

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314031

基于 DDS 信号和插值法的 FBG 解调系统研究^{*}

潘睿智^{1,2} 冯艳^{1,2} 张洪涛^{1,2} 王昊祥^{1,2} 张华^{1,2}

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院机器人研究所 上海 201620;

2. 上海大型构件智能制造机器人技术协同创新中心 上海 201620)

摘要: 针对 F-P 滤波器解调法容易产生漂移与校正成本较高的问题,本文采用 FPGA 和光开关搭建了 F-P 滤波器多通道共振解调系统,该系统利用 DDS 信号生成特定的三角波驱动电压,通过串联多维参考 FBG 实现基于插值法对波长-时间的动态标定,设定了 3 种动态标定模式,包含线性关系和二次关系的标定。利用 FPGA 控制光开关实现快速切换模式与参考波长、待测波长信号的分步采集,3 种模式 100 Hz 平均偏差分别为 0.028 02 nm、0.018 14 nm、0.010 9 nm。研究结果表明,在单位电压(1 V)下,相对于静态标定,误差降低 45% 以上,提高解调精度并且降低校正成本,同时解决参考与待测波长数值过近时容易导致的误判问题。

关键词: FBG; DDS 信号; F-P 滤波器; 动态标定; 切换通道; 插值

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Research on FBG demodulation system based on DDS signal and interpolation method

Pan Ruizhi^{1,2} Feng Yan^{1,2} Zhang Hongpu^{1,2} Wang Haoxiang^{1,2} Zhang Hua^{1,2}

(1. Robotics Institute, School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Large-scale component Intelligent Manufacturing Robot Technology Collaborative Innovation Center, Shanghai 201620, China)

Abstract: To address the issue of drift and the high cost of calibration in the F-P filtering demodulation method, this paper had developed a F-P filter multi-channel resonance demodulation system using the FPGA and the fiber optic switch. The system utilizes DDS signals to generate specific triangular wave driving voltages and achieves dynamic calibration of wavelength-time by linking multiple-dimensional reference FBGs in series. Three dynamic calibration modes, including linear and quadratic relationships, are set. The FPGA-controlled fiber optic switch enables fast channel switching of modes and step-by-step acquisition of reference wavelength and wavelength signal to be measured. The average deviations in the three modes are 0.028 02 nm, 0.018 14 nm, and 0.010 9 nm, respectively, at a frequency of 100 Hz. The research results indicate that, under a unit voltage of 1 V, the deviation is reduced by over 45% compared to static calibration, improving the demodulation accuracy. Improves demodulation accuracy, reduces calibration costs and addressing the issue of misjudgment caused by the proximity of the reference and measured wavelengths.

Keywords: FBG; DDS signal; F-P filter; dynamic calibration; switching channel; interpolation

0 引言

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG),通过在纤芯内部形成周期性分布光栅而制成的无源光纤器件,利用布拉格衍射原理,对特定波长的光进行透射和反射,从而实现分光和滤波功能。相比传统的电信号类的传感器,

FBG 具有微型、抗电磁干扰、弯曲可变的材质特性可同时对温度、应变、相对湿度等物理量进行感知。因此在石油、化工、交通、医疗等领域有着广泛的应用和突出的贡献^[1-4]。解调技术对 FBG 应用有着直接影响,但现有的光纤光栅解调仪通常成本高、解调模式单一,因此解调系统正朝着低成本、低能耗、多功能、集成化发展^[5-7]。

收稿日期:2023-07-05

* 基金项目:国家自然科学基金(51665039)项目资助

常见的 SMF-28e 光纤类型和 10 mm 栅区长度的 FBG 可以实现小于 0.25 nm 和 15 dB 以上的边模抑制比,表现出良好的辨识性和准确度^[8]。基于这些特征,光谱分析法是常用的低成本直接解调方法,具体包括光谱数据传输和扫描式光谱测量^[9-10]。王鹏飞等^[11]直接利用 CCD 分光模块将反射光谱数据传入 Zynq 实现重构解调读取波长;另一种扫描式光谱测量,通过增加滤波器结合光电探测器进行光谱扫描,当滤波器与 FBG 反射光形成共振时借助已知驱动滤波器的信号和共振时间信号来推导 FBG 反射光的中心波长。

法布里-珀罗滤波器(Fabry-Perot interferometer, F-P)具有体积小驱动方便、高灵敏度、高精度特点所以在 1 kHz 频率以内的 FBG 解调有着广泛的应用。但 F-P 滤波器的透射波长受温度变化和漂移特性影响,存在非线性响应,即驱动电压与透射波长的关系(以下简称“电压-波长”)并不是理想线性关系,且波长-电压对应关系并不恒定,导致重复使用时解调结果不稳定^[12-14]。

宋早标^[15]通过将 F-P 滤波器放入恒温箱建立电压-波长的线性关系,以此提高精度,具有 99.934% 的拟合度。文丰等^[16]通过 F-P 滤波器分别串联 FBG 和参考具,分两路光电转换后接入示波器,借助参考波峰,拟合出电压-波长更优的二次关系。将解调出的波长用于应变感知具有 99.88% 的线性度效果。

但上述办法依赖于固定标定的波长-电压的对应关系,使用环境受限较大。通过嵌入式系统集成开发,面向工程应用的研究设计较少。马游春等^[17]通过现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)进行基于直接数字频率合成(direct digital synthesis, DDS)技术的非线性补偿设计,将漂移量降低至原来的 17%,拓宽了应用范围,但仍旧采用固定的电压-波长关系式,存在着 0.2 nm 的误差。

针对上述问题,本文进行了基于 F-P 滤波器解调系统的优化设计。研究 F-P 滤波器透射波长-电压关系,通过串联多维参考 FBG 的插值法,建立动态的波长-时间关系式,实时校准;以 FPGA 作为核心控制器同时进行 DA 输出与 AD 采样,保证 FBG 作为传感器采集信号的实时性的同时提高了解调系统的集成性,更适用于工程应用。

在文献[16-17]设计中,都采用了参考光源与源并联,分双路采集办法。并联的办法避免了串联时待测 FBG 波长与参考波长相近时容易被误判的问题,但需要进行两路的光电转换与信号采集,电路设计较为复杂。基于此,本文利用光开关(fiber optic switch)切换参考 FBG 通道和待测 FBG 通道,实现单路通道的分步共振,即参考 FBG 和待测 FBG 分别与 F-P 滤波器串联的高频切换,既解决了参考波长与待测波长相近的问题,又精简了电路设计。同时为多通道解调提供了硬件基础,并在文末进行了偏差测试。研究成果可进一步提升 FBG 的应用便捷性。

1 F-P 滤波器解调系统设计

本文方案根据不同的解调范围与误差要求搭建一种具有两种用途下 3 个工作模式的解调系统,具体为模式 I 和模式 II 用于未知 FBG 中心波长解调,模式 III 用于使用已知中心波长变化进行外界感知。各模式最大偏差与参考 FBG 数量关系分别可达到如表 1 要求。

表 1 解调系统标准

模式	范围/参考数/ (nm/个)	最大偏差/参考数/ nm	函数关系/ 插值
I	7.5	<0.035	线性/线性插值
II	5.0	<0.025	二次/二次插值
III	2.0	<0.01	线性/线性插值

1.1 F-P 滤波器工作原理与光路通道

扫描式光谱测量主要是依赖于 FBG 反射光和滤波器形成共振耦合^[18],简称共振。原理如图 1 所示,F-P 滤波器由两个距离为 L 的反射镜构成,当光从一端进入这个腔体结构时来回反射,只有满足相干条件的光,即波长与腔长成整数倍的光可以通过并在这个腔体中形成共振增强最后由透镜射出^[19-20]实现光谱测量。透射光束中心的波长 λ 满足以下公式:

$$\lambda = 2nL/k \tag{1}$$

其中, n 为光纤折射率; L 为 F-P 腔长度; k 为正整数。滤波器两反射镜空腔间距 L 可由压电陶瓷(piezoelectric, PZT)来调节,作为一种将电信号转换为机械运动的材料,外部电压刺激时,压电效应会导致陶瓷的尺寸发生微小变化,可用来控制反射镜的间距。实现通过电压驱动对滤波器透射光中心波长即透射波长的控制。基于此原理可设计以图 2(a)共振光路设计,并以三角波驱动为例,F-P 滤波器周期内变化透射波长,FBG 中心波长对应光在特定的时刻透射 F-P 滤波器实现滤波如图 2(b)所示。将该时刻光信号转换为电信号,由此实现时间间隔信号来推导 FBG 的中心波长。

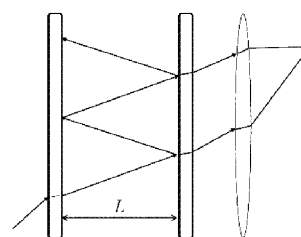


图 1 F-P 滤波器原理

1.2 光电路连接设计

扫描性光谱的解调方法需要 DA 输出和 AD 接收同时配合,FPGA 具有丰富的硬件资源包括足够数量的 I/O 口和高时钟频率等特点。F-P 滤波器接收 FPGA 输出的驱动

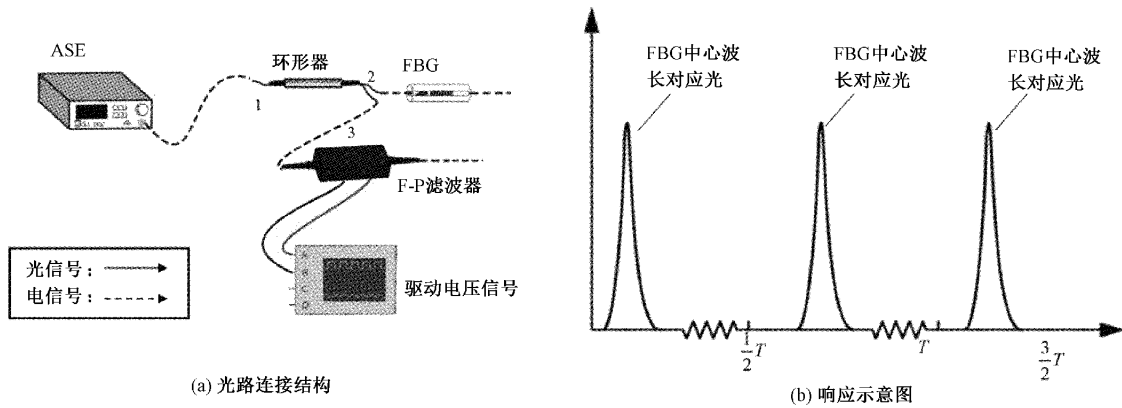


图 2 共振光路设计与响应关系

电压信号,在相应时间段的透射 FBG 的反射光形成光脉冲接入光电探测器,转换成电脉冲后再次 AD 采集传入 FPGA 记录时间信号,用于推导反射光中心波长。通过 FPGA 完成嵌入式系统的搭建更有利于解调系统的工程应用,具体如图 3 所示。

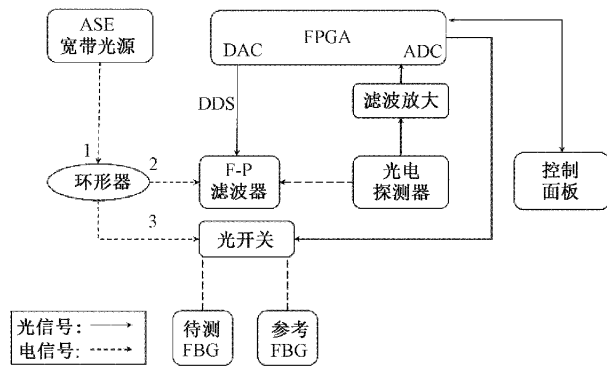


图 3 共振与采集原理

1.3 驱动电压

1)透射波长-电压关系分析

本文采用 MOI 公司的 FFP-TF2 滤波器有效工作的光波长 (operating wavelength range) 为 1 520~1 570 nm 范围覆盖 C 波段,调谐电压为 16.07 V,3 dB 带宽为 0.13 nm 低于 FBG 的 3 dB 带宽,理想线性波长-电压关系下的变化速率为 3.111 4 nm/V。

将三角波作为 F-P 滤波器驱动电压,进行 0.5 s 频率 0.1 V 步进三次加减电压测试共六组试验数据,并计算单位电压(1 V)下的线性斜率和利用最小二乘法进行线性函数、二次函数、三次函数的拟合统计,各线性拟合斜率与拟合度的结果如图 4、5。波长-电压关系并不成完全线性关系,最接近于二次关系,单位电压下具有 0.999 87 的平均拟合度。遂通过设定参考 FBG,动态构造局部波长-电压关系,利用插值法计算待测 FBG 中心波长的办法可以降低 F-P 滤波器波长-电压关系不恒定带来的误差。

2)DDS 信号输出

本文利用 DDS 生成三角波信号,可将 F-P 滤波器在 C

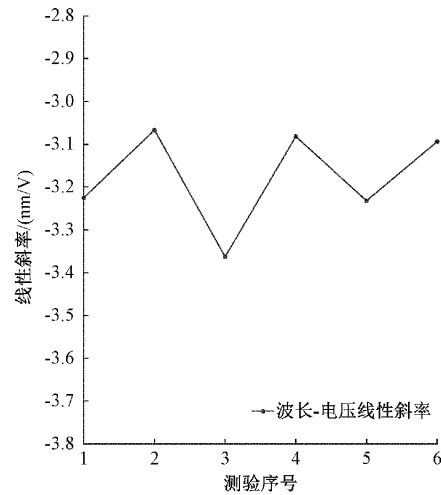


图 4 线性斜率变化

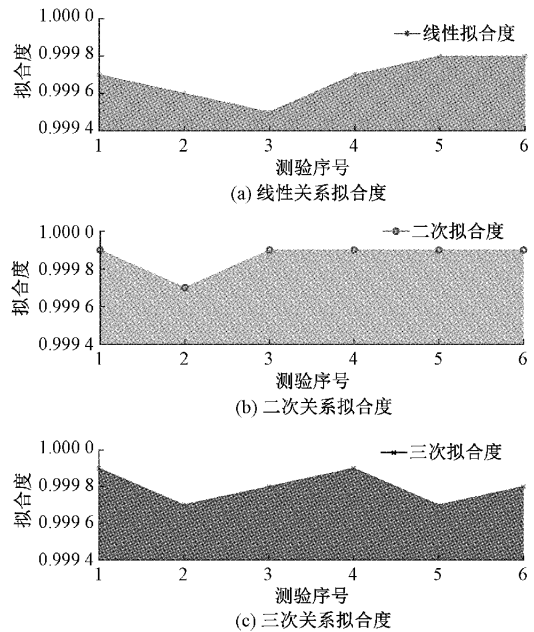


图 5 各关系拟合度

波段透射波长精度控制在 2.5 pm 以内,同时周期性的加压、减压可以抵消部分 F-P 滤波器的漂移误差象。

DDS^[20]是一种基于数字信号处理的直接数字合成技术。利用 FPGA 对内部 ROM_IP 核调用,通过对数字信号进行运算和加工,生成各种频率、幅度和相位可控的输出信号,以产生正向三角波为例其中 DDS 基本构成与 DDS 信号转换示意图如图 6 所示。

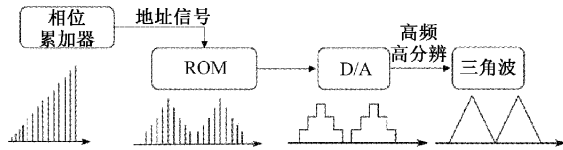


图 6 DDS 信号生成原理

通过在 ROM 数据表中预先设置多种波形,可以在扫描工作的同时直接切换不同的驱动信号,以找到最适合的 F-P 滤波器工作波形。当进行模式 III 解调,这扫描特定范围内波长,采用区域性的电压扫描(例如 0~5 V 的三角波改为 2.5~5 V 三角波)常规操作如图 7(a)所示串联 2.5 V 直流电源。相比之下,采用 FPGA 生成的 DDS 信号的优势在于可以直接用数字对应电平来定位中心波长变化范围如图 7(b)所示,从而不需要串联直流电压,简化系统设计,提高系统的稳定性和可靠性。在精度上 DDS 信号配合 14 位的 AD9767 芯片,5 V 跨度的扫描区域,可均分成 16 384(2¹⁴)份对应 0.95 pm,保证 F-P 滤波器响应的透射波长精度小于 1 pm。

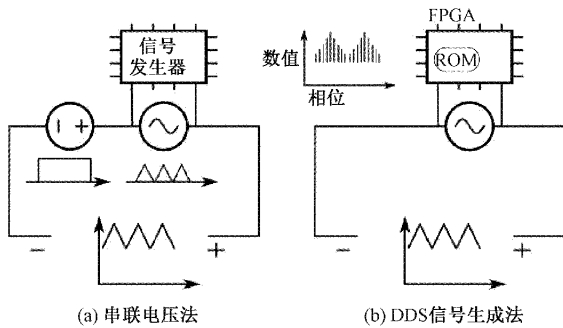


图 7 驱动电压悬空示意

2 多维参考构造及理论误差分析

采用如图 8 所示三种参考方式构造波长-电压关系推导待测 FBG_n 的中心波长。图 8(a)一维参考构造一个斜率固定线性关系,图 8(b)二维参考构造动态斜率的关系,图 8(c)三维参考构造动态二次关系。一维、二维参考采用线性插值法,三维采用二次插值法来进行待测波长计算。

当进行一维参考时,认作线性关系斜率为-3.111 4 nm/V,选取解调范围中间波长值的 FBG₁,假定 FBG₁ 的波长-电压参数为 (u₁, y₁) 则在波长-电压关系式可表示为:

$$\lambda = 3.111 4(u_1 - u) + \lambda_1 \quad (2)$$

当进行二维参考时候,同理选取中间波长值的两个

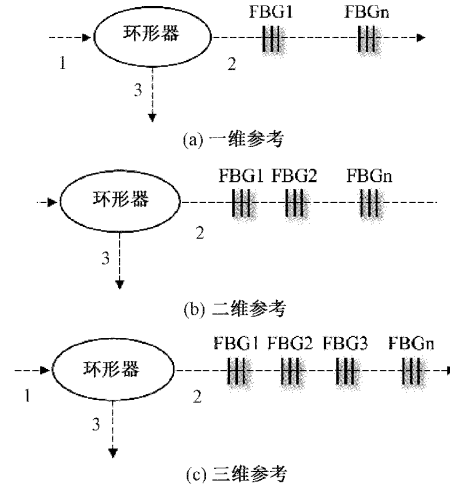


图 8 三种参考 FBG 串联方式

FBG。通过两个参考点拟合出线性函数,设 FBG₁ 与 FBG₂ 的波长-电压参数为 (u₁, y₁), (u₂, y₂) 则在建立线性关系式可表示为:

$$\lambda = \lambda_1 - \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{u_1 - u_2}\right)(u_1 - u) \quad (3)$$

同理串联 3 个参考 FBG 下,选择 3 个参考点,设 FBG₁、FBG₂、FBG₃ 的波长-电压参数为 (u₁, y₁), (u₂, y₂), (u₃, y₃), 拟合二次函数关系式。

当进行模式 III 小范围解调即 1 V 跨度下透射波长约 4 nm 变化范围测试得平均偏差结果如表 2,二维参考最大偏差均小于 0.02 nm,平均偏差相比于一维参考降低了 49%,足够适应现在大多数应变感知需求。

表 2 1 V 范围下的差值测试

序号	一维偏差/ nm	二维偏差/ nm	二维拟合度
第一次加压	0.031 4	0.014 5	0.999 4
第二次减压	0.021 8	0.012 8	0.999 7
第三次加压	0.033 1	0.012 5	0.999 7
第三次减压	0.014 2	0.010 9	0.999 7
平均	0.025 1	0.012 9	0.999 5

二维参考最大偏差均小于 0.02 nm,平均偏差相比于一维参考降低了 49%,足够适应现在大多数应变感知需求。

考虑常规 FBG 中心波长范围,将模式 II 解调范围与参考 FBG 数量关系为 7.5 nm/个的理论试验。采取相同实验步骤,取 0.5 V 作为步长,驱动电压范围为 2~7 V 约 17 nm 波长范围内,共 11 组数据。以 4.5 V 的透射波长作为一维参考点,以 3.5 V 和 5.5 V 的透射波长作为二维参考点,以 3、4.5、6 V 的透射波长作为参考点,分别动态构造线性函数与二次函数关系式,并计算与实际 F-P 滤波器

的透射波长偏差。3 种参考方式中,误差与参考点波长差值均呈正比关系。17 nm 的测试范围内,二维参考与三维参考最大误差分别小于 0.07、0.05 nm。

测试驱动电压的主要特征有步进频率,步进幅度,电压范围。当重复 2~7 V 试验并添加 0~5 V 试验,即范围改变跨度不变的情况下,计算得到各维度参考下的平均偏差如图 9 所示。同频同跨度不同范围下二维参考平均偏差分别为 0.049 9 nm 和 0.055 4 nm,三维参考平均偏差为 0.026 7 nm 和 0.030 3 nm,误差相近,相比于传统参考办法存在的偏差(一维偏差),分别降低 84% 和 82%,三维偏差比二维偏差下降分别了 46% 与 43%。

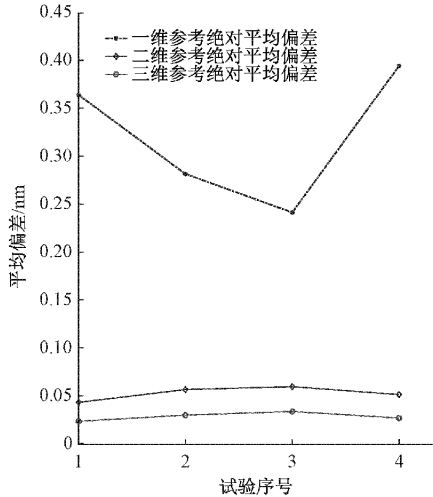


图 9 各次测试平均偏差值

根据理论计算,可知 15 nm 解调范围内两个参考 FBG 构造线性函数的插值法用于模式 I 可保证 0.07 nm 以内的偏差。15 nm 解调范围内 3 个参考 FBG 构造二次函数的插值法用于模式 II 可保证 0.05 nm 以内的偏差,4 nm 解调范围内两个参考 FBG 构造线性函数的插值法用于模式 III 可以保证 0.02 nm 以内的偏差。通过串联 FBG 的办法,实现低成本、低误差的动态标定。

各模式解调范围与参考 FBG 设置如图 10,根据上理论推导,模式 I,30 nm 解调范围下 4 个参考 FBG;模式 II,15 nm 解调范围下 3 个参考 FBG;模式 III,4 nm 解调范围下两个参考 FBG 用于 4 nm 范围的解调,即上表 1 所示,分别可以保证 0.07、0.05、0.02 nm 的最大偏差。

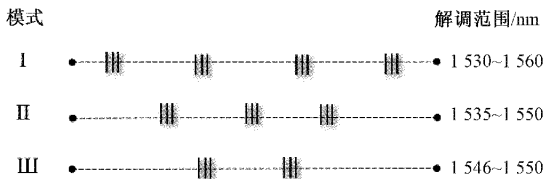


图 10 各模式参考 FBG 示意

当进行未知的 FBG 中心波长解调时,根据精度需求采用二维/三维参考的方式解调,当进行已知 FBG 解调感知

应力温度变化时,通过 FBG 应变来进行解调应用时采用二维参考。依次实现多通道(多需求)解调。

3 动态标定法

3.1 脉冲与中心波长

当进行二维参考即串联两个参考 FBG1 和 FBG2 时,光谱图与光脉冲转换的电信号如图 11 所示,在三角波加压与减压过程中在参考 FBG1、FBG2、待测 FBG0,分别在 t_1, t_2, t_0 生成脉冲。

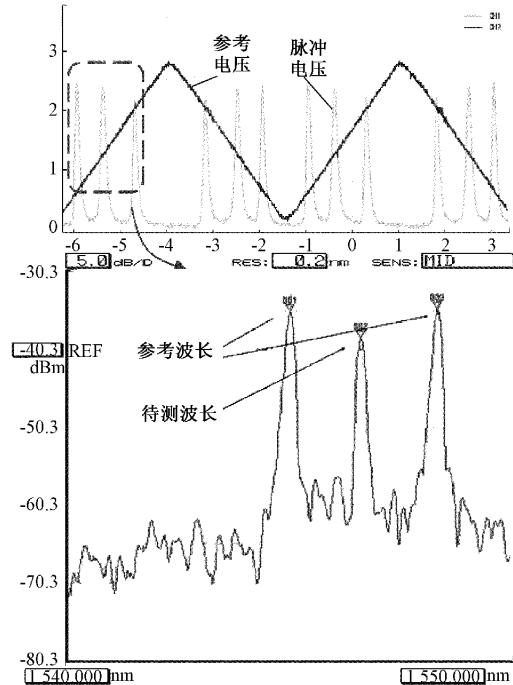


图 11 电信号与光信号对应示意

设三角波频率为 f ,波峰波谷电压分别为 u_{max} 和 u_{min} 则驱动电压扫描速率:

$$v_u = (u_{max} - u_{min})f \quad (4)$$

可由此来计算 3 个 FBG 中心波长光透射 F-P 滤波器时的驱动电压 $u_1 = u_{min} + v_u t_1, u_2 = u_{min} + v_u t_2, u_0 = u_{min} + v_u t_0$ 然后代入式(3)推导化简可得待测 FBG 中心波长 λ_0

$$\lambda_0 = \lambda_1 - \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{t_1 - t_2}(t_1 - t_0) \quad (5)$$

根据公式可知由于三角波电压与时间变化为线性关系,波长公式用时间值与电压值进行构造效果相同。

同理当进行二维参考即串联两个参考 FBG1、FBG2、FBG3 时,参考 FBG 与待测 FBG0 中心波长光谱图如图 12 所示,利用时间与参考波长构造二次关系式: $\lambda_0 = at_0^2 + bt_0 + c$ 采集 3 个参考 FBG 的脉冲时间点 t_1, t_2, t_3 带入可得关系矩阵:

$$\begin{pmatrix} t_1^2 & t_1 & 1 \\ t_2^2 & t_2 & 1 \\ t_3^2 & t_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix}$$

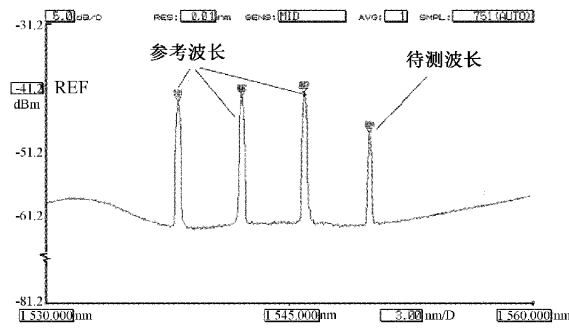


图 12 参考波长与待测波长光谱图

求逆后,利用高斯-约旦消元法来计算系数 a, b, c 具体值:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \frac{1}{(t_1 - t_2)(t_1 - t_3)(t_2 - t_3)} \begin{pmatrix} t_3^2 \lambda_2 - t_2^2 \lambda_3 - t_3^2 \lambda_1 + t_1^2 \lambda_3 + t_2^2 \lambda_1 - t_1^2 \lambda_2 \\ t_2 \lambda_3 - t_3 \lambda_2 + t_3 \lambda_1 - t_1 \lambda_3 + t_1 \lambda_2 - t_2 \lambda_1 \\ -t_2 t_3 \lambda_1 + t_1 t_3 \lambda_2 - t_1 t_2 \lambda_3 + t_2 t_3 \lambda_1 - t_1 t_3 \lambda_2 + t_1 t_2 \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

3.2 多通道解调与脉冲寻峰

本文采集信息主要为光电相应脉冲的时间点,解调波长误差精度直接取决于采集脉冲时间准确性。由于采集的信号存在噪声和毛刺,常规的通过参考 FBG 进行差值运算的解调系统,当待测 FBG 与参考 FBG 中心过于相近时可能导致波峰脉冲采集错误,导致不适合对于参考波长相近的 FBG 解调。因此,本文创新性提出一种利用光开关通道切换,实现参考波长与待测波长分步采集的方法,同时也方便了多通道 FBG 解调,具体如图 13 所示。

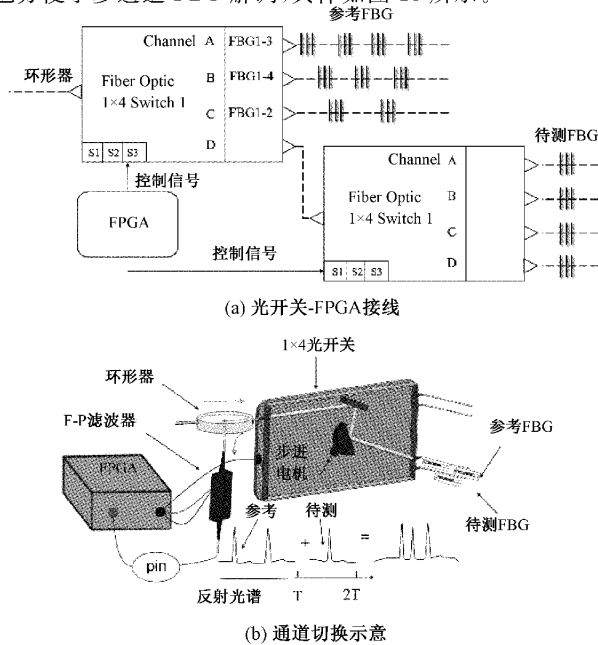


图 13 光开关使用与切换原理

在三角波第 1 个周期中,光开关 1 切换为 A-C 中的通道,传输参考 FBG 的反射光,即获取参考 FBG 中心波长信息;在第 2 个周期中,光开关 1 切换为 D 通道反射待测 FBG 的波峰,实现参考中心波长和待测中心波长的分步式采集,避免了波峰误判。相比于传统办法,既避免了双路光电转换与采集,也为多通道解调提供了硬件基础。

在寻峰过程中由于系统噪声对峰值的影响,会使波峰形状不规则,出现左右偏移的情况^[21],而半功率点则比较稳定。采集波峰附近 $u_{up} = u_{down}$ 的点带入公式可获得更准确时间信号,具体如图 14 所示,现时间采集点 t 为:

$$t = \frac{t_{up} + t_{down}}{2} \quad (7)$$

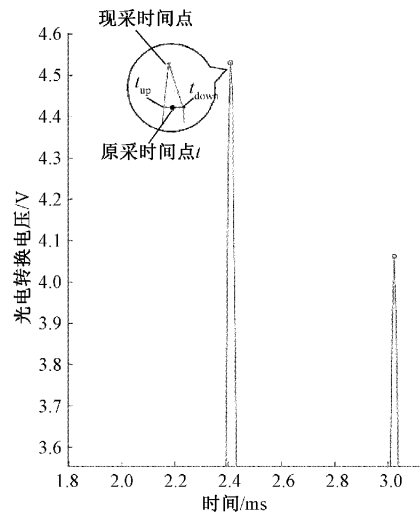


图 14 半峰法寻峰示意

4 解调系统性能测试

本解调系统如图 15 所示,主要分为光路通道与电路通道,分别在光路板与电路板进行信号传输与采集。同时将参考 FBG 放入恒温器保证中心波长不受环境温度变化影响。本文采用杭州佑宁 MiniC100 恒温器保证 $0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 以内幅度的稳定温控即约 0.003 nm 的浮动。

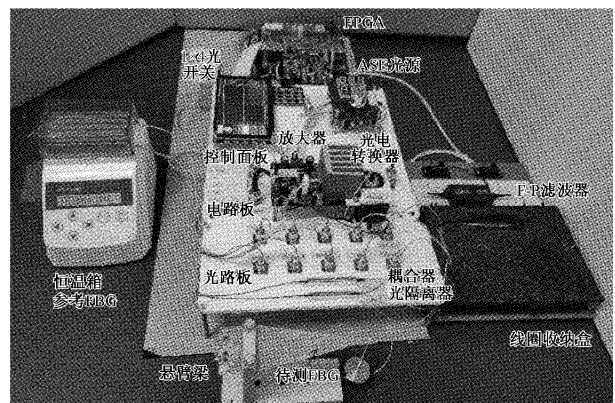


图 15 解调系统实物

利用光耦合器将 15% 的光源接入光谱仪如图 16, 用于读取所有 FBG 中心波长, 计算待测 FBG 波长的误差。本文采用日本横河 AQ6370D 光谱仪, 保证 0.001 nm 的测量精度。

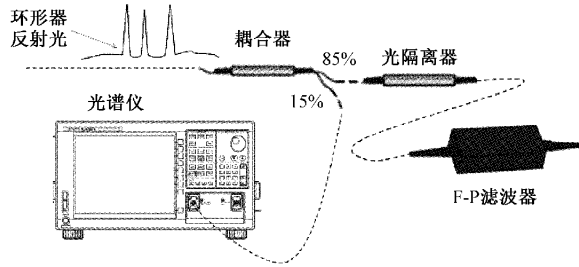


图 16 反射光分路

本文进行的 3 种模式测试, 所采用的参考 FBG 与精度和解调用途如表 3。

表 3 各模式解调参数设定

模式	参考 FBG	解调用途	构造函数
I	1 535/1 540/1 550/1 555	解调波长	一次
II	1 538/1 542/1 546	解调波长	二次
III	1 546/1 550	感知变化	一次

采集信号时, 对于 200 Hz 的驱动频率, 第 1 个三角波周期扫描参考波长, 第 2 个三角波为扫描待测波长。每次读取三角波的 2 次脉冲信号保证 100 Hz 的解调频率, 系统具体流程图如图 17 所示, 最终中心波长结果为两次平均值。分别接入解调范围内 4 个不同波长的 FBG 各测试, 其中模式 III 通过拉力应变改变中心波长, 结果如表 4 所示, 测得平均偏差为 0.028 02、0.018 14、0.010 9 nm, 验证了理论推导的正确性。

表 4 各模式测试结果

	待测波长/nm	实测波长/nm	偏差/nm
模式 I	1 532.176 40	1 532.213 89	0.037 49
	1 535.941 10	1 535.896 41	0.044 69
	1 542.297 40	1 542.311 51	0.014 11
	1 545.837 30	1 545.821 49	0.015 81
模式 II	1 535.956 20	1 535.947 73	0.008 47
	1 540.035 50	1 540.045 25	0.009 75
	1 547.984 30	1 547.971 56	0.012 74
模式 III	1 549.950 00	1 549.991 61	0.041 61
	1 547.959 60	1 547.965 07	0.005 47
	1 548.206 60	1 548.217 47	0.010 87
	1 548.319 40	1 578.331 27	0.011 87
	1 549.548 80	1 579.560 86	0.012 06

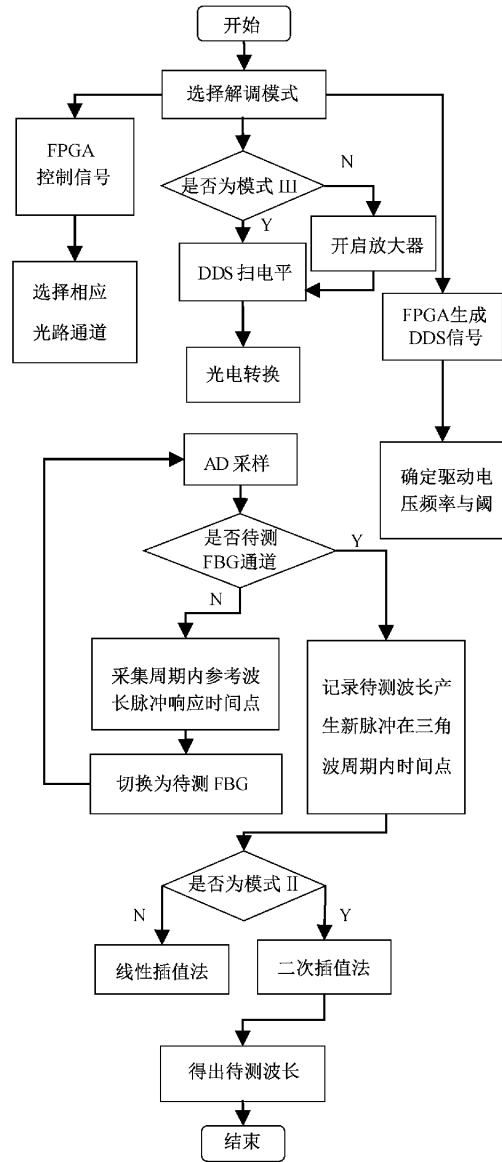


图 17 系统执行流程图

5 结 论

通过对 F-P 滤波器透射波长与驱动电压关系的研究, 采用动态标定波长-时间关系的插值法推导待测波长, 实验结果表明可以降低 F-P 滤波器蠕动性和非线性带来的误差和不稳定性; 用串联 FBG 形成参考点的办法实现校正同时省去了标准具, 降低了解调成本, 拓宽了工程应用场合; 利用光开关切换通道, 设计 3 种解调模式, 同时解决了常待测波长与参考波长相近时容易采集错误的问题的同时既精简了电路设计又多通道解调提供了硬件基础。研究结果可以为 FBG 解调的深入研究提供了一定的理论基础。

参考文献

- [1] MANISH M, KUMAR S P. Fiber Bragg gratings in healthcare applications: A review[J]. IETE Technical Review, 2022, 40(2): 1-18.
- [2] ESPOSITO F, CAMPOPIANO S, LADICICCO A. Miniaturized strain-free fiber Bragg grating temperature sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 20(17): 16898-16903.
- [3] 钱牧云,张姣姣,魏新园. 光纤光栅柔性触觉传感器的材质识别功能研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43: 206-212.
- [4] TOSI D. Review of chirped Fiber Bragg grating (CFBG) fiber-optic sensors and their applications[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2147.
- [5] WANG P, SHAO M L, HAN X, et al. FPGA-based real-time system for demodulating FBG wavelength[J]. International Journal of Smart Home, 2015, 9(6): 91-98.
- [6] ANINDYA G, JAMES A, MARK G, et al. Experimental investigations in embedded sensing for structural health monitoring of composite components in aerospace vehicles[J]. Composites: Part B, 2015, 71(9): 52-62.
- [7] 梁晨. FBG 小型解调仪设计与关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [8] HALSTUCH A, ISHAAY A A. Femtosecond inscription of chirped fiber Bragg gratings and fiber Bragg grating arrays using a single uniform phase-mask[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 160: 107286.
- [9] 刘显明,任怡霖,周峰,等. 面向高速动态测量的光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国激光, 2023, 50(10): 9-34.
- [10] 夏旭承. 高速多通道光纤光栅传感解调关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [11] 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.
- [12] 王鹏,赵洪,刘杰,等. 基于可调谐 F-P 滤波器的 FBG 波长解调系统的动态实时校准方法[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 85-92.
- [13] ZHANG Y X, XU B, WANG D N, et al. High-resolution sensing system based on Fiber Bragg grating fabry-perot interferometer and frequency-domain demodulation[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12): 4451-4457.
- [14] CHUNG W H, TAM H Y, DEMOKAN M S, et al. Wavelength and power monitoring of DWDM systems using scanning F-P filter calibrated with a F-P laser[J]. Optics Communications, 2002, 210(3-6): 219-224.
- [15] 宋早标. 基于可调谐激光器的 FBG 准分布式传感系统的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- [16] 文丰,张岩,贾兴中. 基于 F-P 可调谐滤波器的光纤光栅解调系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 38-43.
- [17] 马游春,苏庆庆,姜德,等. 基于 DDS 技术的 F-P 滤波器非线性补偿设计[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 296-299.
- [18] GAO H W, YUAN S Z, LIU B, et al. InGaAs spectrometer and F-P Filter combined FBG sensing multiplexing technique [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(14): 2282-2285.
- [19] 段雅楠,王双,江俊峰,等. 光纤法珀传感解调方法研究进展[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5): 793-808.
- [20] HOU Y Q, LI C L, TANG S. An accurate DDS method using compound frequency tuning word and its FPGA implementation[J]. Electronics, 2018, 7(11): 330.
- [21] 胡颖,莫文琴,柴大虎. 基于 F-P 滤波器的光纤光栅解调中寻峰算法分析[J]. 光通信技术, 2014, 38(12): 17-20.

作者简介

潘睿智, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感与嵌入式开发。

E-mail: wisdompan007@foxmail.com

冯艳(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为光纤光栅传感、智能机器人触觉感知。

E-mail: xmfy0833@sina.com