

文章编号 1004-924X(2009)05-0943-08

光纤环镜在光栅传感解调系统中的应用

张锦龙^{1,2}, 王葵如¹, 余重秀¹, 林妹妹¹, 赵德新¹, 李成¹

(1. 北京邮电大学 电子工程学院 教育部光通信与光波技术重点实验室, 北京 100876;

2. 河南大学 物理与电子学院, 河南 开封 475001)

摘要:为实现高稳定性、高精度的波长干涉解调,研究了保偏光纤环镜在波长解调结构中的应用,设计并搭建了一种基于光纤环镜的新型光纤布拉格光栅传感器解调系统。依据传统的矩阵光学原理建立理论模型,分析采用保偏光纤环镜实现干涉解调的基本原理,研究了其结构参数对解调精度的影响并进行数值仿真验证。在理论指导的基础上,搭建光路模块,并基于 LabVIEW 软件设计了用于消除系统结构参数误差的测定软件与解调系统监控软件,研制电路模块,构成了完整的传感解调系统。经传感检测验证,该系统在 20~90 ℃ 对温度的分辨率为 0.03 ℃,准确度可达 ±0.1 ℃,实验结果与理论分析相吻合,展示了该系统具有良好的稳定性,较高的检测灵敏度和较强的适用性。

关键词: 光纤传感; 光纤环镜; 解调系统; LabVIEW

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Application of fiber loop mirror to demodulation system of fiber grating sensor

ZHANG Jin-long^{1,2}, WANG Kui-ru¹, YU Chong-xiu¹,
LIN Mei-mei¹, ZHAO De-xin¹, LI Cheng¹

(1. *College of Electronic Engineering, Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies of the Ministry of Education,*

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. *School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475001, China*)

Abstract: A novel demodulation scheme for the fiber Bragg grating sensor based on a new-pattern polarization-maintaining fiber loop mirror is designed to achieve highly stable and accurate wavelength interference demodulation. Based on the matrix optics theory, a model is established for analyzing the elementary principle of the interference demodulation using this fiber loop mirror. Then, the influence of structure parameters on the demodulation precision is deeply analyzed, and a numerical simulation is undertaken. Meanwhile, the optical and electrical modules are developed, and the testing software and monitoring software are designed for eliminating the system structure errors based on LabVIEW. By a sensor detection experiment, the system precision on temperature in the range of 20-90 ℃ can reach the resolution of 0.03 ℃ and the accuracy of ±0.1 ℃. The experimental results agree well with theory analysis, which sufficiently shows that this system has advantages in favorable stabilization,

收稿日期:2008-07-15;修订日期:2008-08-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60677003)

much higher precision and stronger applicability.

Key words: optical fiber sensing; fiber loop mirror; demodulation system; LabVIEW

1 引言

光纤和光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新型的传感器,具有良好的稳定性、可靠性、对电磁波的不敏感性、小尺寸、集信息传输与传感于一体等一系列优点,已经被广泛应用于传感系统,各种光纤布拉格光栅传感系统得到了国内外的广泛关注^[1-3]。随着光栅技术的成熟,人们研究的重点转向了解调系统。目前国内外研究的解调方法有很多,其中干涉法解调以其高分辨率的独特优势成为研究的重点之一,但有些干涉解调方案易受环境影响,从而失去了高精度的意义;又有些方案的系统搭建条件比较苛刻,很难脱离实验室环境使用^[4-9]。本文设计了一种基于保偏光纤环镜的波长解调系统。利用矩阵光学原理,详细分析了保偏光纤长度、耦合器耦合系数、偏振光入射角度对光纤环镜(FLM)出射功率的影响,以及与入射光波长之间的关系,实际搭建了基于保偏型 FLM 的光纤光栅传感解调系统,编制了基于 LabVIEW 的参数测定软件和解调系统监控软件,并进行了光纤光栅传感器的温度检测实验。该系统的参数测定软件和解调系统监控软件可消除耦合器分光比和保偏光纤两端偏振方向误差以及保偏光纤长度误差等对系统性能的影响,故搭建光路系统时无需对结构参数严格控制,从而降低了光路的设备需求和成本。与其它解调仪相比,该方案采用全光纤结构,易于实现小型化,不仅有较好的偏振独立性和稳定性,而且对任意结构参数的 FLM 系统均适用。

2 理论分析

2.1 保偏光纤环镜原理

光纤环镜是一种最简单且具有宽带特性的基于光纤耦合器的光纤环反射镜。如图 1 所示,对于普通 FLM,输入光场 A_i 经宽带耦合器分为相位差为 $\pi/2$ 的两束光 A_1 、 A_2 ,沿光纤环传输一周后回到耦合器。两束光沿同一光纤相对传输,理想情况下,二者光程相同并在耦合器内发生干涉。

根据耦合器传输矩阵知,返回的两束光相位差和耦合器耦合系数决定了输出光场 A_r 、 A_t 的功率分配。这里所研究的均为低功率信号情况,且光纤长度很短,因此忽略自相位调制和交叉相位调制等非线性效应引起的相移,以及耦合器和光纤的损耗。设输入功率沿顺时针方向传输的部分占全部功率的比值为 K ,则前向(顺时针)和后向(逆时针)传输光场为: $A_1 = \sqrt{K}A_i$ 、 $A_2 = \sqrt{1-K}A_i$ 。利用光纤耦合器的传输矩阵可知,若 FLM 采用 3 dB 耦合器,即 $K=0.5$,所有输入光将全部被反射。

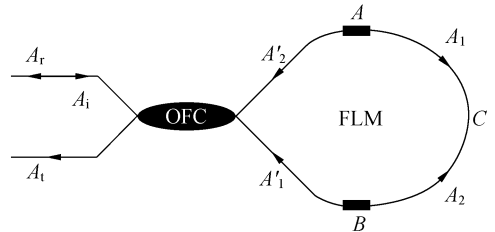


图 1 保偏 FLM 结构示意图

Fig. 1 Sketch map of polarization-maintaining FLM

图 1 为本系统采用的保偏 FLM 结构,该结构由普通光纤环镜中接入一段保偏光纤构成。其中 ACB 段为保偏光纤,相当于在普通 FLM 中引入双折射效应。虽然相向传输的光 A_1 、 A_2 走的是同一根光纤,二者的双折射强度相同,但由于两束光进入保偏光纤的位置不同(分别位于 A 、 B 两点),导致二者偏振方向与保偏光纤快轴(慢轴)之间的夹角不同,从而使两束光经过保偏光纤时产生的相位延迟也不同。因此, A 、 B 两点相当于旋光器的作用, A_r 、 A_t 的功率分配将受光纤耦合器的分光比和 A_1 、 A_2 偏振方向与保偏光纤的夹角的影响。

将图 1 光路等效为图 2 所示光路。

由图 2 可见,两束光分别经过独立的传输通道。利用矩阵光学原理建立描述该等效光路图的传输矩阵^[10-12]如下:

耦合器返回光场和输出光场关系:

$$\begin{aligned} A_1^{x(y)'} &= T_{SMF} T_{X_1} T_{PCF} T_{X_2} T_{SMF} A_1^{x(y)} \\ A_2^{x(y)'} &= T_{SMF} T_{X_2} T_{PCF} T_{X_1} T_{SMF} A_2^{x(y)} \end{aligned}$$

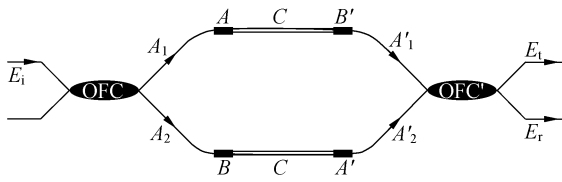


图 2 FLM 等效结构示意图

Fig. 2 Sketch map of FLM equivalent configuration

耦合器传输矩阵 $T_{OFC} = (1 - \gamma)^{1/2}$ $\begin{bmatrix} (1 - K_{x(y)})^{1/2} & jK_{x(y)}^{1/2} \\ jK_{x(y)}^{1/2} & (1 - K_{x(y)})^{1/2} \end{bmatrix}$, γ 为耦合器损耗系数, K_x 、 K_y 分别为耦合器快、慢轴分光比。忽略耦合器的损耗和偏振效应对耦合系数的影响, 即 $K_x = K_y = K$ 。则其传输矩阵为:

$$T_{PCF} = \begin{bmatrix} \cos(\delta/2) + j \cdot \sin(\delta/2) \cdot \cos \varphi & j \cdot \sin(\delta/2) \cdot \sin \varphi \\ j \cdot \sin(\delta/2) \cdot \sin \varphi & \cos(\delta/2) - j \cdot \sin(\delta/2) \cdot \cos \varphi \end{bmatrix}$$

其中 φ 为偏振光场 A_1 、 A_2 从保偏光纤 A、B 两端入射时偏振方向的夹角。 φ 值满足图 3 所示的 A、B 两点耦合模式截面关系图。

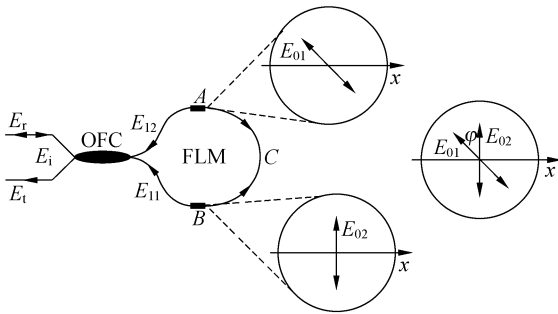


图 3 保偏光纤截面图

Fig. 3 Section figure of polarization-maintaining fiber

δ 为光场在保偏光纤快慢轴上产生的相位差, 满足关系式:

$$\delta = \frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda}$$

其中 $B_m = |n_x - n_y|$ 是保偏光纤模式双折射度, L 为保偏光纤长度, λ 为入射光波长。光纤光栅反射波长 λ 与温度呈线性关系: $\lambda = \lambda_0 + Ct$, 其中 λ_0 为 0°C 时光纤光栅的反射波长, C 为光纤光栅的温度系数, t 为温度^[12]。

依据图 2 等效光路, 忽略光纤损耗, 将以上各传输矩阵联合求解得^[13]:

$$T_{OFC} = \begin{bmatrix} (1 - K)^{1/2} & jK^{1/2} \\ jK^{1/2} & (1 - K)^{1/2} \end{bmatrix}$$

耦合器的耦合系数也随波长变化, 但对于传感系统来说一般检测范围 $\leq 5 \text{ nm}$, 现在所生产的宽带耦合器带宽可达 60 nm , 且对偏振不敏感, 在偏离耦合器中心波长 2.5 nm 范围内耦合系数变化可忽略不计。

单模光纤传输矩阵 $T_{SFM} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \exp[j(-kl_{1,2} + ja_{1,2})]$, 其中 k 为波矢, α 为单模光纤损耗系数, l_1 、 l_2 分别为 FLM 中两段单模光纤的长度。

保偏光纤传输矩阵:

反射光强:
 $P_r = A_r \cdot A_r^* = [4K(1 - K) - 2K(1 - K)\sin^2 \varphi + 2K(1 - K)\sin^2 \varphi \cdot \cos(\frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct})] \cdot \exp[-2\alpha(l_1 + l_2)] \cdot (A_i A_i^*)$, (1)

透射光强:
 $P_t = A_t \cdot A_t^* = [(2K - 1)^2 + 2K(1 - K)\sin^2 \varphi - 2K(1 - K)\sin^2 \varphi \cdot \cos(\frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct})] \cdot \exp[-2\alpha(l_1 + l_2)] \cdot (A_i A_i^*)$, (2)

由式(1)、式(2)分析: 在保偏光纤参数确定时, 有效折射率差为定值, 光纤环境的反射光强(透射光强)是耦合器分光比 K 、温度 t 、保偏光纤长度 L 和两端偏振方向夹角 φ 的函数。

令:

$$Y = \frac{P_r - P_t}{P_r + P_t} = Y_1 + Y_2 \cos(\frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct})$$
, (3)

其中:

$$\begin{cases} Y_1 = (8K - 8K^2 - 1) - (4K - 4K^2)\sin^2 \varphi \\ Y_2 = (4K - 4K^2)\sin^2 \varphi \end{cases}$$
, (4)

可见, Y 值的大小与光源入射总功率、系统损耗、单模光纤长度无关。当参数 K 、 L 、 φ 确定时, 在单调区间内 Y 与 t 存在一一对应关系, 只要确定 Y 值, 即可得到 t 值。

2.2 光纤光栅传感系统结构及原理

由以上分析可知, 采用保偏光纤结构的

FLM,在单调区间内 Y 与 t 存在对应关系。通过测定 Y 值可求得 t ,因此该结构可应用于光纤光栅传感系统。系统结构如图 4 所示:

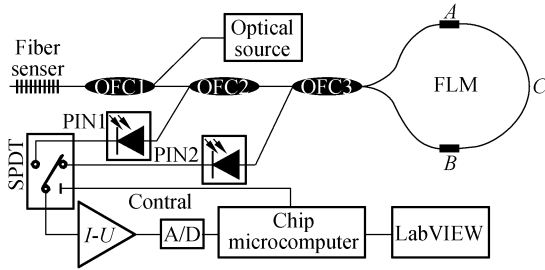


图 4 光纤光栅传感解调系统原理图

Fig. 4 Principle figure of fiber grating demodulation system

光路部分:宽带光源发出的宽光谱经 OFC_1 进入光纤光栅,反射后变为窄带光谱经 OFC_1 和 OFC_2 进入到 OFC_3 ,分成两束光沿 FLM 相对传输一周后回到 OFC_3 并发生干涉,反射光由 OFC_2 输出,透射光由 OFC_3 输出。依据保偏光纤环原理分析知,两光强与光波长存在对应关系。

电路部分:整个系统的控制核心采用嵌入 51 内核的 FPGA,系统与 PC 之间采用串口通信。由 PIN 管将光强信息转化为电流大小。为防止电路对两路电流放大和采集的参数不同引入误差,系统采用单刀双掷模拟开关(SPDT)切换两路信号,采用同一电路分时对两路信号采集。由 CPU 控制 SPDT 选择转化通道,再通过 $I-U$ 转换电路转化为电压信号,接着由 CPU 控制 A/D 转换电路采集电压信息,最后由 CPU 通过串口将数据转发给计算机进行处理。核心控制器 FPGA 实现 4 个功能:(1)构建基于 51 内核的 CPU;(2)接收来自计算机的命令发送到 CPU 处理;(3)接收 A/D 转换的数据并发往 CPU 进行数据处理;(4)实现看门狗功能。FPGA 采用 VHDL 编程,CPU 执行程序采用 C 编程。

软件部分: Y_1 、 Y_2 为由结构参数决定的定值,事实上 L 、 K 、 φ 存在误差,导致系统的 Y_1 、 Y_2 与理论值有偏差且不可预测。设计基于 LabVIEW 的参数测定软件,通过可调谐激光器扫描时测得的数据计算出 Y_1 、 Y_2 真实值。该软件使得搭建光路系统时无需为保证参数的准确性而采用高精度的设备甚至一些特殊设备,有效地降低了系统的搭建难度和成本。

由公式(3)得:

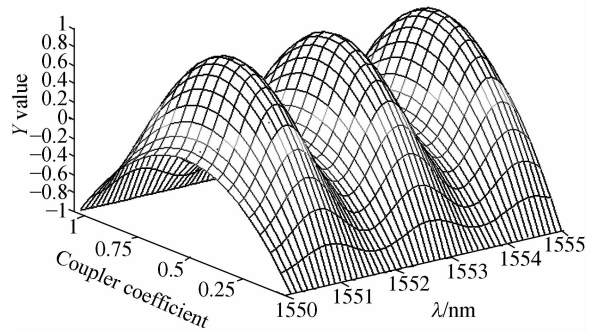
$$t = \frac{2\pi \cdot B_m \cdot L / C}{\arccos[(P_r - P_t - Y_1 P_r - Y_1 P_t) / (P_r + P_t) Y_2]} - \frac{\lambda_0}{C}, \quad (5)$$

参数测定软件测出 Y_1 、 Y_2 后,输入解调系统监控软件,监控软件再将接收到的数据按式(5)处理,即可求得温度 t 并实时画出温度曲线。

2.3 数值模拟

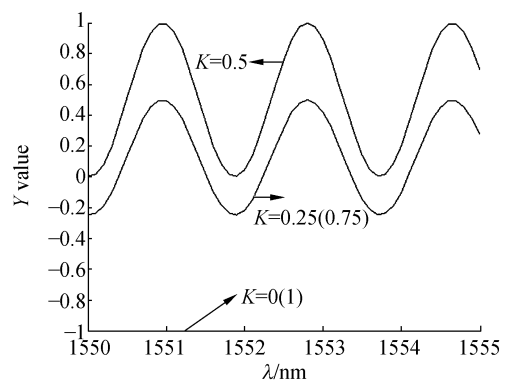
光纤光栅反射波长与温度呈线性关系,故直接讨论 Y 和 λ 的关系。根据式(3)通过数值计算研究各参数(K 、 L 、 φ)对 Y 和 λ 对应关系特性的影响。设保偏光纤 $B_m = 6.4 \times 10^{-4}$ 。

图 5 显示 L 、 φ 为固定值($L = 2m$ 、 $\varphi = \pi/4$)时 K 由 0 变化到 1 对应的 Y 和 λ 关系:



(a) K 从 0 变化到 1 时 Y 和 λ 关系

(a) Relation between Y and λ when K varied from 0 to 1



(b) K 取不同值时 Y 和 λ 关系

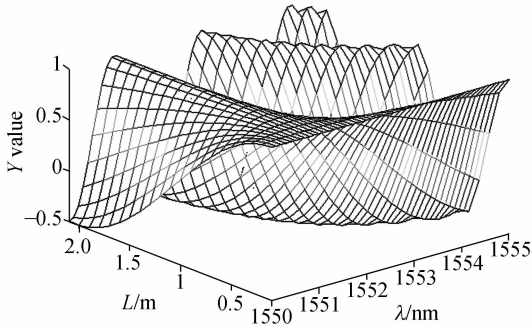
(b) Relation between Y and λ when K changed

图 5 耦合器分光比 K 变化时,反射率 Y 和波长 λ 的关系
Fig. 5 Relation between Y and λ when K changed

图 5(a)是耦合器耦合系数 K 连续变化时 Y 和 λ 的关系图,(b)是 K 分别为 0、0.25、0.5、0.75、1 时 Y 和 λ 的关系图,由图可知当 $K = 0.5$

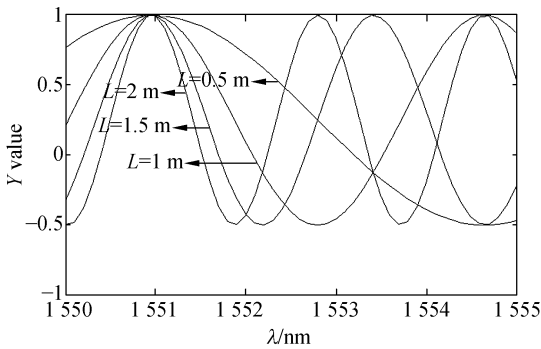
时 Y 随 λ 变化灵敏度最高,直流分量 $Y_1=0.5$,交流幅值 $Y_2=0.5$; K 接近 0 或 1 时 Y 随 λ 变化灵敏度为 0,这时 Y 几乎不随 λ 变化, $Y_1=-1, Y_2=0$; K 为其它值时 $Y_1 < 0.5, Y_2 < 0.5$,且 K 值越接近 0.5 时, Y_1, Y_2 越大,灵敏度越高,故在传感系统中应选用 K 接近 0.5 的。

图 6 显示了 K, φ 为固定值 ($K=0.5, \varphi=\pi/3$) 时, L 由 0 m 到 2 m 变化对应的 Y 和 λ 关系:



(a) L 从 0 m 变化到 2 m 时 Y 和 λ 的关系

(a) Relation between Y and λ when L varied from 0 m to 2 m



(b) L 取不同值时 Y 和 λ 关系

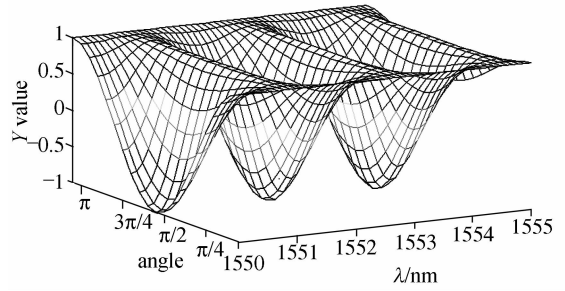
(b) Relation between Y and λ when L changed

图 6 保偏光纤长度 L 变化时反射率 Y 和波长 λ 关系图
Fig. 6 Relation between Y and λ when L changed

图 6(a) 是保偏光纤长度 L 连续变化时 Y 和 λ 的关系图, (b) 是 L 分别为 0.5、1、1.5、2 m 时 Y 和 λ 的关系图。由图可知, L 增加则 Y 随 λ 变化灵敏度增加; L 的大小对 Y 直流分量 Y_1 和交流幅值 Y_2 均无影响, 此时 $Y_1=0.25, Y_2=0.75$ 。理论上应选取尽量长的保偏光纤以达到更高的检测灵敏度, 但从图 6 可以看出 Y 随 λ 呈周期性变化, L 越长则周期越短, 传感系统中只能选取其中一

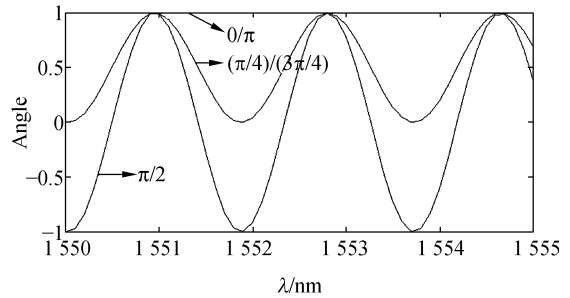
段单调区间进行检测, 故应根据所需检测温度范围选取合适的长度 L 。

图 7 显示了 K, L 为固定值 ($K=0.5, L=2$ m) 时, φ 由 0 变化到 π 时对应的 Y 和 λ 的关系:



(a) φ 从 0 变化到 π 时 Y 和 λ 的关系

(a) Relation between Y and λ when φ varied from 0 to π



(b) π 取不同值时 Y 和 λ 的关系

(b) Relation between Y and λ when φ changed

图 7 保偏光纤熔接角度 φ 变化时反射率 Y 和波长 λ 的关系

Fig. 7 Relation between Y and λ when φ changed

图 7(a) 是保偏光纤两端偏振方向夹角 φ 连续变化时 Y 和 λ 的关系图, (b) 是 φ 为 0、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ 、 π 时 Y 和 λ 的关系图。由图可知, 当 $\varphi=0, \pi$ 时, Y 始终为 1, 随 λ 变化灵敏度为 0, 此时代无论 λ 如何变化, Y 均不变, 此时 $Y_1=1, Y_2=0$, 两束相向传输的光场同时从保偏光纤的长轴或者短轴传输, 光纤环境退化为普通 FLM; 当 $\varphi=\pi/2$ 时, Y 随 λ 变化灵敏度最高, $Y_1=0, Y_2=1$; φ 为其它值时, $Y_1 > 0, Y_2 < 1$, 且 φ 值越接近 $\pi/2$ 时 Y_1 越小, Y_2 越大, 灵敏度越高。故在搭建传感系统时应尽量使 φ 接近 $\pi/2$ 。

由仿真结果知, Y_1, Y_2 的大小只与结构参数 K, L, φ 有关。 Y_1 代表 Y 随 λ 变化的直流分量, 越小越好, Y_2 反映了 Y 随 λ 变化的灵敏度, 越大

越好,与理论分析结果一致。

3 实验验证

为验证上述理论和仿真结果,研究 FLM 各参数对光纤光栅传感系统精度特性的影响,搭建了测试系统。

光路部分:系统采用可调谐激光器 AQ4321D 模拟光纤光栅反射波长变化。可调谐激光器带宽 0.01 nm,最小调谐精度 0.001 nm;武汉光迅生产的宽带耦合器(K 约为 0.5 和 0.95);北京长飞生产的熊猫型保偏光纤 PM1017-A,拍长 <4 mm;使用 AQ6370 光谱分析仪同步对比检测,最小分辨率 0.02 nm。选取 $L=2$ m、 $K=0.5$ 、 $\varphi=\pi/2$ 构建测试系统。

电路部分:PIN 管灵敏度 0.85 A/W;模拟单刀双掷开关 ADG711,导通电阻 $1\ \Omega$; $I-U$ 转换电路由低温漂运放 AD626 构成;由 16 位精度 A/D 转换芯片 MAX7705 采集电压信息,数据采集频率 1 Hz/s。

软件部分:可调谐激光器在 1 550~1 560 nm 范围内多次扫描,参数测定软件采集数据并计算 Y_1 、 Y_2 值。依据参数测定软件采集到的数据得出 $Y_1=0.993\ 07$ 、 $Y_2=0.951\ 49$ 。

图 8 为监控软件后面板(前面板略):

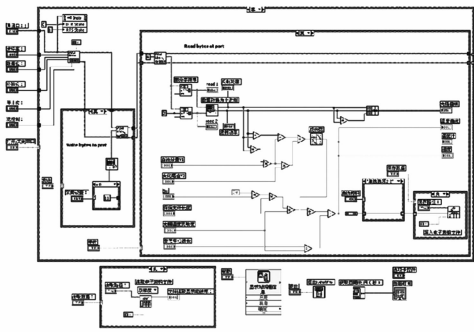


图 8 解调系统监控软件后面板图

Fig. 8 Back-panel figure of monitoring software for demodulation system

采用 FLUKE50S 型单通道热电偶测温仪 K 型浸入式探头进行同步对比实验。该测温仪显示分辨率 $0.1\ ^\circ\text{C}$,K 型浸入式探头测温范围 $-196\sim$

$1\ 090\ ^\circ\text{C}$ 。将本实验室自制裸光纤光栅无应力粘贴在探头上,直接将探头浸入水中,同时读取测温仪数据和本实验装置数据。图 9 显示光栅传感头监测热水降温过程温度变化图。图中有两处波动,是由于传感头为裸光栅,未进行免应力封装,受外界震动引起。

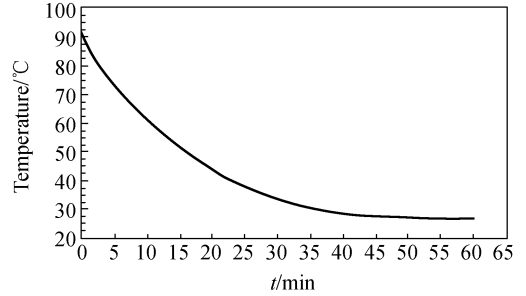


图 9 热水降温过程温度变化图

Fig. 9 Temperature changing figure when the hot water turned to cool

结果显示该系统对温度的测量平均精度可达 $0.03\ ^\circ\text{C}$ (相当于 $0.3\ \text{pm}$),准确度 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ (相当于 $1\ \text{pm}$)。精度和准确度小于用激光器模拟温度变化时测量结果,是因为普通光栅反射谱带宽 ($\leq 0.1\ \text{nm}$) 比激光器宽,且温度升高引起的光栅啁啾,均导致精度降低。该系统虽然大大提高了稳定性,但并未完全杜绝环境的影响,温度对保偏光纤 B_m 的影响在 10^{-3} 数量级,对环境温度仍有一定依赖性,但远远小于其它干涉解调方案。

4 结论

本文建立了传感系统结构的理论模型,在分析系统结构参数对光纤环境特性影响的基础上,设计了基于保偏型 FLM 的光纤光栅传感解调系统和基于 LabVIEW 的参数测定软件、解调系统监控软件,并对系统进行了实验验证,理论分析与数值仿真结果和实验相吻合。与其它解调仪相比,参数测定软件和解调系统监控软件的应用降低了对搭建光路系统的设备要求,使得该系统易于搭建。该系统采用全光纤结构,易于实现小型化,有较好的偏振独立性和稳定性,可适用于强磁

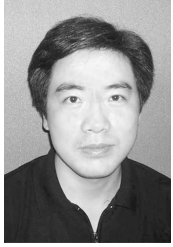
场、有污染、腐蚀性大等基于电路的传感器无法应用的恶劣环境,也适用于高精度的温控设备和振

动较强的桥梁健康检测,对光纤光栅传感器在应用领域的推广具有重要意义。

参考文献:

- [1] 余有龙,谭华耀.有源波、空分复用光纤光栅传感网络[J].中国激光,2002,29(2):131-134.
YU Y L, TAN H Y. Active spatial wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Laser*, 2002, 29(2): 131-134. (in Chinese)
- [2] 桑新柱,余重秀,颜纷纷,等.基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J].光学精密工程,2006,14(5):771-774.
SANG X ZH, YU CH X, YAN B B, *et al.*. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 771-774. (in Chinese)
- [3] 唐婷,史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J].光学精密工程,2002,10(1):79-83.
TANG T, SHI Y K. Optical fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 79-83. (in Chinese)
- [4] MOREY W W. Recent advances in fiber grating sensors[J]. *SPIE*, 1996, 2594: 90-98.
- [5] 庄其仁,龚冬梅,曾永西.啾啾效应对 Bragg 波长匹配解调精度的影响与消除[J].光学精密工程,2005,13(3):364-370.
ZHUANG Q R, GONG D M, ZENG Y X. Influence of chirp effect s on FBG wavelength2matched demodulation precision and it' s elimination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (3): 364-370. (in Chinese)
- [6] 余永龙,谭华耀,锤永康.基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J].光学学报,2001,21(8):987-989.
YU Y L, TAN H Y, CHUNG Y K. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21 (8): 987-989. (in Chinese)
- [7] 李建中,饶云江,冉曾令.基于可调环形光纤激光器的动态应变传感系统[J].光电子·激光,2008,19(2):146-148.
LI J ZH, RAO Y J, RAN Z L. A dynamic strain sensor system based on a tunable fiber ring laser [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19 (2): 146-148. (in Chinese)
- [8] ZHANG J L, YU C X, WANG K R, *et al.*. Demodulation system for phase-locked fiber grating sensors based on XPM [J]. *SPIE*, 2007, 6781: 67812L-1-67812L-8.
- [9] 张锦龙,余重秀,王葵如,等.基于啾啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J].光学学报,2008,28(4):779-781.
ZHANG J L, YU CH X, WANG K R, *et al.*. The displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 779-781. (in Chinese)
- [10] 黄永林,钟嵘,项阳,等.用光纤光栅的啾啾效应实现温度不敏感的位移测量[J].中国激光,2002,29(11):1015-1018.
HUANG Y L, TONG ZH R, XIANG Y, *et al.*. Temperature-insensitive displacement sensing using the chirp effect of fiber bragg grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, 29 (11): 1015-1018. (in Chinese)
- [11] 胡志新,朱军,张陵.新型高准确度光纤光栅压力传感系统[J].光子学报,2006,35(5):709-711.
HU ZH X, ZHU J, ZHANG L. A new type of fiber grating pressure sensing system with high accuracy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35 (5): 709-711. (in Chinese)
- [12] 乔学光,贾振安,傅海威,等.光纤光栅温度传感理论与实验[J].物理学报,2004,53(2):494-497.
QIAO X G, JIA ZH A, FU H W, *et al.*. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2004, 53 (2): 494-497. (in Chinese)
- [13] CHUNG S H, KIM J, YU B A, *et al.*. A fiber bragg grating sensor demodulation technique using a polarization maintaining fiber loop mirror [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001 (13): 1343-1345.

作者简介:



张锦龙(1977—),男,河南开封人,讲师,2005年获硕士学位,现在北京邮电大学攻读博士学位,主要从事光纤传感、光纤通信方面的研究。E-mail:ZJL@henu.edu.cn



王葵如(1962—),女,北京人,副教授,北京邮电大学硕士研究生导师,主要从事光纤通信与光纤传感技术的研究。E-mail:krwang@bupt.edu.cn



林妹妹(1985—),女,福建福州人,2007年于北京邮电大学获学士学位,现为北京邮电大学硕士研究生,主要从事光纤传感技术与 OCDMA 的研究。E-mail:linjin8618@gmail.com



赵德新(1983—),男,天津人,2006年于北京邮电大学获学士学位,现为北京邮电大学硕士研究生,主要从事光纤通信和光纤传感技术的研究。E-mail:zdx5483@gmail.com



李成(1984—),男,湖北荆州人,2006年于武汉大学获学士学位,现为北京邮电大学硕士研究生,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail:intermeelay@gmail.com

导师简介:



余重秀(1946—),女,湖北沙市人,教授,博士研究生导师,1969年于北京邮电大学获学士学位,主要从事光交换、光纤通信与光纤传感技术的研究。E-mail:cxyu@bupt.edu.cn

● 下期预告

直线型磁性流体行波泵实验装置

赵 猛,邹继斌,尚 静,齐 明

(哈尔滨工业大学 电气工程系,黑龙江 哈尔滨 150001)

磁性流体行波泵作为磁性流体的典型应用已经得到了普遍的关注。行波磁场的产生、泵体结构的设计、磁性流体的动力学特性等均为磁性流体行波泵研究的关键技术。根据行波磁场产生的形式设计了直线型磁性流体行波泵,采用解耦计算分析和求解了磁性流体内行波磁场和力场的耦合问题。通过仿真和实验研究验证了设计的合理性和可行性。行波磁场作用下的磁性流体流量与磁场的强度有直接关系:在磁性流体行波泵结构、磁性流体饱和磁化强度相同的条件下,磁场强度越强,其流量越大。当磁场强度从 25 900 A/m 增加到 40 000 A/m,单位时间内,从行波泵内流出的磁性流体的体积由 1.9ml 增加到 3.1 ml。随着磁场强度的不断增加,由于磁场对磁性流体粘度的影响其流量的变化率在减小。磁性流体的饱和磁化强度越大,其流量也越大。