

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208789

基于 F-P 可调谐滤波器的光纤光栅解调系统设计

文丰 张岩 贾兴中

(中北大学电子测试技术重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对某结构应力监测系统,提出应用光纤光栅传感原理来测量结构应力,设计了基于光纤标准具的 F-P 可调谐滤波器光纤光栅解调系统。利用标准具的稳定性来对 F-P 滤波器进行标定,消除环境温度对 F-P 滤波器的干扰。利用 DDS 原理设计了 F-P 滤波器的驱动源,产生的三角波分辨率可以小于 0.42 mV,确保解调系统最终的分辨率达到 1 pm。设计了光电转换电路,实现了微弱光信号的转换和放大,最后转换成易于采集与显示的电压信号。最终,利用本次设计的解调系统可以实现 $\pm 3\ 000\ \mu\epsilon$ 的应变测量,测量精度可达到 2.59%。

关键词: 光纤光栅;F-P 滤波器;光纤标准具;DDS;应变

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Design of fiber grating demodulation system based on F-P tunable filter

Wen Feng Zhang Yan Jia Xingzhong

(State Key Laboratory of Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at a structural stress monitoring system, it is proposed that using the principle of fiber grating sensing to measure structural stress. A F-P tunable filter fiber grating demodulation system based on fiber etalon is designed. Using the stability of the etalon to calibrate the F-P filter to eliminate the interference of the ambient temperature on the F-P filter. The driving source of the F-P filter is designed by using the DDS principle, and the resolution of triangle wave can be less than 0.42 mV, ensuring that the final resolution of the demodulation system reaches 1 pm. The photoelectric conversion circuit is designed to realize the conversion and amplification of the weak light signal, and finally it is converted into a voltage signal that is easy to collect and display. Finally, the demodulation system designed in this paper can achieve a strain measurement of $\pm 3\ 000\ \mu\epsilon$, and the measurement accuracy can reach 2.59%.

Keywords: fiber grating; F-P filter; fiber etalon; DDS; strain

0 引言

自从 1978 年加拿大科学家 Hill 等研制了第一只光纤光栅,光纤光栅传感技术得到了持续发展^[1]。通过对光纤光栅的写制技术的不断改进,从最初的驻波法到后来的相位掩模法以及利用飞秒激光进行刻制^[2]。现如今,一方面可以制作出性能更加出色的光纤光栅,另一方面光纤光栅的制作成活率有了质的提升,使得光纤光栅可以实现大规模的生产,这对光纤光栅传感技术的飞速发展至关重要。与此同时,光纤光栅解调技术也随着实际工程的需要在不断地改进,目前的解调技术大致有光谱仪解调法、匹配光栅解调法、边沿滤波器解调法、干涉解调法等^[3]。现在,F-P 滤波器解调法由于其高分辨率、宽波长解调范围以及良好的光谱特性等优点已被广泛应用^[4]。2016 年,张佳鹏等提

出采用 F-P 滤波器来搭建光纤光栅解调系统。但是,由于 F-P 滤波器的腔长是通过压电陶瓷来控制,压电陶瓷的迟滞性和蠕变性会使解调结果不稳定^[5]。为了达到克服这种解调不稳定的目的,本次研究采用光纤标准具来标定 F-P 滤波器,使 F-P 滤波器的驱动电压与扫描波长之间的关系式趋于稳定,实现了解调系统的优化。

1 光纤光栅应变传感原理以及仿真验证

应变作用在光纤光栅上会引起栅格周期发生变化,对光纤光栅的拉伸或者挤压都会让栅区发生形变^[6]。另外,光纤光栅的弹光效应会让纤芯的有效折射率改变。这两者的变化最后会使 Bragg 光纤光栅的中心波长发生偏移,光纤光栅工作原理如图 1 所示。

根据光纤耦合模理论^[7],可以得到光纤光栅 Bragg 波

收稿日期:2022-01-07

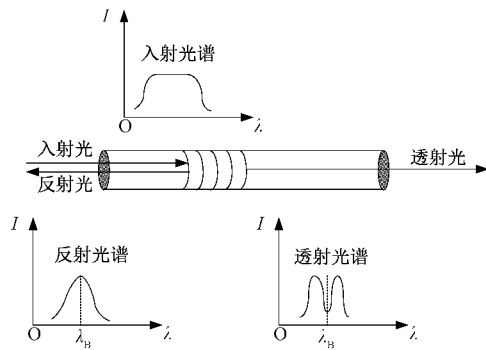


图 1 光纤光栅工作原理

长的关系式:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为光纤光栅的中心波长,即 Bragg 波长, n_{eff} 表示纤芯的有效折射率, Λ 是光栅周期。当宽带光源射入 Bragg 光栅时,只有满足式(1)波长的光才会反射回去,其他的波长会透射出去。假设光纤光栅只受轴向应力作用,并且环境温度不变,则光栅的 Bragg 波长变化量为式(2):

$$\Delta\lambda_B = 2 \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \Delta L \Lambda + 2n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \Delta L \quad (2)$$

式中: ΔL 为光纤光栅的长度变化量, $\frac{\partial n_{eff}}{\partial L}$ 为弹光效应。

光纤光栅为各向同性柱体结构,满足胡克定理^[8]。在实际应用中光纤光栅几乎不受横向受力作用,可以忽略。均匀轴向应变引起波长偏移的纵向应变灵敏度公式为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - (P_{11} + P_{12})\nu] \right\} \epsilon_{zz} = (1 - P_e) \epsilon_{zz} = S_e \epsilon_{zz} \quad (3)$$

式中: S_e 为光纤光栅相对波长偏移应变灵敏度系数。以纯石英光纤光栅为前提,其各参数为: $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$, $\nu = 0.17$, $n_{eff} = 1.456$, 可得光纤光栅相对波长偏移一应变灵敏度系数 $S_e = 0.784$ 。若光纤光栅的初始中心波长为 1 550 nm,则此光纤光栅的应变灵敏度为 1.22 pm/ $\mu\epsilon$ 。

利用 MATLAB 仿真来建立光纤光栅应变—Bragg 波长的关系模型,首先对 Bragg 光纤光栅反射谱进行仿真,仿真结果如图 2 所示。

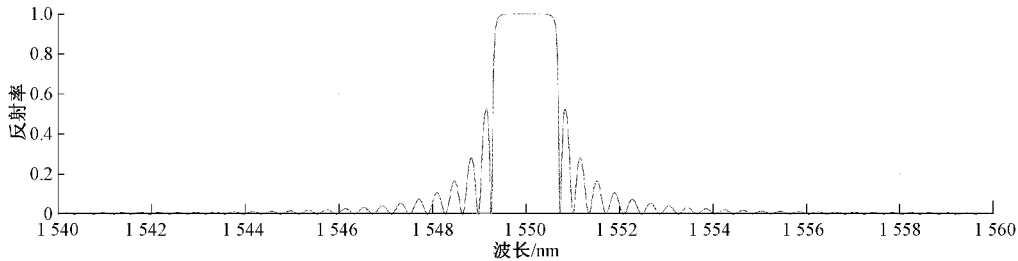


图 2 Bragg 光纤光栅反射光谱仿真结果

由仿真结果可以看出,在 1 550 nm 处的反射峰为主峰,此处的反射率接近于 100%。在主峰两侧是小的波峰,称为光纤光栅的旁瓣^[9]。光纤光栅的有效折射率的周期性变化是均匀的情况下,反射谱中的旁瓣是不可避免会出现的^[10]。而我们在利用光纤光栅实现应变测量的过程中主要是需要得到中间主峰的偏移量,所以旁瓣的存在会对我们的测量结果有一定影响。故在制作光纤光栅时采用切趾的办法来抑制旁瓣^[11]。

当光纤光栅轴向应变力发生变化时,仿真 Bragg 波长的变化情况,仿真的结果如图 3 所示。当光纤光栅在不受应变的情况下,其反射谱为红色的光谱,可以看出此时的 Bragg 中心波长为 1 550 nm。当光纤光栅受到正方向的轴向应力逐渐变大,其反射光谱如图会逐渐向右偏移,即反射谱中心波长逐渐增大。当光纤光栅收到负方向的轴向应力逐渐变大,其反射光谱如图会逐渐向左偏移,即反射谱中心波长逐渐减小。

将应变与此应变下的光纤光栅中心波长看作一组数据,当应变值不断发生变化的情况下,Bragg 波长也会随之改变。这样就得到了一组应变—波长的数据,将这一组数

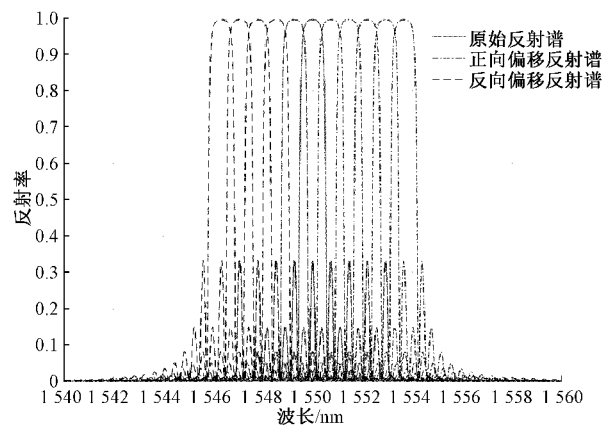


图 3 光纤光栅反射谱偏移仿真图

据进行拟合可以得到如图 4 所示应变与波长的仿真结果。

由仿真结果可以看出,光纤光栅的 Bragg 波长与所受应变成正比关系,具有完美的线性关系。在 -3 000 ~ 3 000 $\mu\epsilon$ 范围内 Bragg 波长的变化量 $\Delta\lambda_B = 1 553.646 8 - 1 546.353 2 = 7.293 6$ nm,可以计算出光纤光栅的应变灵敏度为 1.22 pm/ $\mu\epsilon$,这与理论值相符。

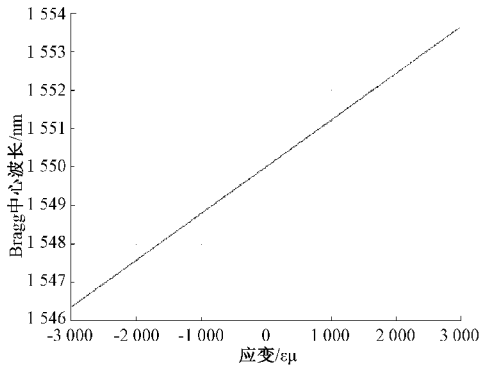


图 4 应变与 Bragg 中心波长关系仿真图

2 解调系统优化设计

本论文采用可调谐 F-P 滤波器解调法进行波长解调, F-P 滤波器是一种透射型窄带宽光学滤波器,其透射波长受 F-P 滤波器驱动电压的控制^[12]。通过改变可调谐滤波器的驱动电压,进而改变 F-P 滤波器的透射光谱,扫描 FBG 传感器。解调光路如图 5 所示,宽带光源在经过 F-P 腔后变为扫动的窄带光源,再进入传感光栅,当窄带光的波长与传感光栅的中心波长匹配时,光电探测器接收到的光强最大。再通过 F-P 腔的透射波长与驱动电压之间的对应关系解调出对应的此时光栅的反射谱波长。

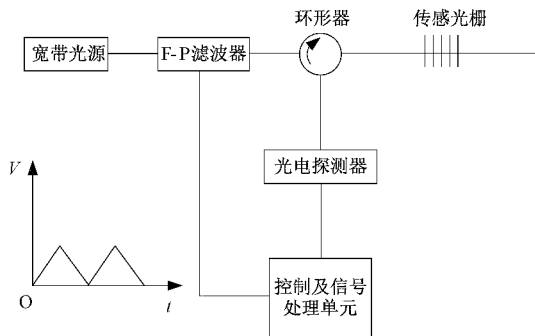


图 5 可调谐 F-P 滤波器解调法原理

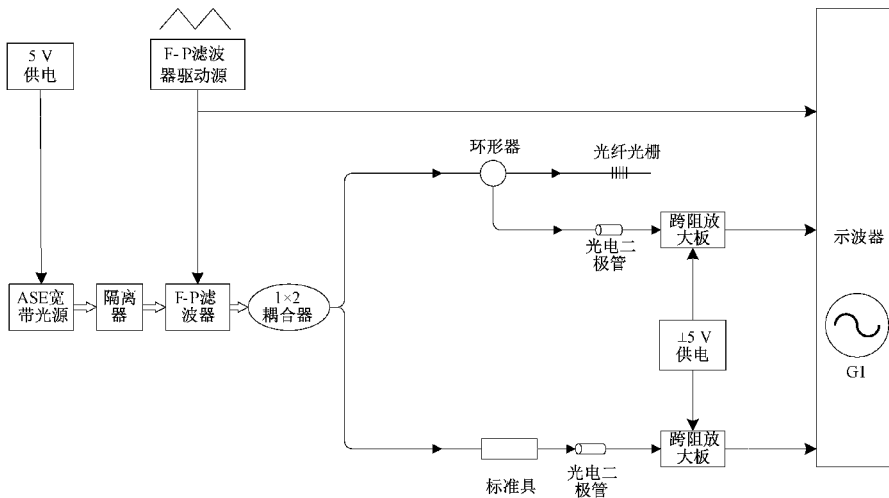


图 7 优化后 F-P 可调谐滤波器解调系统原理

传统的可调谐 F-P 滤波器解调方法具有一定的局限性,其解调效果受到压电陶瓷的迟滞性和蠕变性的影响^[13]。通过如图 5 所搭建出的解调系统解调出的结果,拟合出了光纤光栅的应变值与 F-P 腔的驱动电压之间的关系,拟合结果如图 6 所示。

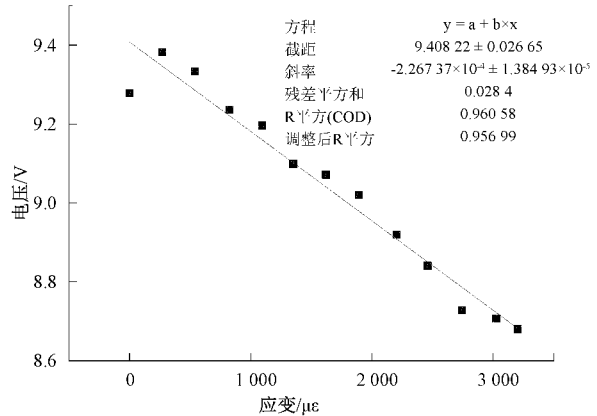


图 6 传统 F-P 滤波器解调拟合结果

由拟合结果可以看出,虽然在 $0 \sim 3000 \mu\epsilon$ 范围内电压与应变整体上具有单调性,但其线性度不够好,导致其最终的测量误差较大。为了提高解调系统的精度,采用了一种光纤标准具来对 F-P 滤波器进行校准。因为光纤标准具的稳定性比较好,其每个透射峰对应的波长值都是固定的^[14],因此可将标准具的透射波长作为标准先对 F-P 滤波器进行校准,可以得到准确的 F-P 滤波器透射波长与驱动电压的关系。在进行 Bragg 光栅的反射波长解调时只需要将光栅反射峰处对应的 F-P 滤波器的驱动电压带入上述的 F-P 滤波器透射波长与驱动电压的关系式中,得到光栅反射峰的波长,实现波长解调。本次优化的解调系统采用的光纤标准具为浦芮斯光电的 PETM1-1121212 光纤标准具,优化后的光纤光栅解调系统如图 7 所示。

如图7所示,宽带光源经F-P滤波器后变为可调谐的窄带光源,再经过 1×2 耦合器按照1:1的分光比分成两路。一路经过环形器入射到光纤光栅传感器,另一路通过标准具来标定,这两路最终通过光电探测器转换为电压信号用示波器来测量。最后对应变值与光纤光栅反射光波长进行线性拟合得到如图8所示的结果。由图8可以看出优化后的解调系统的解调结果要更稳定、准确,应变与波长线性拟合的线性度可以达到0.9988,相比传统解调系统线性度有明显的提升。

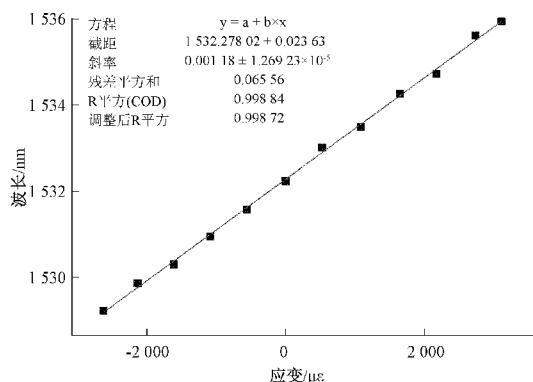


图8 应变与波长线性拟合结果

3 解调系统硬件电路设计

3.1 F-P滤波器驱动电路

F-P滤波器需要周期性变化的驱动电源来控制F-P腔腔长,进而改变F-P滤波器的透射波长,为了能够满足解调系统波长的精确扫描,需要高精度的激励源来驱动压电陶瓷。本文采用直接数字频率合成技术(DDS)来产生三角波作为F-P滤波器的驱动。FPGA内部实现相位累加器和波形存储器,将三角波的数字量发给DAC,经过数模转换最终得到想要的三角波^[15]。

经过前期F-P滤波器的驱动实验得出,驱动电压范围为 $0 \sim 16$ V时滤波器的波长扫描范围可以覆盖宽带光源的输出范围。在宽带光源范围内($1\ 527 \sim 1\ 565$ nm),为了实现解调系统的分辨率达到 1 pm,则应该设计出的驱动电压在 $0 \sim 16$ V的满量程范围内被均分的份数大于 $(38\text{ nm}/1\text{ pm}) = 38\ 000$ 份。故D/A转换器的电压建立时间要小于 $(1/38\ 000)\text{ s} = 26.32\ \mu\text{s}$,三角波的电压分辨率要小于 $(16\text{ V}/38\ 000) = 0.42\text{ mV}$ 。综合考虑,DAC芯片选用ADI公司的16位D/A转换器DA768,其主要参数如表1所示。

表1 DA768主要参数

参数	数值	单位
位宽	16	Bit
数据更新速率	30	MSPS
建立时间	25(典型值)	ns
积分非线性误差	1	LSB
微分非线性误差	1/2	LSB

利用高精度的DA转换器最后输出了满足解调要求的高分辨率的三角波,在三角波的输出电压范围设定上,参照冗余设计理念,电压范围设计为 $-0.5 \sim 16.5$ V。

3.2 光电转换电路设计

为了实现光谱信号的测量,需要将光信号转换为电信号来采集。本论文采用的光电探测器为InGaAs光电二极管,所选型号为北京敏光LSIPD-L1,其波长工作范围为 $800 \sim 1\ 700$ nm,可以完全覆盖宽带光源的输出范围。灵敏度为 0.90 mA/mW ,暗电流为 1 nA 。

光电二极管输出的为非常微弱的电流信号,要想使电信号达到后级采集电路的要求就需要经过电流—电压转换。跨阻放大电路的放大电阻为 $1\text{ M}\Omega$,光电二极管的 μA 级电流经过放大后可转为V级电压。光电转换电路设计如图9所示。

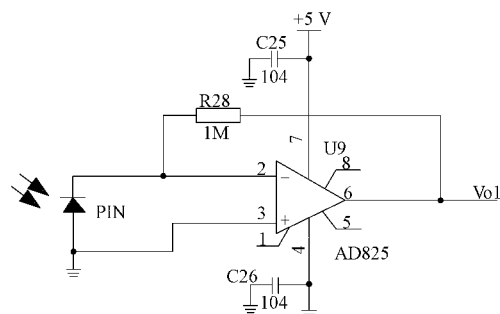


图9 光电转换电路

4 测试结果

Bragg光纤光栅的反射谱与标准具透射光经过光电转换之后再被采集,其结果如图10所示。上面的三角波为F-P滤波器的驱动电压,中间梳状波峰为标准具的透射波,下面的波峰为光纤光栅的反射波峰。

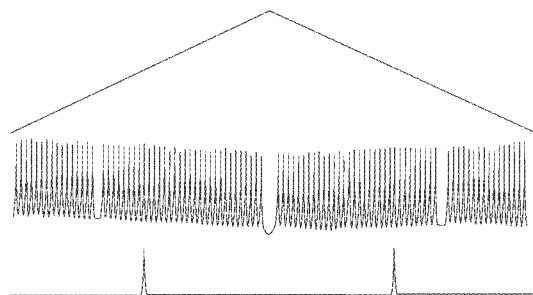


图10 光谱采集结果

在宽带光源 $1\ 527 \sim 1\ 565$ nm范围内,标准具有48个透射峰。用48个透射峰对F-P滤波器的波长—电压关系进行标定,得出实时的F-P滤波器波长—电压关系式。

之后要想得到Bragg光纤光栅的反射光波长,只需要将反射波处的三角波电压测得带入标定好的波长—电压关系式中计算出波长。如图11为F-P滤波器的波长—电压拟合结果,为二次多项式。

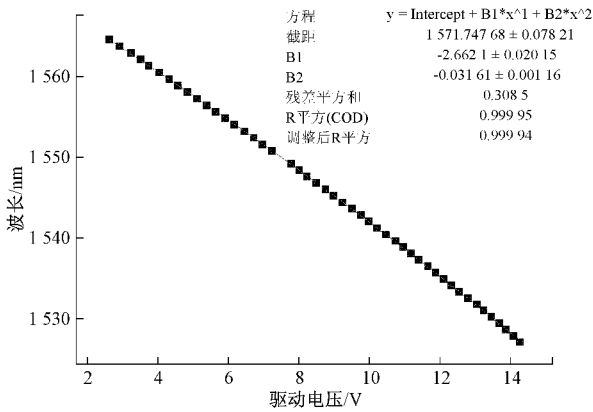


图 11 F-P 滤波器波长—电压拟合结果

为了实现光纤光栅能够测量 $\pm 3\ 000\ \mu\epsilon$ 的应变值,对光纤光栅进行与应变标定,采取 13 个应变点对 Bragg 光纤光栅进行应变—波长标定。标定数值如表 2 所示,其拟合结果如图 12 所示。

表 2 Bragg 光纤光栅标定数值

序号	应变/ $\mu\epsilon$	Bragg 光纤光栅 反射光波长/nm
1	-3 035.734	1 528.574 317
2	-2 511.039 2	1 529.169 267
3	-2 061.300 8	1 529.733 612
4	-1 574.084 3	1 530.113 267
5	-1 049.389 5	1 530.787 365
6	-524.694 8	1 531.361 383
7	0	1 532.007 214
8	524.694 8	1 532.647 458
9	1 086.867 7	1 533.251 29
10	1 611.562 5	1 534.132 114
11	2 136.257 2	1 534.873 801
12	2 660.952	1 535.457 714
13	3 110.690 4	1 535.956 014

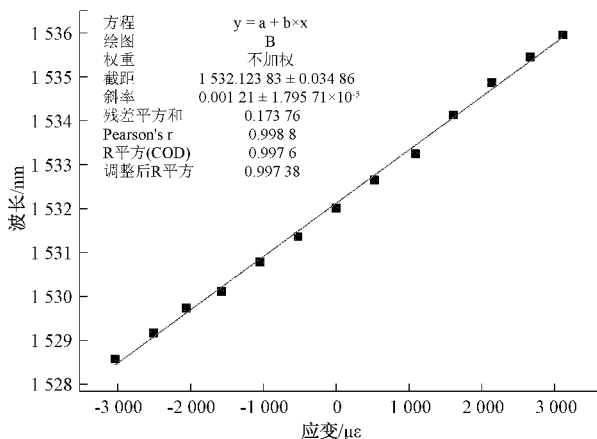


图 12 Bragg 光纤光栅应变—波长拟合结果

由图 12 的拟合结果可以看出,光纤光栅的应变与反射谱波长之间存在良好的线性关系,线性度可达到 0.997,在 13 个采样点中第 9 个采样点误差最大,最大绝对误差为 $155.08\ \mu\epsilon$ 。在 $-3\ 000\sim+3\ 000\ \mu\epsilon$ 范围内最大相对误差为 2.59%。

5 结 论

本文采用了 F-P 可调谐滤波器法进行光纤光栅的波长解调,分析了传统 F-P 滤波器解调法的劣势,提出采用光纤标准具对 F-P 滤波器进行标定的办法来提高解调精度。最后优化的结果可以使应变—波长的线性度提高到 0.99 以上。利用 DDS 原理设计了 F-P 滤波器的驱动源,可以产生高精度的三角波。设计了光电转换电路,确保光信号转换为电信号并且放大到便于后续采集电路进行采集。利用本次设计的解调系统可以实现 $\pm 3\ 000\ \mu\epsilon$ 的应变测量,测量精度可达到 2.59%。

参 考 文 献

- [1] 杜洋. Bragg 光纤光栅传感及解调系统关键技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2019.
- [2] 李一鸣. 基于 FPGA 的光纤光栅检测系统的研究与设计[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [3] 甄茜. 基于 F-P 滤波器的高精度光纤光栅解调系统研究[D]. 北京:中国运载火箭技术研究院,2019.
- [4] 王鹏飞,宋言明,王永千,等. 光纤布拉格光栅解调系统的光谱数据高速传送方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(10):65-71.
- [5] 司纪宗,朱韧,赵思伟,等. 基于压电陶瓷与光纤光栅的快速激光波长锁定系统[J]. 中国激光,2020,47(12):8-13.
- [6] 周翠荣. 光纤光栅应变传感器的若干解调技术研究[D]. 南京:南京师范大学,2011.
- [7] 鲁闯. 光纤光栅解调系统及偏差校正算法研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [8] 郭衬村. 光纤光栅传感解调系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- [9] 熊涛. 基于 FPGA 的高速光纤光栅解调仪的硬件电路设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
- [10] 张雷达. 应变光纤 Bragg 光栅传感器的研制及工业应用[D]. 济南:山东大学,2020.
- [11] 唐健峰,季树滨,车雅良,等. 光纤布拉格光栅制作中心波长控制技术[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(7):117-121.
- [12] 宋早标,熊器,万生鹏,等. 基于 F-P 腔可调谐滤波器的 FBG 振动传感系统[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2019,33(4):7-11,17.
- [13] 路元刚,王缘,彭捷钦,等. 迟滞和蠕变补偿的 F-P 滤波器波长解调方法研究[J]. 数据采集与处理,2018,33(1):12-21.

- [14] 王新彤,李山东,郑光金,等. 光纤光栅解调仪校准方法研究[J]. 宇航计测技术,2021,41(2):8-12,37.
- [15] 崔琪,顾金良,刘庆国,等. 基于 DSP+FPGA 的高速数据采集系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2020,39(1):93-98.

作者简介

文丰,博士,教授,主要研究方向为高冲击测量技术、微

系统集成技术、传感器测量技术。

E-mail: zyfighter625@163.com

张岩,硕士研究生,主要研究方向为电路与系统。

E-mail:1114960695@qq.com

贾兴中,硬件工程师,主要研究方向为电子测试仪器与系统。

E-mail:3276471951@qq.com