) 去噪信号信噪比 $R_{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\|x_0(t)\|^2}{\|x_0(t) - x(t)\|^2}$,

$$x(t)、x_0(t) \text{ 分别为无噪信号和去噪信号, } R_{SNR} \text{ 越大, 则说明去噪效果越好。}$$

去噪实验在 MATLAB 仿真环境下进行^[9], 仿真实验中, 采用 sym8 小波函数对信号进行分解, 分解层数定为 5, 仿真信号的采样频率为 10MHz, 采样数为 2048。软、硬阈值函数的阈值选取根据基于 SURE 的阈值选取规则得到。仿真结果如图 3 所示。

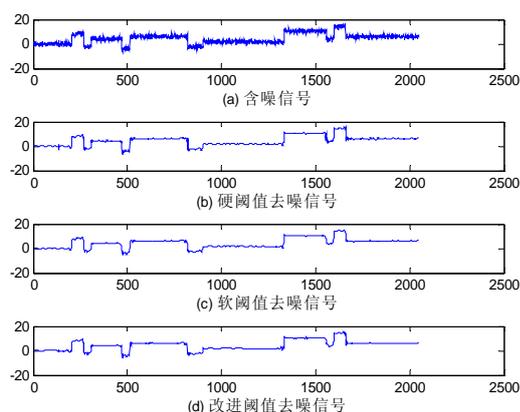


图3 三种去噪方法的仿真实验结果

根据去噪优劣效果指标得到三种小波阈值函数对含噪信号的去噪效果如表1所示:

表1 三种小波阈值函数对信号的去噪效果

| | 硬阈值函数 | 软阈值函数 | 改进阈值函数 |
|---------------|---------|---------|---------|
| ε | 0.0152 | 0.0102 | 0.0088 |
| RSNR | 21.3138 | 21.6795 | 22.7131 |

表中数据是根据去噪效果优劣指标给出的方差误差和去噪信号信噪比定义在 MATLAB 中计算得到,在方差误差 ε 极小准则和信噪比 R_{SNR} 极大准则下,可以看到改进阈值函数的小波去噪效果比软硬阈值函数的小波去噪效果要好。因此,改进小波阈值函数的去噪是有效的。

4 结论

本文采用 DSP 作为信号处理单元,采用改进的小波阈值函数对信号进行去噪处理,通过对比软、硬阈

值函数,仿真结果表明改进阈值函数的小波去噪能够提高去噪效果,为提高温度信息的准确度提供了保障,更加满足分布式测温系统的要求。随着 DSP 器件的飞速发展,以及新的信号处理方法的应用,将会大大简化系统的结构,提高系统的空间分辨率和温度分辨率。

参考文献

- 江毅.高级光纤传感技术.北京:科学出版社,2009.292-295.
- Adachi S. Distributed Optical Fiber Sensors and Their Applications. IEEE, SICE Annual Conference, 2008. 329-333.
- 戚风云,赵乐军,周又玲.基于 DSP 的分布式光纤测温系统及高速数据采集与处理.今日电子,2005,7:68-70.
- Lee C, Suh K, Landry T. The Implementation of Self Calibration Techniques in Raman Backscatter based Fiber Optic Distributed Temperature System (DTS) Technology. IEEE, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008.1-6.
- 黎敏,廖延彪.光纤传感器及其应用技术.武汉:武汉大学出版社,2008.156-157.
- 孙延奎.小波分析及其应用.北京:机械工业出版社,2005. 52-53.
- 胡广书.现代信号处理教程.北京:清华大学出版社, 2004. 397-345.
- 张斌,王彤,谷传纲,戴正元.改进的小波阈值消噪法在湍流信号处理中的应用.工程热物理学报,2009,30(3):401-407.
- 张德丰. Matlab 小波分析与工程应用.北京:国防工业出版社,2008.186-214.
- 滕召胜,等.基于数据融合的某产品热处理温度测量控制系统.兵工学报,2000,21(2):145-148.
- 项新建.基于多传感器数据融合的粮食仓库温度监测系统.仪器仪表学报,2003,24(5):525-527.
- 吴芳慈,罗安,等.一种引入电量预测与竞争因子的电耗奖惩方法.电工电能新技术,2010,29(3):58-62.

(上接第181页)

- 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用.第三版.北京:科学出版社,2004.
- 王天营,沈菊华.样本数据缺失的灰色补救方法.统计与决策,2008,22:7-10.
- 杨国胜,等.数据融合及其应用.北京:兵器工业出版社, 2004.1-11.
- 万树平.多传感器数据的聚类融合方法.系统工程理论与实