

# 基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅解调系统

邹红波<sup>1,2</sup> 梁大开<sup>1</sup> 曾捷<sup>1</sup> 李堃<sup>1</sup> 周怡妃<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌, 443002)

**摘要:**提出了一种基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅解调系统。级联长周期光纤光栅作为边沿滤波器, 利用它的一个线性区监测单个光纤布拉格光栅传感信号。该系统具有结构简单、价格低等优点, 但易受光源抖动及系统其他不稳定因素等带来的系统噪声的影响。为消除系统噪声带来的不利影响, 对该系统进行了改进。改进系统利用级联长周期光纤光栅的两个线性区同时监测两个光纤布拉格光栅传感信号。分别用原系统及其改进系统对温度进行监测, 实验的温度测量范围为 $-70\sim-115\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。原系统的灵敏度为 $0.49\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ , 温度分辨率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 改进系统的灵敏度为 $0.86\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ , 温度分辨率为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验结果表明改进系统能有效消除系统噪声, 提高系统的精度。

**关键词:**级联长周期光纤光栅; 光纤布拉格光栅; 解调; 边沿滤波器

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2011)06-0723-05

## FBG Demodulation System Based on Cascaded Long-Period Fiber Grating

Zou Hongbo<sup>1,2</sup>, Liang Dakai<sup>1</sup>, Zeng Jie<sup>1</sup>, Li Kun<sup>1</sup>, Zhou Yifei<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Electric Engineering and Renewable Energy, Three Gorges University, Yichang, 443002, China)

**Abstract:** A demodulation system of fiber Bragg grating (FBG) based on a cascaded long-period fiber grating (CLPG) is presented. A key interrogating component of this system is CLPG which acts as an edge filter converting wavelength variation into optical power measurement, thus realizing a FBG sensing signal monitoring by one linear region of CLPG. This system has some advantages such as a simple structure and low cost. However, it is inevitably influenced by system noise such as broadband optical source fluctuations, power fluctuations and so on. In order to eliminate the adverse effect of system noise, an improved demodulation system is proposed. The improved system simultaneously monitors two FBG sensing signals by two linear regions of CLPG. Using the original system and the improved system to monitor temperature, the experimental measurement range of temperature is  $-70\sim-115\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The sensitivity of original system is  $0.49\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  and its temperature resolution is  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In contrast with original system, the sensitivity of improved system is  $0.86\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  and its temperature resolution is  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Experimental results show that the improved system can effectively eliminate system noise, thus improving the accuracy of the system.

**Key words:** cascaded long-period fiber grating; fiber Bragg grating; demodulation; edge filter

**基金项目:**国家自然科学基金(60907038)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2009370)资助项目;中国博士后科学基金(20090461116)资助项目;江苏省博士后科研资助计划(1001010B)资助项目;611航空科研基金资助项目。

**收稿日期:**2010-09-10; **修订日期:**2011-05-16

**通讯作者:**梁大开,男,教授,博士生导师,1956年生, E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn。

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)由于具有柔软、可挠曲、尺寸小、质量轻、电绝缘、耐腐蚀、工作中不发热、无辐射、抗电磁干扰且能在易燃易爆、毒性气体等复杂环境条件下工作等优点,已在很多领域获得了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。

波长解调技术是FBG传感系统的关键技术之一。通常采用光纤光栅匹配滤波法<sup>[1-4]</sup>、可调谐法布里珀罗腔法<sup>[5]</sup>等进行波长编码的解调。其中光纤光栅匹配滤波法结构简单但精度不高;可调谐法布里珀罗腔法精度较高但价格昂贵。目前市场上专用FBG解调仪多基于可调谐法布里珀罗腔法,但价格昂贵,限制了在工程中的应用。

级联长周期光纤光栅(Cascaded long-period fiber grating, CLPG)是由两个参数相同的均匀长周期光纤光栅和一段普通单模光纤连接而成,级联后可以获得比单个LPG更好的光谱性能。在光纤通信领域,CLPG可制作成为隔离度很高的密集波分复用滤波器<sup>[6]</sup>。在光纤传感领域,CLPG已被设计为性能优良的、折射率传感器和负载传感器<sup>[7]</sup>。本文采用级联长周期光纤光栅作为边沿滤波器,搭建了FBG解调系统及其改进系统,具有结构简单、价格低等优点,为FBG的工程化应用提供了一种可行的解调方案。

## 1 解调原理

基于级联长周期光纤光栅(CLPG)的FBG解调原理如图1所示。

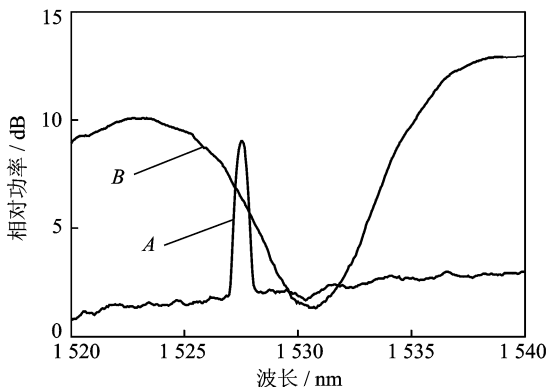


图1 基于CLPG的FBG解调原理图

图1中,曲线A为FBG的反射光谱,曲线B为CLPG的透射光谱,FBG反射光经CLPG滤波后的光功率信号 $I(\lambda)$ 为

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda')H(\lambda')d\lambda' \quad (1)$$

式中: $R(\lambda)$ , $H(\lambda)$ 分别为FBG的反射光谱和CLPG的透射光谱。在一定的波长范围内 $H(\lambda)$ 近似为线

性函数,而 $R(\lambda)$ 的光谱宽度远小于该波长范围,故 $I(\lambda)$ 也近似为线性函数,即

$$I(\lambda) \approx H(\lambda) \cdot I_1(\lambda) \quad (2)$$

式中: $I_1(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda')d\lambda'$ ,为FBG的反射谱总功率,则

$$H(\lambda) \approx I(\lambda)/I_1(\lambda) \quad (3)$$

由式(3)可知:通过测量 $I(\lambda)/I_1(\lambda)$ 的值即可获得波长信息,从而实现对FBG波长的检测。

## 2 解调系统组成

基于CLPG的FBG解调系统如图2所示,系统由光源、耦合器、传感FBG、滤波CLPG、光电探测器、数据采集卡和PC机构成。

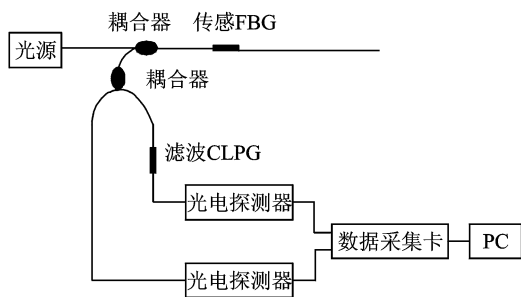


图2 基于CLPG的FBG解调系统组成图

该解调系统中光源采用宽带光源,光源的输出谱在1 520~1 560 nm范围内具有一段平坦区。实验中选用的FBG的中心波长为1 527 nm,其反射光谱曲线见图1中曲线A。级联长周期光纤光栅由两段均匀长周期光栅和普通单模光纤连接而成,实验中选用的两段均匀长周期光栅的栅区长度均为4 cm,用于连接两段均匀长周期光栅的单模光纤的长度为10 cm。级联长周期光纤光栅的中心波长为1 530 nm,其透射光谱曲线见图1中曲线B。由曲线B可以看出,光谱峰值附近波长范围分别为1 522~1 528 nm,1 532~1 538 nm处的光强与波长近似为线性关系。光电探测器可将波长范围在1 100~1 700 nm的光信号转化为电压信号。采用的数据采集卡为NIDAQCard-6024E,设定采样频率为100 kHz,采集的电压信号输入计算机进行处理。

## 3 解调系统的温度实验

由于FBG对温度和应变较为敏感,因而可以通过温度实验或应变实验来测试解调系统的性能。本文选用温度实验对解调系统的性能进行测试。温度测量大多为常温及高温测量,但考虑到一些特殊情况下的低温测量要求(如飞机在日常训练和战斗

飞行时,经常有达到 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下温度的过冷气流),故温度实验环节除了常规的高温实验,还包括低温实验。

### 3.1 高温实验

将传感FBG放入DH401CT温控箱内,该温控箱的最高温度可达 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验时将箱内温度由室温升至 $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量一次,在达到设定温度后保温 $10\text{ min}$ 。采用上述解调系统测定输出电压,结果如图3所示。

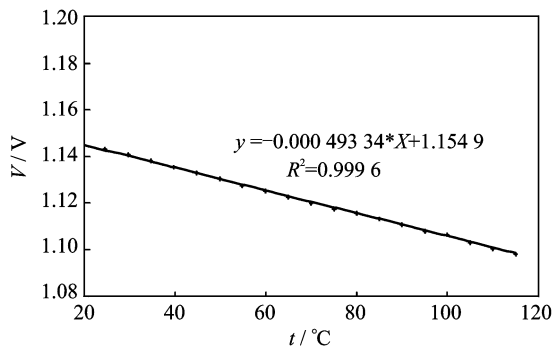


图3 输出电压与高温曲线

图3可以看出,该解调系统的输出电压与高温成线性关系,其直线斜率为 $0.49334\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

同时对传感FBG的波长偏移量与高温特性进行测量。温度由室温升至 $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量一次,在达到设定温度后保温 $10\text{ min}$ 。用光谱仪记录此时的波长值,得到的实验结果如图4所示。

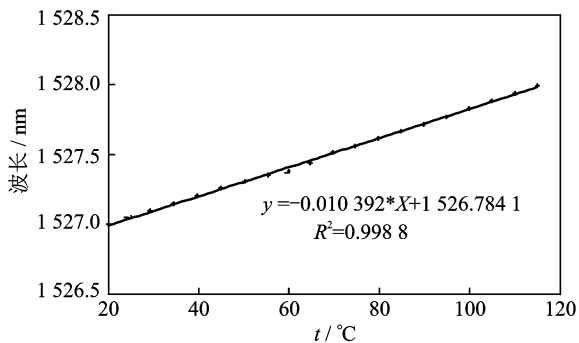


图4 波长漂移与高温曲线

由图4可以看出,传感FBG的波长漂移与高温成线性关系,其直线斜率为 $10.392\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.2 低温实验

将传感FBG放入ACS CHALLENGE250温控箱内,该温控箱的最低温度可达 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验时将箱内温度由室温降至 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量一次,在达到设定温度后保温 $10\text{ min}$ 。采用上述解调系统测定输出电压,结果如图5所示。

由图5可以看出,该解调系统的输出电压与低

温成线性关系,其直线斜率为 $0.49419\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

同时对传感FBG的波长偏移量与低温特性进行测量。温度由室温降至 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量一次,在达到设定温度后保温 $10\text{ min}$ 。用光谱仪记录此时的波长值,得到的实验结果如图6所示。

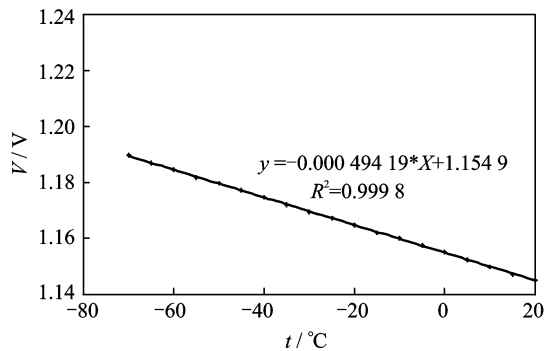


图5 输出电压与低温曲线

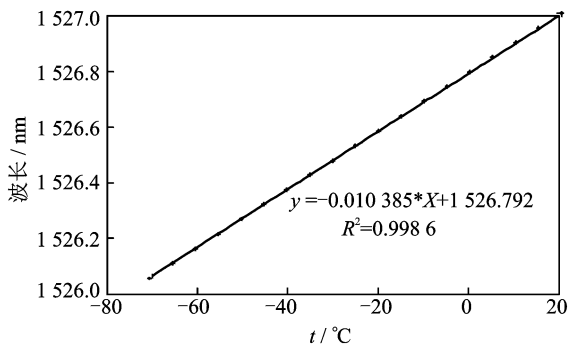


图6 波长漂移与低温曲线

由图6可以看出,传感FBG的波长漂移与低温成线性关系,其直线斜率为 $10.385\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.3 数据分析

由图3,4可知,高温情况下输出电压与波长漂移关系为 $0.0475\text{ mV}/\text{pm}$ ;由图5,6可知,低温情况下输出电压与波长漂移关系为 $0.0476\text{ mV}/\text{pm}$ ,两者近似相等。验证了当FBG波长在级联长周期光纤光栅的线性区移动时,级联长周期光纤光栅的透射光强与FBG波长偏移量成线性关系。

系统中采用的光电探测器能够探测到的最小电压变化为 $0.25\text{ mV}$ ,则可测的最小FBG波长偏移量为 $0.005\text{ nm}$ 。对应于本实验,该系统的温度分辨率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 4 解调系统的改进

### 4.1 改进系统的原理

前面的解调系统中,CLPG作为FBG的解调器,只在它的线性区内监测一个FBG中心波长信号的功率变化。当待测量变化时,这个被监测FBG

中心波长的信号功率就会发生相应的变化,利用这一关系实现了FBG传感信号的解调。然而被监测信号中往往掺杂有光源抖动以及系统其他不稳定因素等带来的噪声,给系统带来较大误差,降低系统的精度。

为消除噪声带来的不利影响,提高系统的精度,可利用CLPG的宽谱特性,在CLPG透射谱正负斜率线性区域内各监测一个FBG中心波长处的信号功率变化,如图7中的 $P_1$ 和 $P_2$ 。其中 $P_1$ 为中心波长为1 527 nm(位于1 522~1 528 nm负斜率线性区)的FBG1经CLPG调制后的光功率, $P_2$ 为中心波长为1 533 nm(位于1 532~1 538 nm正斜率线性区)的FBG2经CLPG调制后的光功率。 $P_1, P_2$ 均与待测量有关。在CLPG的线性区内, $P_1, P_2$ 与波长 $\lambda$ 的关系为

$$P_1 = K_1 \cdot \lambda + C_1 \quad (4)$$

$$P_2 = K_2 \cdot \lambda + C_2 \quad (5)$$

式中的 $K_1, K_2, C_1, C_2$ 均为常数。

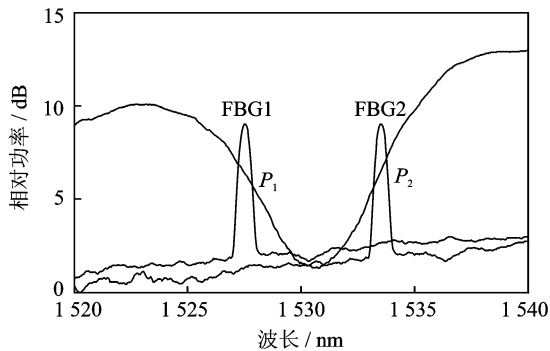


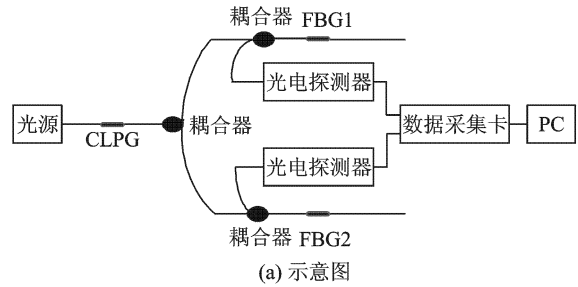
图7 CLPG和FBG的光谱图

考虑到CLPG的透射谱在正负斜率线性区域具有近似对称特性,故 $K_1 \approx -K_2$ 。引入变量 $\Delta P = (P_1 - P_2)/(P_1 + P_2)$ ,则

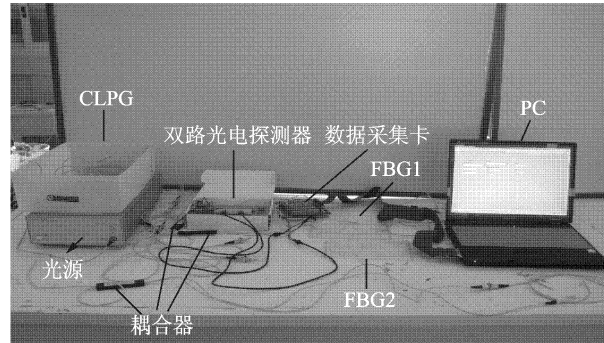
$$\Delta P = \frac{2K_1}{C_1 + C_2} \cdot \lambda + \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (6)$$

由于 $P_1$ 和 $P_2$ 是由光源发出的光经FBG1和FBG2反射后再进入CLPG,是在同一条件下同时测得的,又因为它们分别位于CLPG透射谱的负斜率区和正斜率区,在温度变化时 $P_1$ 和 $P_2$ 的变化趋势相反,所以尽管 $P_1$ 和 $P_2$ 中可能包含光源抖动以及系统其他不稳定因素等带来的噪声,但经过处理后的 $\Delta P$ 仅与待测信号有关,因而能有效滤除系统噪声。

改进后的解调系统示意图和实物图分别如图8(a,b)所示。



(a) 示意图



(b) 实物图

图8 改进后的解调系统组成图

## 4.2 改进系统的高温实验

将FBG1(中心波长为1 527 nm)和FBG2(中心波长为1 533 nm)同时置入温控箱内,重复前面的实验过程。图9为高温情况下FBG1,FBG2的反射光强(通过光电探测器用电压 $V_1, V_2$ 反映)随温度变化的工作曲线。

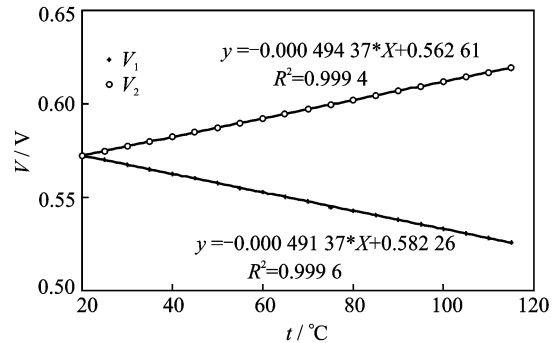
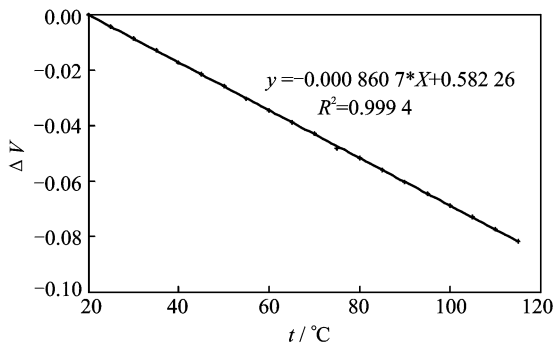
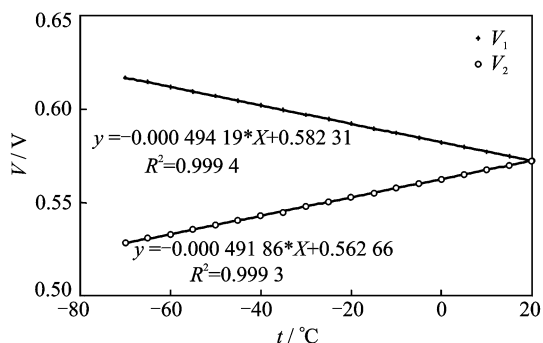


图9  $V_1, V_2$ 与高温曲线

由图9可以看出,电压 $V_1$ 随温度升高而降低,其直线斜率为 $0.49137 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。电压 $V_2$ 随温度升高而增加,其直线斜率为 $0.49437 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。根据 $V_1$ 和 $V_2$ ,可得 $V = (V_1 - V_2)/(V_1 + V_2)$ 与高温关系曲线,如图10所示。图10可以看出 $V$ 与高温成线性关系,其直线斜率为 $0.8607 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。改进系统灵敏度为原系统的1.75倍。

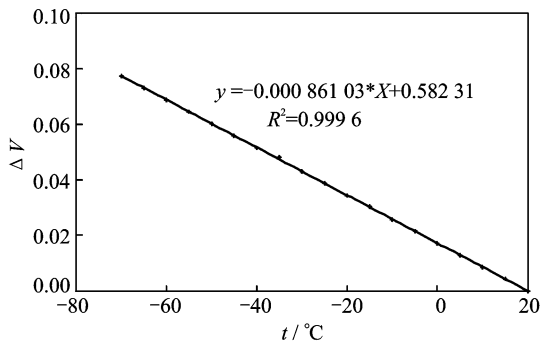
## 4.3 改进系统的低温实验

低温情况下同样可得FBG1,FBG2的反射光强随温度变化的工作曲线,如图11所示。

图10  $\Delta V$  与高温曲线图11  $V_1, V_2$  与低温曲线

由图11可以看出,电压 $V_1$ 随温度降低而增大,其直线斜率为 $0.49419\text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。电压 $V_2$ 随温度降低而减小,其直线斜率为 $0.49186\text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。

$\Delta V$ 与低温关系曲线如图12所示。由图12可以看出, $\Delta V$ 与低温成线性关系,其直线斜率为 $0.86103\text{ mV}/^\circ\text{C}$ 。改进系统灵敏度为原系统的1.74倍。

图12  $\Delta V$  与低温曲线

#### 4.4 实验结果讨论

改进系统的高温及低温实验表明,改进系统与原系统相比系统精度得到显著提高。原系统的灵敏度为 $0.49\text{ mV}/^\circ\text{C}$ ,波长分辨率为 $0.005\text{ nm}$ ,温度分辨率为 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ;改进系统的灵敏度为 $0.86\text{ mV}/^\circ\text{C}$ ,

波长分辨率为 $0.003\text{ nm}$ ,温度分辨率为 $0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

本文提出的解调系统与基于可调谐F-P腔的FBG解调仪(如sim425)相比,具有结构简单、价格低等突出优点,其缺点是解调精度不如sim425(波长分辨率为 $0.001\text{ nm}$ )。而sim425尽管精度较高,但价格昂贵。

## 5 结束语

本文设计了一个基于CLPG的FBG解调系统。利用该系统对温度进行监测,实验的温度测量范围为 $-70\sim-115\text{ }^\circ\text{C}$ ,温度分辨率为 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。该系统结构简单、成本低,具有较好的线性输出,但该系统易受光源抖动及系统其他不稳定因素等带来的噪声的影响。为克服噪声对系统的影响,提出了一种改进的解调系统。改进系统温度分辨率为 $0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。与原系统相比,改进系统能显著提高系统精度。

#### 参考文献:

- [1] Sohn K R, Shim J H. Liquid-level monitoring sensor systems using fiber Bragg grating embedded in cantilever [J]. Sensors and Actuators A, 2009, 152 (2): 248-251.
- [2] Zhan Y G, Wu H, Yang Q Y, et al. A multi-parameter optical fiber sensor with interrogation and discrimination capabilities [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1317-1321.
- [3] Dai Y B, Liu Y J, Leng J S, et al. A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(10): 1028-1033.
- [4] Davis M A, Kersey A D. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays [J]. Electronics Letters, 1995, 31(10): 822-823.
- [5] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strainsensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter [J]. Optics Letters, 1993, 18(16): 1370-1372.
- [6] Jeon S W, Hann S, Park C S. All-optical clock extraction from 40-Gbit/s NRZ data using cascaded long-period fiber grating [J]. Optical Fiber Technology, 2010, 16 (3): 172-177.
- [7] Frazao O, Correia C, Baptista J M, et al. Ring fiber laser with interferometer based in long period grating for sensing applications [J]. Optics Communications, 2008, 281(22): 5601-5604.