

单片机的高精度 FBG 传感解调技术

庄其仁 龚冬梅 王 静 王士东

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 将单片机数据处理应用于光纤光栅匹配解调方法中, 对光电探测器输出电压与波长之间的关系数据进行线性插值, 通过相关计算, 确定传感光栅的中心波长位移。实验表明, 采用相关计算数据处理得到的传感光栅中心波长值, 比起直接采用光电探测器输出电压为最大的数据点所确定的中心波长值, 具有测量重复性好, 分辨率高。结果, 证明此方法可提高解调精度。

关键词 光纤光栅传感器, 单片机, 光纤光栅解调, 相关计算

中图分类号 TN 763.02; TN 212.14

文献标识码 A

光纤光栅传感器(FBG)是利用 Bragg 波长对温度、应力的敏感特性而制成, 它是一种新型的光纤传感器。FBG 波长的解调技术是 FBG 传感器实用化的关键技术, 传统上一般应用光谱仪、单色仪等解调系统。它们均造价高, 体积大, 不易携带, 不宜于现场使用。为解决上述问题, 人们提出了许多解调方法, 如非平衡干涉仪法, F-P 腔滤波器法, 匹配光纤光栅法, 被动解调法以及将光纤光栅传感元件用作光纤激光器腔镜实现传感等。其中匹配解调法结构简单、线性好, 操作方便, 因而具有推广应用价值^[1]。此方法是通过测量反射光或透射光强度极值, 判断 Bragg 中心波长位移从而实现传感测量的。但由于光电探测器输出电压与波长之间的关系曲线不是理想的对称和光滑, 所获得的中心波长精度不够高。为了提高波长位移测量精度, 我们采用单片机数据处理对光电探测器输出电压与波长之间的关系数据进行插值。通过相关计算, 确定传感光栅的中心波长位移。这样, 便大大提高了解调精度。用此方案可实现高精度的温度及应变测量。

1 实验装置与原理

实验装置如图 1 所示, 光纤光栅传感解调系统主要由宽带光源(BBS)、传感光栅(FBG₁)、光电探测器(PD)、单片机数据采集及处理系统等几部分组成。

用光纤光栅 FBG₂ 作为波长调谐元件。调谐光栅 FBG₂ 粘于一悬臂梁上。由材料力学可知, 光纤光栅 FBG₂ 的布拉格波长移动与悬臂梁自由端位移成正比^[2]。因此通过改变悬臂梁自由端位移量, 便可对光纤光栅进行调谐。

将悬臂梁自由端与单片机控制的步进马达相连, 单片机通过控制马达转动(经丝杆传动)来控制悬臂梁自由端移动。由此, 实现单片机控制的光纤光栅波长调谐。步进电机的步进角为 7.5° , 丝杆每旋转一周带动悬臂梁自由端移动 0.5

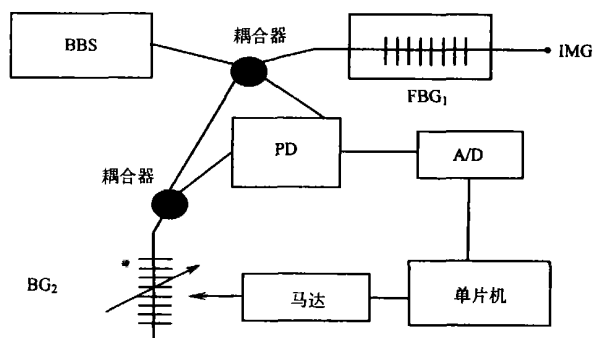


图1 光纤光栅传感解调系统原理图

收稿日期 2003-12-05

作者简介 庄其仁(1960-), 男, 研究员, 主要从事光电子应用技术的研究。E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn

基金项目 国务院侨务办公室科研基金资助项目(02QZR03)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

mm. 因此单片机每改变一个数据, 悬臂梁自由端就步进 0. 01 mm. 若步进长度太长会影响数据采集精度; 太短会降低扫描速度并造成数据量过大.

从宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器传送到传感光栅(FBG₁), 被反射后又经耦合器送到调谐光栅(FBG₂), 反射回的光由光电探测器接收. 单片机控制调谐光栅的同时, 同步采集光电探测器的输出信号. 也就是说, 调谐光栅的中心波长每步进一次, 单片机采集相应于此波长的光电探测器输出数据. 光电探测器由带尾纤的 PIN 光电二极管、偏置电路、前置放大器和滤波电路组成. 由于前置端的接收信号极其微弱, 因此需要在引入最小噪声的条件下加以放大. 前置端确定了系统的信噪比(SNR). 为此实验装置采用的前置放大器为硅结型场效应管, 它有很低的输入电流噪声. PIN 光电二极管波长响应范围 1. 00~ 1. 65 μm, 响应度 0. 8 A•W⁻¹, 暗电流 0. 4~ 0. 6 nA, 光电探测器采用高阻抗前置端设计.

光纤光栅反射谱是波长 λ 的复杂函数, 当光纤光栅的反射率不是特别高时, 其反射谱可近似看作高斯型. 假定悬臂梁调谐光纤光栅反射谱型用 D(λ) 来描述, 传感光栅反射谱型用 G(λ) 表示. 那么, 光电探测器接收到的光功率可表示为

$$P_D = k \int_{-\infty}^{\infty} G(\lambda) D(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

式中 k 为与光源、光耦合器及连接器等有关的常数. 若定义相关系数

$$\gamma_{DG} = \int_{-\infty}^{\infty} D(\lambda) G(\lambda) d\lambda \tag{2}$$

则式(1)为

$$P_D = k \gamma_{DG}. \tag{3}$$

式(3)表明, 光电探测器检测到的信号, 实际上是传感光纤光栅反射谱 G(λ) 和悬臂梁调谐光纤光栅反射谱 D(λ) 的相关系数. 显然, 当两个谱型完全一样时相关系数最大, 即光电探测器的输出电压最大. 此时 D(λ) 与 G(λ) 的中心波长 λ_B 重合. 若 D(λ) 和 G(λ) 的谱型有差异, 一般仍以光电探测器的输出电压最大作为两中心波长 λ_B 重合的判据. 但由于光电探测器输出电压与波长之间的关系曲线不是理想的对称和光滑, 峰值电压判读精度不够高. 为此, 我们对中心波长 λ_B 已确定的调谐光纤光栅和传感光纤光栅用实验分别测得一组 D(λ) 和 G(λ) 数据, 并存入存储器. 通过不断平移 G(λ) 来求出一组 D(λ) 和 G(λ) 的相关系数 γ_{DG}, 所得相关系数曲线 γ_{DG}(λ) 经过坐标平移, 使其峰值波长与 D(λ) 的峰值波长重合. 它的形状就是理想的解调器输出电压曲线形状(只差一个比例系数). 根据信号的相关性原理, 图 1 测量系统中光电探测器的实际输出电压曲线 V(λ) 与 γ_{DG}(λ) 的相关函数为

$$\gamma(\Delta\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} V(\lambda) \gamma_{DG}(\lambda + \Delta\lambda) d\lambda \tag{4}$$

达到最大值时, 两曲线相似程度最高, 其中 Δλ 为悬臂梁调谐光纤光栅 Bragg 中心波长位移量. 利用单片机数据存储和处理技术, 根据式(2), (4)就可确定波长位移量 Δλ 从而实现温度及应变的传感测量.

2 单片机数据处理

单片机具有体积小、使用灵活等特点, 被广泛应用于智能仪器仪表中. 汇编语言难以胜任大数据的管理和复杂的数学计算, 而且程序可读性和可移植性也比较差. 因此, 我们采用 C 语言编程. 由于目前单片机的计算速度和数据存储能力远低于 PC 机, 所以数据处理应较多地采用查表方式, 同时采用紧凑的数据表格结构^[3].

在计算式(4)时, Δλ 取值采用逐次逼近法. 先取较大的 Δλ 值, 记为 Δ₁λ, 计算一组 γ(Δλ) 值. 在其最大值 γ_{M1} 附近 ±Δ₁λ 范围内再取小一点的 Δλ 值, 记为 Δ₂λ, 继续计算 γ(Δλ), 并以此类推逐渐减小 Δλ 取值, 直到系统可达到的最小间隔. 作为数字信号处理, 所有积分计算用求和来实现. 由于 D(λ), G(λ), γ_{DG}(λ) 和 V(λ) 都具有高斯型或类似高斯型的分布. 所以, 积分区间只需要在较小的范围内, 即 D(λ), G(λ), γ_{DG}(λ) 和 V(λ) 不等于零的范围内, 实际计算量并不大.

为了保证解调速度, 步进电机的步进长度不能太小, 这样就影响了采样分辨率. 为了提高分辨率, 可在两个采样点之间进行线性插值. 我们采用拉格朗日插值方法, 其公式为

$$f(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\cdots(x_0-x_n)}y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)\cdots(x-x_n)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)\cdots(x_1-x_n)}y_1 +$$
$$\cdots + \frac{(x-x_0)(x-x_2)\cdots(x-x_{n-1})}{(x_n-x_0)(x_n-x_1)\cdots(x_n-x_{n-1})}y_n + R_n(x).$$

(5)

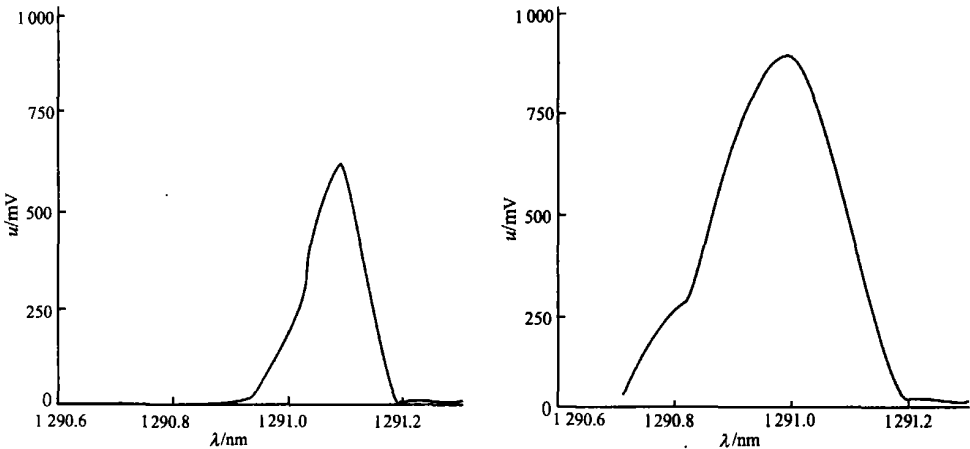
在满足精度要求前提下, 为了减少运算量, 我们选用分段插值. 每一段选 3 个插值点(电压值) V_{k-1} , V_k 和 E_{k+1} , 对应波长为 λ_{k-1} , λ_k 和 λ_{k+1} , 每一段的拉格朗日插值公式可近似表示为

$$V(\lambda) \approx \frac{(\lambda-\lambda_k)(\lambda-\lambda_{k+1})}{(\lambda_{k-1}-\lambda_k)(\lambda_{k-1}-\lambda_{k+1})}V_{k-1} + \frac{(\lambda-\lambda_{k-1})(\lambda-\lambda_{k+1})}{(\lambda_k-\lambda_{k-1})(\lambda_k-\lambda_{k+1})}V_k +$$
$$\frac{(\lambda-\lambda_{k-1})(\lambda-\lambda_k)}{(\lambda_{k+1}-\lambda_{k-1})(\lambda_{k+1}-\lambda_k)}V_{k+1}$$

(6)

3 实验结果及讨论

实验中将应变传感光栅贴在简支梁上, 用螺旋千分尺调节应变大小. 光纤光栅的中心波长可调范围 1 285~ 1 292 nm. 用标准解调器测得应变传感光纤光栅的反射谱型 $G_S(\lambda)$ 、悬臂梁调谐光纤光栅的反射谱型 $D(\lambda)$, 如图 2 所示. 计算 $G_S(\lambda)$ 和 $D(\lambda)$ 的相关系数理论曲线 $y_{DG}(\lambda)$, 如图 3 所示. 最后根据式 (4) 求得相关函数 $y(\Delta\lambda)$, 由其极大值得到波长位移量 $\Delta\lambda$, 如图 4 所示. 采用直接纵坐标最大点位置 (即光电探测器输出电压为最大的数据点), 确定传感光栅的中心波长值(直接峰值中心波长). 它和采用



(a) 应变传感光纤光栅的反射谱型 $G_S(\lambda)$ (b) 调谐光纤光栅的反射谱型 $D(\lambda)$

图 2 光纤光栅的反射谱型

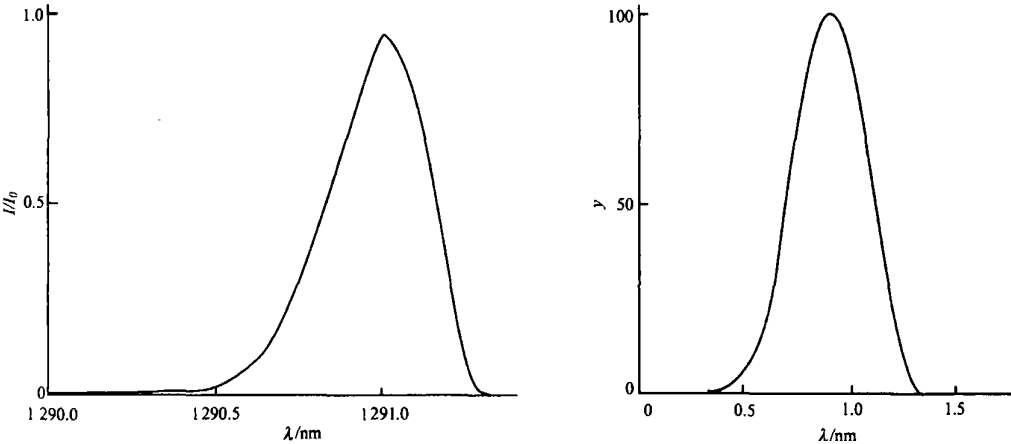


图 3 相关系数理论曲线 $y_{DG}(\lambda)$

图 4 相关函数 $y(\Delta\lambda)$ 曲线

相关计算数据处理得到的中心波长值(相关最大中心波长) 结果比较, 如表 1 所示. 表中对应变传感光纤光栅的 2 个固定螺旋千分尺位置, 分别进行 5 次重复测量. 从结果可以看出, 相关最大波长的均方差比直

接峰值波长的均方差小. 比较一下图 2, 3, 4, 可以看到曲线变得越来越光滑. 这对于提高峰值位置的判断准确性显然是有利的. 如果在图2中直接判断峰值, 因线性插值不能改变峰值位置, 因此波长分辨率与

表1 螺旋千分尺位置为 9 mm 和 10 mm 时的应变传感光纤光栅中心波长测量结果

序号	9 mm		10 mm	
	λ_B/nm	λ_{BM}/nm	λ_B/nm	λ_{BM}/nm
1	1 289.134	1 289.025	1 289.547	1 289.420
2	1 289.007	1 289.001	1 289.437	1 289.414
3	1 288.891	1 289.000	1 289.391	1 289.402
4	1 288.801	1 288.980	1 289.347	1 289.398
5	1 288.824	1 288.986	1 289.414	1 289.400
平均值	1 288.931	1 288.998	1 289.427	1 289.407
均方差	0.124	0.016	0.067	0.008

采样分辨率一样, 分辨率没有提高. 而当信号在峰值位置附近受到干扰时, 峰值判读就会有误差, 所以直接峰值中心波长误差较大. 在图 4 中, 曲线变得光滑, 这是由于积分平均的结果, 干扰信号被削弱. 原始数据的线性插值经相关计算后变为曲线拟合, 峰值位置可以在插值点上, 因此波长分辨率比采样分辨率高.

4 结束语

在 FBG 解调技术中, 匹配解调法结构简单, 基于悬臂梁调谐的匹配解调法易于实现自动测量. 采用单片机数据处理, 对光电探测器输出电压与波长之间的关系数据进行线性插值. 通过相关计算来确定传感光栅的中心波长位移, 提高了解调精度. 用此方案可实现高精度的温度及应变测量, 而单片机具有体积小、使用灵活等特点, 因此具有推广应用价值.

参 考 文 献

1 刘云启, 刘志国, 郭转运等. 光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 88~ 92

2 关柏鸥, 刘志国, 开桂云等. 基于悬臂梁结构的光纤光栅位移传感研究[J]. 光子学报, 1999, 28(11): 983~ 984

3 龚冬梅. C 语言实现单片机的数据处理及应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2003, 24(1): 98~ 104

A High Precise Sensing Demodulation Technology Based on
Fiber-Grating Sensors and Single-Chip Microcomputer
Zhuang Qiren Gong Dongmei Wang Jing Wang Shidong
(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362021, Quanzhou, China)

Abstract A high precise method of sensing demodulation is formed by matching fiber sensor with grating sensor and by applying a single chip microcomputer to it for data processing. In this method, linear interpolation is conducted on the relational data between wavelength and output voltage of photoelectric detector; and the centre wavelength shift of sensing grating is determined by correlation computing. As indicated by experimental results, the centre wavelength value of sensing grating obtaining from data processing of correlation computing shows a better repeatability of measurement and a higher resolution than the centre wavelength value determined by directly adopting output voltage of photoelectric detector as maximal datapoint.

Keywords fiber grating sensors, single chip microcomputer, demodulation by fiber grating, correlation computing