

五点中心波长算法在 FBG 测温系统中的应用

薛敬振¹, 袁嫣红¹, 袁海骏²

(1. 浙江理工大学教育部现代纺织装备技术工程研究中心, 杭州 310018; 2. 上海舜宇海逸光电技术有限公司, 上海 201203)

摘 要: 介绍了五点中心波长算法的基本原理; 基于 Labview 虚拟仪器开发平台, 结合 TLS 调谐激光器可编程控制的特点, 将五点中心波长算法应用到光纤布拉格光栅 (FBG) 测温系统中; 并将使用五点中心波长算法和高斯拟合算法得到的测试结果进行比较和分析。结果表明: 在合适的步长扫描方式下, 五点中心波长算法和高斯拟合算法均具有较高的温度分辨率, 但是五点中心波长算法具有更快的计算速度, 可以更好地保证 FBG 测温系统的响应速度。

关键词: 光纤布拉格光栅; 五点中心波长算法; Labview; 温度测量

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

0 引 言

光纤光栅具有抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高、耐高温、易复用等特点, 可实现温度、压力、位移、速度、电场等诸多物理量的测量^[1]。光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器通过光栅反射光的中心波长偏移来感知外界应力或温度的变化, 因此高精度的光栅反射光中心波长检测方法能够提高 FBG 传感器的工作性能。在实际工程应用中, 由 FBG 反射光转化来的反射谱时常夹带着干扰信号, 这给光栅反射光中心波长的检测带来了困扰^[2]。

对采集到的光谱信号进行数字滤波处理可以提高中心波长检测精度, 常见的滤波算法有蒙特卡罗 (Monte Carlo) 算法^[3]、二次差值数值微分法^[4]、多项式-高斯公式拟合法^[5]、高斯拟合算法^[6], 其中高斯拟合算法的误差最小^[7]。但是高斯拟合算法耗时较长, 为提高系统响应速度, 本文提出了一种新的中心波长计算方法, 即五点中心波长算法。大量实验数据表明应用于 FBG 测温系统时, 五点中心波长算法具有较高的温度分辨率, 不仅可以保证系统高的测温精度, 而且能够显著改善系统的响应速度。

1 五点中心波长算法的基本原理

五点中心波长算法与 Labview^[8] 平台相结合, 采用五点两线拟合算法来精确求取采集谱的中心波长相对于标准谱中心波长的偏移量, 其基本原理如下。

a) 每当 TLS 调谐激光器发送一个包含波长信息的脉冲, 处理器采集一次电压数据时, 标准谱和采集谱均是由代表波长的步数 (波长等于步数与扫描步长的乘积) 与电压幅值表征的离散曲线。

b) 对标准谱归一化处理, 得到的表达式:

$$Y_0(i) = \frac{f_0(i)}{\sqrt{f_0^2(i_1) + f_0^2(i_2) + \dots + f_0^2(i_n)}} \quad (1)$$

式中, $Y_0(i)$ 为标准谱归一化后各点对应的幅值; $f_0(i)$ 为标准谱中各点对应的电压幅值; $f_0(i_n)$ 为步数为 n 的点电压幅值。求出电压幅值最大的点对应的步数, 记作 I_0 。对采集谱归一化处理, 得到表达式:

$$Y_1(j) = \frac{f_1(j)}{\sqrt{f_1^2(j_1) + f_1^2(j_2) + \dots + f_1^2(j_n)}} \quad (2)$$

式中, $Y_0(j)$ 为采集谱归一化后各点对应的幅值; $f_1(j)$ 为标准谱中各点对应的电压幅值; $f_1(j_n)$

为步数为 n 的点电压幅值。求出电压幅值最大的点对应的步数, 记作 J_0 。但是, 因为两条曲线是离散的, 所以 I_0 和 J_0 不一定恰好是中心波长的位置, 并且调谐扫描步长越大, I_0 和 J_0 与中心波长的偏差就可能越大。

c) 理论上, 当因离散引起的中心波长偏差越小时, 曲线 $Y_1(j)$ 沿横坐标移动 $(I_0 - J_0)$ 距离后, 与曲线 $Y_0(i)$ 的重合度就会越好。以移动后的两曲线各对应点差的绝对值之和表示其重合偏差, 得表达式:

$$\delta = \sum_{m=0}^n |Y_2(j_m) - Y_0(i_m)| \quad (3)$$

式中, δ 为采集谱和标准谱的重合偏差; $Y_2(j_m)$ 为采集谱归一化并沿横坐标移动一定距离后, 步数为 m 的点对应的幅值; $Y_0(i_m)$ 为标准谱归一化后, 步数为 m 的点对应的幅值。由于标准谱和采集谱中心波长的偏差肯定在正负一个步长之内, 故两谱中心波长的偏移量肯定在 $(I_0 - J_0)$ 的左右两个步长之内。

d) 为求出精确的中心波长偏移量, 构造一曲线, 该曲线上点的横坐标为中心波长偏移量, 纵坐标为对应此偏移量时采集谱和标准谱的重合偏差。按照五点中心波长算法实现流程中的方法找出曲线中重合偏差最接近零的五点。如果将重合偏差最小点的横坐标记作零, 那么这五点分别为 $A_1(-2, a_1)$ 、 $A_2(-1, a_2)$ 、 $A_3(0, a_3)$ 、 $A_4(1, a_4)$ 、 $A_5(2, a_5)$, 分布如图1所示。用五点算法精确定位中心波长偏移量的过程如下:

用点 A_1 、 A_2 、 A_3 及 (x, y) 共线条件近似定位点 (x, y) , 得:

$$\frac{y - a_3}{x} = a_2 - a_1 \quad (4)$$

用点 A_4 、 A_5 及 (x, y) 共线条件近似定位点 (x, y) , 得:

$$\frac{y - a_4}{x - 1} = a_5 - a_4 \quad (5)$$

对公式(4)和(5)化简可得:

$$x = \frac{2a_4 - (a_3 + a_5)}{(a_2 - a_1) + (a_5 - a_4)} \quad (6)$$

最终得到中心波长偏移量为:

$$X_{\text{偏移}} = (5 - \text{delta} - n - x) \times s \quad (7)$$

式中, $X_{\text{偏移}}$ 为中心波长偏移量; $\text{delta} = I_0 - J_0$; n 为五点中心波长算法的实现流程中跳变点对应的步数; $(5 - \text{delta} - n - x)$ 为采集谱沿横坐标平移的步数; s 为扫描步长。

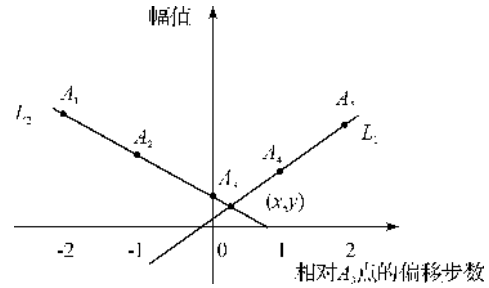


图1 五点定位中心波长偏移量

e) 五点中心波长算法的实现流程如图2所示。

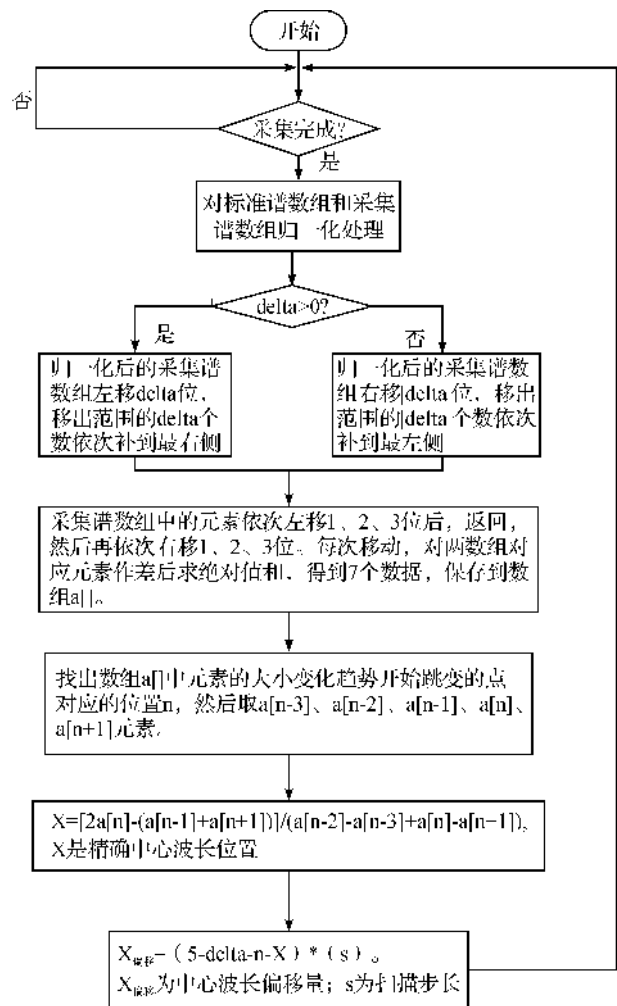


图2 五点中心波长算法的实现流程

2 五点中心波长算法在FBG测温系统中的实现

2.1 FBG测温系统及配置

为对比五点中心波长算法与高斯拟合^[9]算法的优缺点, 使用了如图3所示FBG测温系统。该系统主要包括 TLS 调谐激光器、光纤光栅、光电转换模块、数据模块系统及 PC 机等。TLS 调谐激光器由

数据处理模块控制,其步长可调,主要任务是对FBG进行周期性地波长扫描。光电探测模块主要由光电二极管和运算放大器组成;主要任务是将FBG的反射光转化为可测量的电压信号(mV数量

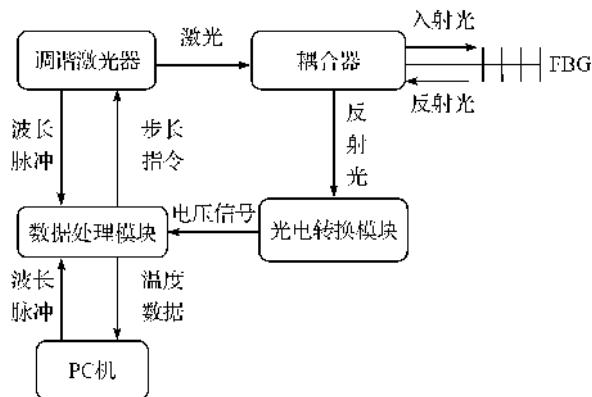


图3 FBG测温系统

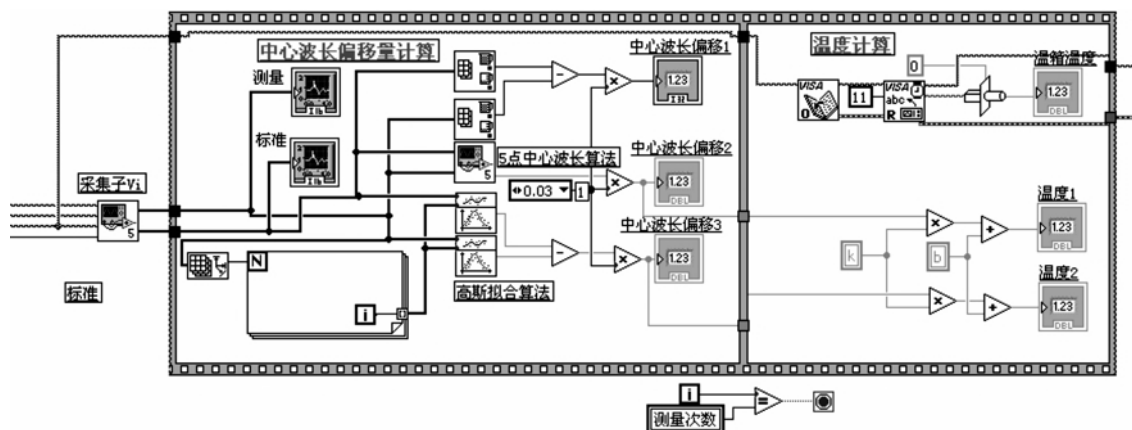


图4 中心波长偏移量及温度计算流程

在0.01、0.03、0.05 nm步长扫描方式下,得到的FBG反射光谱如图5、图6及图7所示,不同算法下测得中心波长偏移量如表1所示。为进一步比较两种算法的测温精度,在扫描步长为0.01 nm,温控箱运行在10~40℃情况下,计算温度的公式如下:

$$T = kx + b \quad (8)$$

式中, T 为待测温度; x 为中心波长偏移量; k (1.063 8℃/0.01 nm)为本系统选定光纤光栅的温度灵敏度系数; b (24℃)为系统选定的参考温度。将系统测得温度与温控箱温度做差,得到的温度误差分布如图8所示。

3 实验结果及分析

a) 当扫描步长由0.01 nm增到0.05 nm时,如图5—图7,系统响应速度加倍,但系统的温度分辨率($\frac{s}{k}$)从约为1℃降到了约为5℃,FBG反射谱上

级以上)。数据处理模块主要由100 kHz的A/D转换器和最高主频为150 MHz的TMS320F28335处理器组成,主要任务是计算中心波长偏移量及温度数据。调谐激光器与数据处理系统、数据处理系统与PC机及温箱与PC机间均使用波特率为115 200 b/s的串口进行通信。

2.2 中心波长偏移量及温度的计算

为降低光路和电路干扰造成的影响,系统采用多次采样求算术平均值的采集方法。如图4所示,Labview调用采集子Vi将反射谱采集点读到PC机。Labview调用最大值与最小值函数来查找标准功率谱和采集功率谱的中心波长,求差得到中心波长偏移量1;调用5点中心波长算法子Vi得到中心波长偏移量2;调用高斯曲线拟合函数来计算标准谱和反射谱的中心波长,求差得到中心波长偏移量3;应用while循环控制计算次数。

点的个数由150降到了30,增加了精确定位中心波长的难度。尤其是扫描步长较大时,高斯拟合算法和五点中心波长算法也难以消除调谐扫描步长引起的中心波长偏差,所以,研究五点中心波算法时需选用尽量小的扫描步长。

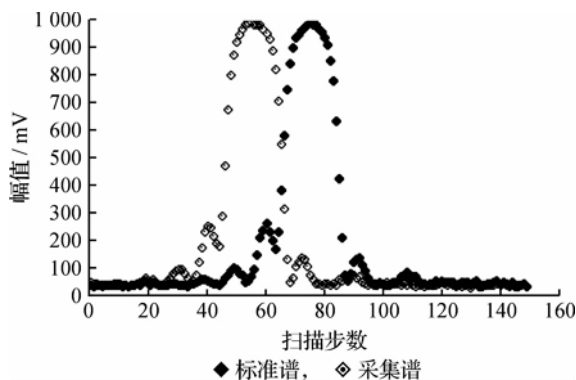


图5 步长为0.01 nm反射光谱

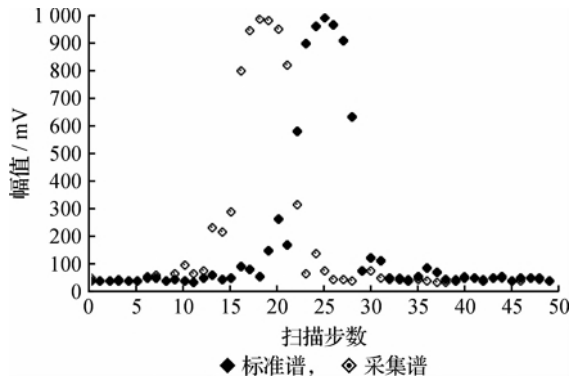


图 6 步长为 0.03 nm 反射光谱

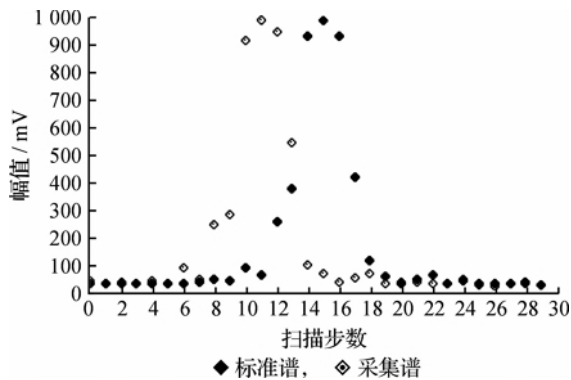


图 7 步长为 0.05 nm 反射光谱

b) 在 0.01 nm 步长扫描方式下, TLS 调谐激光器的温度分辨率为 $s \times k$, 约是 1°C , 从表 1 可知, 五点中心波长算法及高斯拟合算法得到的中心波长分辨率精度可达 0.004 4 或 0.004 9 nm, 对应温度分辨率为 $0.004 4 \times k \sim 0.004 9 \times k$, 约是 0.5°C 左右。理论上, 如果选用更小的扫描步长, 五点中心算法及高斯拟合算法的温度分辨率会更高。所以, 在合适的步长扫描方式下, 与高斯拟合算法相比, 五点中心波长算法也可以保证系统较高的温度分辨率。

表 1 三种算法得到的中心波长偏移量 nm

步长	偏移量 1	偏移量 2	偏移量 3
0.01	-0.2	-0.194 967	-0.194 472
0.03	-0.21	-0.194 833	-0.193 973
0.05	-0.2	-0.192 605	-0.191 405

c) 由图 8 可知, 在 0.01 nm 的扫描步长下, 五点中心波长算法及高斯拟合算法都可将温度误差控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之内, 但是五点中心波长算法可适当减少标准谱和采集谱中点的个数, 并且经一次调用就可得出中心波长偏移量, 可以显著提高 FBG 测温系统响应速度。

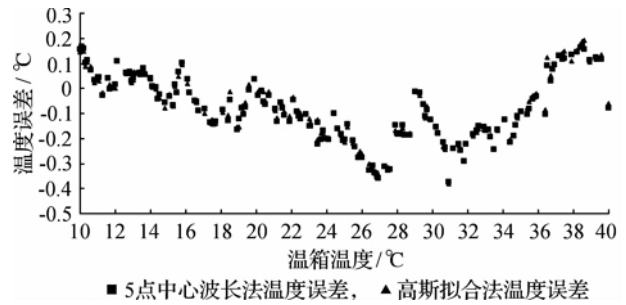


图 8 温度误差分布

4 结束语

本文借助 Labview 编程技术, 简单有效地将五点中心波长算法和高斯拟合算法应用到 FBG 测温系统中。测试结果表明, 选用合适的解调步长, 五点中心波长算法及高斯拟合算法均可提高温度分辨率, 但是在确保测温精度的前提下, 五点中心波长算法比高斯拟合算法具有更快的计算速度, 有利于改善系统响应速度。

参考文献:

- [1] 杨 兴, 胡建明, 戴特力. 光纤光栅传感器的原理及应用研究[J]. 重庆师范大学学报, 2009, 26(4): 101-105.
- [2] 尚秋峰, 林炳花. 光纤 Bragg 光栅传感系统典型寻峰算法的比较分析[J]. 电测与仪表, 2010, 47(2): 1-4.
- [3] Andreas Othonos, Kyriacos Kalli. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing [M]. Boston: Artech House Publishers, 1999, 26(3): 291-317.
- [4] 徐士良. 数值分析与算法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 235-238.
- [5] 邹喜华, 潘 炜, 罗 斌, 等. 非啁啾取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的分析[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 971-976.
- [6] 王福明, 贺正辉, 索 瑾. 应用数值计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 237-239.
- [7] 朱浩瀚, 秦海琨, 张 敏, 等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 893-897.
- [8] 胡立微, 杨俊华, 武金玲. 基于虚拟仪器技术的光纤测温系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2006, 27(3): 23-24.
- [9] 吴付岗, 张庆山, 姜德生. 光纤光栅 Bragg 波长的高斯曲线拟合求法[J]. 武汉理工学报, 2007, 29(12): 116-118.

Application of Five-Point Central Wavelength Algorithm in FBG Temperature Measurement System

XUE Jing-zhen¹, YUAN Yan-hong¹, YUAN Hai-jun²

- (1. Modern Textile Equipment and Technology Engineering Research Center, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. 3S Hi-Technologies Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: This paper introduces the fundamental principles of five-point central wavelength algorithm, applies it in fiber bragg grating(FBG) temperature measurement system based on Labview virtual instrument development platform in combination with the characteristic of programmable control of TLS tuned laser, and compares and analyzes test results obtained by five-point central wavelength algorithm and Gaussian fitting algorithm. The result shows that, with the appropriate step scanning method, five-point central wavelength algorithm and Gaussian fitting algorithm have a high temperature resolution, but the former has faster computation speed and can better ensure the response speed of FBG temperature measurement system.

Key words: fiber bragg grating(FBG); five-point central wavelength algorithm; Labview; temperature measurement

(责任编辑: 张祖尧)

(上接第 692 页)

Signal Processing Method of Laser Circular Polarization Interference Nanometer Displacement Measurement

ZHANG Miao-ling, YAN Li-ping, LOU Ying-tian, LIU Yan-na, CHEN Ben-yong

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper introduces the light path structure of laser circular polarization interference nanometer displacement measuring system of; puts forward interference fringe processing method based on sine and cosine signal switching in allusion to A/D error and displacement error introduced by dc noise so as to improve the measuring accuracy; designs laser circular polarization interference nanometer displacement measuring system based on FPGA and DSP architecture. FPGA is mainly used for signal acquisition, large number counting and communication with upper computer. DSP is mainly used for small number calculation. The result of displacement experiment shows that, when the step length is 100 nm, within the scope of 0~7 μm , the correlation coefficient of linear fitting of the measuring result is 0.983 6 and standard deviation is 1.88 nm; when the step length is 1 μm , within the scope of 0~15 μm , the correlation coefficient of linear fitting of the measuring result is 0.999 2 and standard deviation is 2.96 nm. It verifies that interference fringe processing method proposed and signal processing system can achieve the requirement of nanoscale displacement measuring accuracy.

Key words: laser circular polarization interferometer; nanometer displacement measurement; signal processing; FPGA and DSP

(责任编辑: 张祖尧)