

·测试与试验·

基于最小二乘法的电力电缆 FBG 传感测温系统

杨广学, 莫 磊

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为了提高电力电缆测温系统的测量精度和速度,提出了以光纤梳状滤波器代替参考光栅提供拟合数据参考点,采用最小二乘法拟合光纤 Bragg 光栅波长和 F-P 可调谐滤波器调谐电压的线性关系,通过 F-P 可调谐滤波器解调 FBG 传感器中心波长变化的方法,完成对电力电缆温度的测量.研究表明,光纤梳状滤波器能够代替多个恒温参考光栅实现波长标定,对反射波长的测量误差 $< 5 \text{ pm}$,温度均方误差 $\leq 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$.

关键词:光纤 Bragg 光栅;最小二乘法;光纤梳状滤波器;电力电缆;F-P 可调谐滤波器

中图分类号:TP212;TN253

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2009)06-0039-04

Fiber Bragg Grating Temperature Sensing System of Power Cables Based on Least Square Method

YANG Guang-xue, MO Lei

(Electrical & Electronic Engineering College, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: To improve the accuracy and speed of the on-line temperature measurement system for power cables, a method for fitting data reference points was proposed, which uses fiber interleaver filter to replace reference-grating. Least square method is utilized to fit linear dependency between bragg wavelength of fiber grating and tuning voltage of Fabry-Perot filter. With wavelength shift that is demodulated by the tunable Fabry-Perot filter, the system realizes temperature measurement of power cables. The result of the research shows that fiber interleaver filter can replace the reference-gratings in thermostatic environment to calibrate the wavelength shift. Error of reflected wavelength is $\pm 5 \text{ pm}$, and mean square error of temperature is $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Key words: fiber bragg gating (FBG); least square method; fiber interleaver filter; power cable; tunable fiber Fabry-Perot filter

现有的电气设备温度在线监测系统,从工作原理上来讲,有电信号传感器和光信号传感器两大类.从使用的角度来讲,由于光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、传感探头设计简单、尺寸小、熔接损耗小、全兼容于光纤、便于构成各种形式的传感网络,实现大面积多点温度测量的特点,因此在电力工业的强磁场环境下,对高压电缆及接头、电气开关柜、大电流接点等易发热部位的温度检测,光纤光栅传感器具有独特的优越性.

典型的 F-P 滤波器光纤 Bragg 光栅波长解调

系统为了克服 F-P 滤波器非线性因素对测量精度的影响,采用多个参考光栅提供的数据,通过拟合算法实现对 FBG 中心波长的标定.这种方法虽然克服了可调谐 F-P 滤波器非线性因素的影响,但是如果继续提高精度那么就要增加更多的参考光栅数量,而采用光栅梳状滤波器代替参考光栅,运用最小二乘曲线拟合算法,不仅运算量小,程序简单易实现,还可以解决由于需要大量参考光栅带来成本和技术实现方面的困难.

收稿日期:2009-10-09

作者简介:杨广学(1956-),男,吉林省德惠人,硕士,副教授,研究方向为光纤通信与光纤传感技术.

1 可调谐 F-P 滤波器的解调原理

光纤 Bragg 光栅传感技术是通过在光纤内部写入的光栅反射或透射波长光谱的检测,实现被测结构温度的测量,只有波长满足 Bragg 条件的光波被 FBG 反射回来,对 FBG 的理论分析和试验研究表明^[1],FBG 的温度灵敏度很小,在 Bragg 波长为 1 500 nm 时,典型的温度灵敏度为 0.011 nm/°C,从而实现了待测温度对反射信号光的波长编码调制。

可调谐 F-P 滤波器检测是典型的光纤 Bragg 光栅波长解调技术之一,由于其具有调谐范围很宽,可以实现多传感器测量,测量仪器体积小、成本适中(典型价格为几万元)等特点,因此在实际工程中得到了广泛的应用。利用可调谐 F-P 滤波器对 FBG 传感器的反射波长进行检测的工作原理如图 1 所示。由宽带光源发出的光经隔离器传送到光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器。满足特定波长条件的光被各个光纤 Bragg 光栅反射后原路返回,经过一个耦合器引入到可调谐 F-P 腔中。给压电陶瓷施加一个锯齿波扫描电压,压电陶瓷产生伸缩,从而改变 F-P 腔的腔长,使得透过 F-P 腔的光的波长发生改变。若 F-P 腔的透射波长与 FBG 的反射波长重合,光电探测器将探测到与各个波长相对应的多个透过峰,通过分析多个透射峰与压电陶瓷驱动电压的对应关系,就可以测得各个光纤光栅的波长。

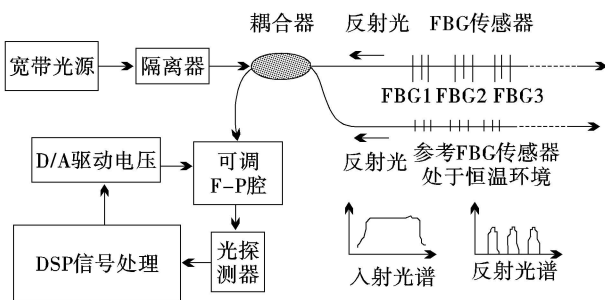


图 1 典型可调谐 F-P 滤波器解调系统

但是,由于光纤光栅的 Bragg 反射波长与压电陶瓷的驱动电压并非线性关系^[2],因此采用拟合曲线的方法实行对 FBG 解调系统中心波长的标定^[3]。系统通过恒温环境内的参考 FBG 串的反射光,检测出参考 FBG 的反射波长和驱动电压的对应数据,通过拟合曲线算法完成 FBG 解调系统中心波

长的标定。

这种方法有效地克服了可调谐 F-P 滤波器非线性因素的影响,通过参考光栅提供的中心波长拟合 F-P 滤波器的传输特性曲线,提高了光纤 Bragg 波长的解调精度,但是如果进一步提高系统的解调精度,就需要增加参考光栅的数量,这样不仅提高了成本,还增加了实际应用中技术上的困难。为了解决参考光栅数目对光纤 Bragg 波长解调精度的限制,提出了一种基于光纤梳状滤波器^[4]的光纤 Bragg 波长解调方法,采用最小二乘拟合算法,这种方法在运算量很小的前提下能够实现 F-P 滤波器传输特性曲线的高精度拟合,有效地提高了系统解调精度,系统实现起来十分方便。

2 利用光纤梳状滤波器实现 FBG 中心波长的标定

2.1 光纤梳状滤波器

光纤梳状滤波器有很多种类,主要应用于 100、200 和 400 GHz 频率间隔的 C 波段波分复用系统中。光纤 Mach-Zehnder 干涉型梳状滤波器具有制作简单、价格低廉等优点,并且可以对已有薄膜型系统进行扩充频道,所以采用光纤 Mach-Zehnder 干涉型梳状滤波器^[5]取代恒温参考光栅实现 FBG 中心波长的标定。设 2 个窄带光中心波长的间隔为 $\Delta\lambda$,则有

$$\Delta L = \frac{\lambda(2\lambda + \Delta\lambda)}{2n\Delta\lambda} \quad (1)$$

式中, λ 为光谱中心波峰的波长; ΔL 为 2 条干涉臂的长度差; n 为光纤有效折射率。图 2 为光纤 Mach-Zehnder 干涉型梳状滤波器的梳状光谱图。

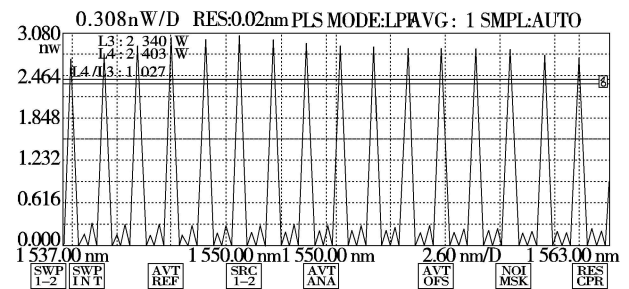


图 2 光纤 Mach-Zehnder 干涉型梳状滤波器光谱图

2.2 测温系统的解调原理

系统利用光纤 Mach-Zehnder 干涉型梳状滤波

器代替图 1 系统中的恒温参考光栅,在可调谐 F-P 滤波法的基础上,通过拟合曲线算法,对 FBG 中心波长进行标定,系统结构如图 3 所示.

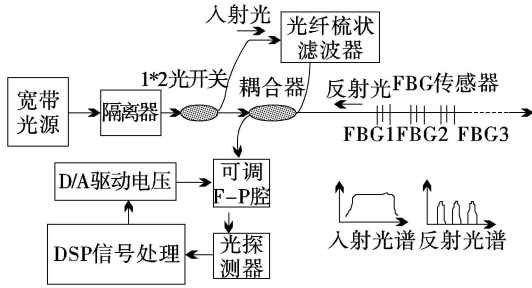


图 3 基于光纤梳状滤波器的 FBG 波长解调系统

这个系统的原理和典型的可调谐 F-P 滤波法相似,只是提供参考点的不再是多个参考光栅而是光纤梳状滤波器,从而有更多的参考点来对光纤光栅 Bragg 中心波长进行标定,选取合适的算法,就可以达到波长解调精度的要求.

2.3 拟合曲线算法

为了精确地解调 FBG 的中心波长,需要通过光栅梳状滤波器提供的大量参考点,利用最小二乘拟合曲线算法,对 FBG 中心波长进行标定.采用最小二乘法拟合多项式函数的基本原理为:对于变量 x 和 y 存在着线性关系,可以通过实验测得的数据 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 找到一个多项式组成的函数 $f(x)$ 来拟合变量 x 和 y 的线性关系.如果以 y_i 与 $f(x_i)$ 之差的平方和最小为条件选择函数 $f(x)$ 中多项式的系数的方法称为最小二乘法.样本的均方根误差为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2} \quad (2)$$

为了使得 S 达到最小值,可以通过 $D = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2$ 最小来实现.由于函数 $f(x)$ 中含有 m 个多项式系数: $a_1, a_2, \dots, a_m (m \leq n)$, 那么 D 为 a_1, a_2, \dots, a_m 的 m 元函数.求出当 D 取最小值时 a_1, a_2, \dots, a_m 的值就可以得到多项式拟合函数 $f(x)$.

通过偏导数方法,得到方程组: $\frac{\partial D}{\partial a_k} = 0, k=1, 2, \dots, m$, 设 $f(x_i) = \sum_{j=1}^m C_{ij} a_j (i=1, 2, \dots, n)$, 其中 C_{ij} 由 x_i 计算得到.那么

$$D = \sum_{i=1}^n [\sum_{j=1}^m C_{ij} a_j - y_i]^2$$

$$\frac{\partial D}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^n \{2 C_{ik} [\sum_{j=1}^m C_{ij} a_j - y_i]\} = 0$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} C_{ik} a_j = \sum_{i=1}^n C_{ik} y_i \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

联立方程组,将方程组写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{21} & \dots & C_{n1} \\ C_{12} & C_{22} & \dots & C_{n2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ C_{1m} & \dots & C_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2m} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{21} & \dots & C_{n1} \\ C_{12} & C_{22} & \dots & C_{n2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ C_{1m} & \dots & C_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\text{令 } \begin{pmatrix} C_{11} & C_{21} & \dots & C_{n1} \\ C_{12} & C_{22} & \dots & C_{n2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ C_{1m} & \dots & C_{nm} \end{pmatrix} = \mathbf{C}, \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} = \mathbf{A},$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \mathbf{Y}, \mathbf{C}' \text{ 为 } \mathbf{C} \text{ 的转置矩阵. 则有}$$

$$\mathbf{C}' \mathbf{C} \mathbf{A} = \mathbf{C}' \mathbf{Y} \quad (5)$$

$$\mathbf{C} \mathbf{A} = \mathbf{Y} \quad (6)$$

这就是函数 $f(x)$ 与数据 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 所对应的 n 元方程组.记 $\mathbf{C}' \mathbf{C} = \mathbf{T}$, 若 $|\mathbf{T}| \neq 0$, 在式 (6) 两边同时左乘 \mathbf{T} 矩阵的逆矩阵 \mathbf{T}^{-1} , 最后得到

$$\mathbf{A} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{C}' \mathbf{Y} \quad (7)$$

即可以求出 a_1, a_2, \dots, a_m 得到所要拟合的多项式函数 $f(x)$. 当 $f(x)$ 中的 x_0, x_1, \dots, x_n 为参考点的电压值时, $f(x_0), f(x_1), \dots, f(x_n)$ 为 x_0, x_1, \dots, x_n 各自所对应的波长, 这样就可以通过最小二乘法标定 FBG 的中心波长.

3 实验分析

在恒温环境下通过光谱仪测量光纤 Mach-Zehnder 干涉型梳状滤波器的输出光谱中心波长, 即 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, 16)$, 依次为 1 537.49, 1 539.179, 1 540.806, 1 542.438, 1 544.049, 1 545.682, 1 547.311, 1 548.927, 1 550.553, 1 552.168,

1 553.802, 1 555.424, 1 557.043, 1 558.675, 1 560.233, 1 561.916 nm. 实验装置如图3所示,为了区分参考点和测量点,光源不能同时向参考点和测量点输送宽带光,通过光开关选择向参考点输送宽带光,利用这16个参考点波长,通过最小二乘法拟合出F-P滤波器输入Bragg波长与扫描电压之间的曲线关系,如图4所示.

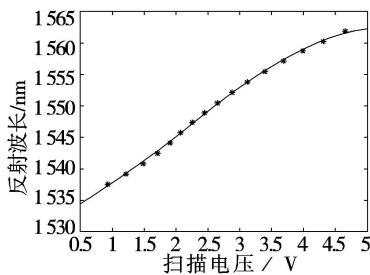


图4 扫描电压与Bragg反射波长的关系

实验采用5个测温FBG传感器,这5个测量点在恒温24.1℃时中心Bragg反射波长为:1 541.269, 1 543.479, 1 545.408, 1 547.217, 1 551.524 nm. 用最小二乘拟合曲线算法对5个待测FBG中心波长进行标定,结果以及误差如表1所

示.

从表1的结果可以看出,以光纤Mach-Zehnder干涉型梳状滤波器提供多个参考点的情况下,标定的FBG反射波长精度比较高,最大误差小于5 pm,波长的均方误差小于4 pm. 因此采用最小二乘拟合曲线算法能到达很高的波长测量精度. 通过光开关选择向测量点输送宽带光,对5个FBG点进行温度测量实验,测量结果及误差如表2所示. 从表2的结果可以看出,电力电缆测温系统的温度测量最大误差小于0.8℃,均方误差在0.7℃以下.

表1 最小二乘拟合曲线算法波长误差分析

中心波长 λ /nm	实际波长	第一组	第二组	第三组
λ_1	1 541.269	1 541.266	1 541.272	1 541.271
λ_2	1 543.497	1 543.494	1 543.498	1 543.499
λ_3	1 545.408	1 545.411	1 545.405	1 545.412
λ_4	1 547.217	1 547.214	1 547.213	1 547.220
λ_5	1 551.524	1 551.521	1 551.528	1 551.526
均方误差 /pm		2.8	3.3	3.0

表2 电力电缆温度测量误差分析

实际温度	λ_1 检测温度	实际温度	λ_2 检测温度	实际温度	λ_3 检测温度	实际温度	λ_4 检测温度	实际温度	λ_5 检测温度
28.2	28.6	28.2	28.9	28.1	27.8	28.3	28.6	28.1	27.5
33.1	32.5	33.2	33.6	33.2	32.4	33.1	32.7	33.4	33.9
39.2	38.4	39.1	38.3	39.2	39.7	39.4	39.0	39.3	38.7
均方误差	0.62	0.65	0.57	0.41	0.56				

4 结束语

研究表明,采用光纤Mach-Zehnder干涉型梳状滤波器代替恒温参考光栅,运用最小二乘拟合曲线算法能够准确地标定出光纤Bragg光栅的中心波长. 这种波长标定方法在温度检测应用中,能使温度测量均方误差小于0.7℃,可以实现对电力电缆的温度检测,并且该系统易于实现分布式检测,成本较低,能够满足电力安全运行的需要.

参考文献

[1] MeltzG. Overview of Fiber Grating Based Sensor[J].

SPIE,1996,2838:2.

- [2] 胡志新,朱军,张陵,等. 光纤光栅压力传感器中应力迟滞的消除方法[J]. 光子学报,2006,35(9):1329-1332.
- [3] 李莹,张书练. 基于可调谐F-P滤波器的光纤光栅解调系统[J]. 激光技术,2005,29(3):237-240.
- [4] 高璇,黄俊斌,顾宏灿,等. 基于光纤梳状滤波器的光纤Bragg光栅波长解调技术研究[J]. 舰船科学技术,2008,30(3):122-126.
- [5] 李勇峰,姚寿铨. 50 GHz 光纤梳状滤波器的研制[J]. 上海大学学报,2005,11(2):4-6.