

·信号与信息处理·

光纤光栅传感系统的信号解调

陈志伟, 谭中伟, 闫俊芳, 李睿, 沈笑笑

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 首先介绍了光纤光栅的基本知识, 再分别介绍了几种典型解调方法的工作原理、性能和特点, 给出了其工作原理图, 并对各种解调方法的优缺点进行了论述。提出了一种基于 CCD 的光纤光栅传感解调系统, 该系统采用反射式成像系统, 用 CCD 作为探测器, 并利用可编程逻辑器件 FPGA 设计驱动电路和信号处理电路, 实现了一种体积小、结构简单, 解调速度快, 可以实时测量的波长解调系统, 为光纤光栅解调技术的实际应用和光纤光栅传感解调系统的设计提供了理论依据。

关键词: 光纤光栅; 光纤光栅传感; 信号解调; CCD

中图分类号: TP212.4⁴

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255-(2012)02-0047-06

Demodulation Methods of FBG Sensing System

CHEN Zhi-wei, TAN Zhong-wei, YAN Jun-fang, LI Rui, SHEN Xiao-xiao

(Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Light wave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The basic knowledge of the fiber Bragg grating (FBG) is introduced, then the working principle, performance and characteristics of several typical demodulation methods are introduced respectively. The diagrams of working principle are given, the advantages and disadvantages of various demodulation methods are discussed. A charge-coupled device (CCD)-based FBG sensing demodulation system is proposed, it uses the reflective imaging system, uses CCD as a detector, and uses the field programmable gate array FPGA to design the drive circuit and signal processing circuit. A wavelength demodulation system which has small size, simple structure, fast demodulation speed, and real-time monitoring capability is realized. These provides the theoretical basis for the practical applications of FBG demodulation techniques and the design of FBG demodulation system.

Key words: fiber Bragg grating; fiber Bragg grating sensor; signal demodulation; charge-coupled device

与其他光纤传感技术相比, 光纤光栅传感器的最突出特点是传感器检测的是波长的变化, 对光源的功率波动、线路中的衰减和噪声等不敏感, 抗干扰能力强; 而且, 光纤光栅本身就具有波分复用的特点, 易于大规模成阵。而另一方面, 限制光纤光栅传感器应用的一个很重要的因素就是需要进行波长解调, 从微小的波长变化中提取传感信息。与强度检测相比, 波长的精确检测所需要的成本更高、速度更慢, 因此, 对高精度、高速度的波长解调是光纤光栅传感器的关键技术, 对波长解调的研究贯穿着光纤

光栅传感技术的发展历史。

1 光纤光栅传感信号解调方法

1978年加拿大的 Ken Hill 首次发现掺锗石英光纤紫外光敏特性, 即布拉格 (Bragg) 光栅效应并采用驻波法制造出世界上第一根光纤光栅^[1]。此后 Melt 又于 1989 年发明了光纤光栅紫外写入技术, 并观察到强紫外干涉从侧面照在掺锗光纤上能引起相应位置纤芯的折射率发生变化^[2]。光纤光栅^[3]是指折射

收稿日期: 2012-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61177012); 北京交通大学科研基金(2009JBM011)

作者简介: 陈志伟(1985-), 男, 江苏南京人, 硕士, 主要研究方向为光纤传感、激光雷达和光信息处理等; 谭中伟(1978-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事高速光通信网、光纤传感和光信息处理的研究。

率沿光纤轴向呈周期或准周期性变化的一类光纤器件。通过适当设计光栅的折射率调制结构,可以制作出各种具有独特滤波和色散特性的光纤光栅器件,可广泛应用于光纤传输系统中的光学信号处理、光纤激光器技术和光纤传感等领域。

图1为光纤光栅传感器解调系统的框图,其中图1a为反射式检测法,图1b为透射式检测法^[4]。解调系统由光源(如宽带谱、谐调谱、脉冲、激光等)、连接器(如耦合器、环行器等)、传感光栅(光纤 Bragg 光栅、长周期光纤光栅等)和光电探测器等部分组成。

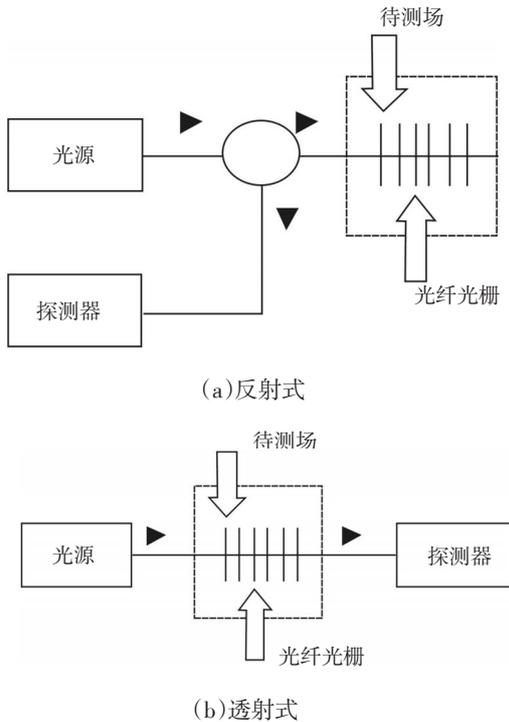


图1 光纤光栅传感解调系统

在传感过程中,光源发出的光波由传输通道经连接器(或直接)进入传感光栅,传感光栅在外场(如应变场、温度场等)的作用下,对光波进行调制;接着,带有外场信息的调制光波被传感光栅反射(或透射),由连接器(或直接)进入接收通道而被探测器接收解调并输出^[5,6]。由于探测器接收的光谱包含了外场作用的信息,因而从探测器检测出的光谱分析及相关变化,即可获得外场信息的细致描述。相比而言,基于反射式的传感解调系统比较容易实现。

在光纤光栅传感系统中,信号解调一部分为光信号处理,完成光信号波长信息到电参量的转换^[7];另一部分为电信号处理,完成对电参量的运算处理,

提取外界信息,并以人们熟悉的方式显示出来^[8]。其中,光信号处理,即传感器的中心反射波长的跟踪分析是解调的关键。

光纤光栅传感器中心反射波长最直接的检测仪器是光谱仪^[9],其工作原理参见图2。在光谱仪中,通过调节衍射光栅的角度,使衍射光栅分离出不同的波长,分离出来的特定光波由反射镜聚焦到光阑孔/探测器;旋转衍射光栅可对波长范围进行扫描,分辨率可达0.001 nm。这种方法的优点是结构简单、使用方便。缺点是精度低、价格高、体积大。

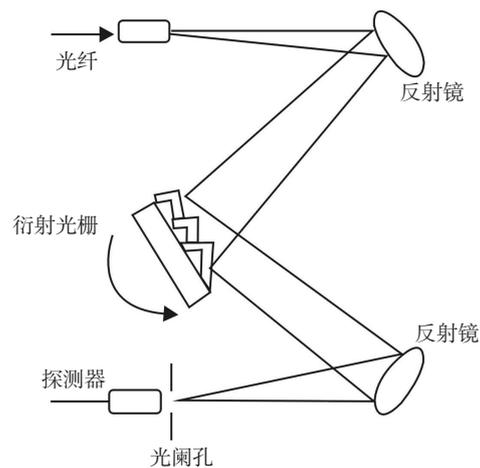


图2 光谱仪的工作原理

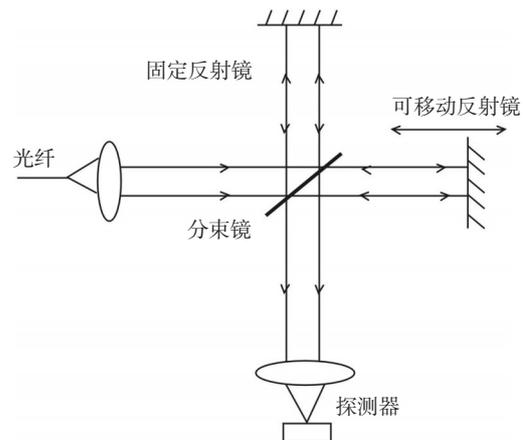


图3 多波长计的工作原理

若需要更精确的波长测量,可选用多波长计^[10],其工作原理参见图3。在多波长计中,利用光波的干涉效应将同相位的光信号加强的原理来对不同的光波进行区分。从光纤来的光信号在通过分束镜后,一部分由于反射到固定反射镜,然后返回;另一部分透射到固定可移动的反射镜,然后返回,这两束同源

但不同路径的光束,在重新汇合时,某些特定波长的光信号将由于同相位而产生干涉、光强增加,被探测器捕获。对可移动反射镜进行微调,可改变两束光的光程差,以此来选择对不同光波的扫描。多波长计对波长的测试非常精确,分辨率可达到0.000 4 nm,能看到系统的噪声平台,但在功率测量方面不如光谱分析仪。

光谱仪和多波长计不能直接输出对应于波长变化的电信号。因此,不能满足实用化自动控制的需要^[11,12]。为此,人们研究并提出了多种解调方法,以实现信号的快速、精确提取。总体上可以归纳为三大类,即滤波法、干涉法和可调光源扫描法。其中,每类解调方法还可以细分多种不同实现方式。现介绍其中几种常用的解调方法。

1.1 可调谐F-P滤波器解调法

可调谐滤波器解调法基于Fabry-Perot(F-P)干涉仪^[13]。可调谐Fabry-Perot滤波器的滤波特性是基于人们所熟悉的多光束干涉现象,如图4所示。

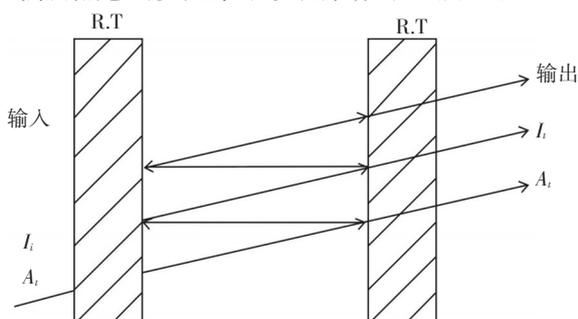


图4 Fabry-Perot滤波器原理图

其透射特性可表示为

$$A_t = \frac{T}{1 - R \cdot \exp(i \cdot \delta)} A_i \quad (1)$$

$$I_t = \frac{T^2}{1 + R^2 - 2R \cos \delta} I_i = \frac{T^2}{(1 + R)^2 - 4R \sin^2(\delta/2)} I_i \quad (2)$$

式(1)及式(2)中, A_i, I_i 分别为入射光场的振幅和光强; A_t, I_t 分别为出射光场的振幅及光强; δ 为相邻两束光的相位差

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n \cdot L \cdot \cos \theta \quad (3)$$

式中, R, T 分别为镜面的反射率和透射率(在理想状况下, $R+T=1$); n 为腔中介质折射率; L 为腔长。当光波长 λ 使得 d 满足 $\delta=2\pi \cdot m$, m 为正整数时,有极大透过峰。这就形成了Fabry-Perot腔的具有波长选择性

的透过特性,从而达到滤波的效果。

F-P腔发生谐振的条件为

$$nL \cos \theta = \frac{N}{2} \cdot \lambda \quad (N=1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

式(4)中, n 为介质的折射率; L 为腔长; θ 为入射角; λ 为中心(谐振)波长; N 为干涉级数。

由式(4)可以看出,通过改变中介质层的折射率 n ,改变入射角 θ 或改变F-P腔的腔长 L ,都可以改变滤波器的中心波长,达到调谐的目的。

1.1.1 角度调制

将式(4)两边对 θ 微分可得

$$\Delta \lambda = -\frac{2nL}{N} \cdot \sin \theta \cdot \Delta \theta \quad (5)$$

式(5)中, $\Delta \lambda$ 为由入射角变化 $\Delta \theta$ 引起的中心波长的偏移量。这种调制法实现起来比较简单,但存在着严重的缺点和不足,实际应用不多。

1.1.2 腔长调制

将式(4)两边对 L 微分可得

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{L} \Delta L \quad (6)$$

式(6)中, $\Delta \lambda$ 为由腔长变化 ΔL 引起的中心波长的偏移量。其主要问题是,当改变 L 时两平板必须严格保持平行,这样滤波器的精细度才不会下降,这对传动装置的精密性提出了很高的要求。当F-P腔内填充的不是双折射材料时,与偏振无关,这是腔长调制的特点。

用压电陶瓷调节腔长 L ,其调谐范围宽、响应线性好,缺点是对温度、振动比较敏感,稳定性不高。

1.1.3 折射率调制

当 $\theta=0$, L 固定时,若 n 变化 Δn ,则 λ 也跟着变化 $\Delta \lambda$,由式(4)可得两者的关系为

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{n} \Delta n \quad (7)$$

当在电光晶体(如LiNbO₃)或液晶材料两端加电压时,其折射率将发生变化,这样滤波器的中心波长也随之变化。

目前世界上所研究的可调谐Fabry-Perot滤波器可分为如下几类:微型电动机械系统(MEMS)F-P腔滤波器;波导F-P腔滤波器;光纤光栅F-P腔滤波器;液晶F-P腔滤波器;固体腔F-P腔滤波器;光纤F-P腔滤波器(FFPF)。此外还有独立多腔光纤F-P腔可调谐光滤波器,角度可调谐F-P腔光滤波器。

在一定波长范围内,若以平行光入射到F-P腔干涉仪,则只有满足相干条件的某些特定波长的光才能发生干涉,产生相干极大。通过检测相干光强的最大值而获取满足条件的波长。当F-P腔长变化时,满足条件的相干光波长会变化。因此,可以将F-P腔滤波器固定于压电陶瓷时,调整压电陶瓷的驱动电压,若F-P腔的透射波长与光纤光栅的反射波长重合,则探测器能探测到最佳光强,此时给压电陶瓷施加的电压就对应着光纤光栅的反射波长,进而得到被测物理量。

将一个光纤光栅置于恒温环境中,保持其波长稳定,作为波长参考,称之为参考光栅。宽带光源发出的光经光隔离器进入传感光纤光栅阵列,其中满足 Bragg 条件的光被反射后经 3 dB 耦合器进入可调光纤 F-P 腔滤波器,在可调谐滤波器上锯齿波扫描电压调节其腔间隔,当可调谐滤波器的光谱与传感光纤光栅波长相匹配时,滤波器的透射光强最大,此时通过光电探测器探测到的光信号经放大后由数据采集卡输入计算机处理,可转换为传感光纤光栅的波长。如图 5 所示。

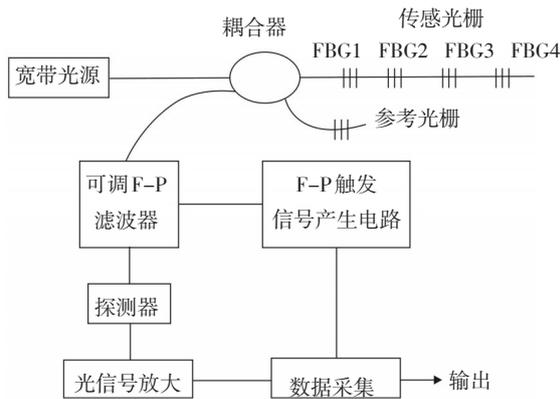


图5 可调谐 Fabry-Perot 滤波器解调原理

该解调方案具有体积小、价格低的优点,能够在测量系统成本较低的前提下提高光纤光栅波长的测量精度,且可以直接输出对应于波长变化的电信号,是一种较好的解调方案,利用该方法也可同时对多个光纤光栅的波长进行解调。

1.2 基于边缘滤波器的波长解调

边缘滤波器就是一个光强度随波长变化单调上升或单调下降的滤波器,当光信号通过该滤波器时,光的波长变化会被直接映射为强度变化,因此,通过检测光强就能够直接得到波长变化的信息。其基本

结构如图 6 所示。

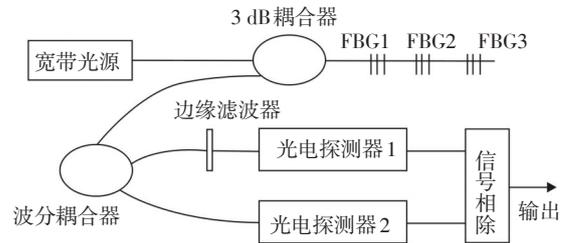


图6 基于边缘滤波器的波长解调示意图

当边缘滤波器的强度-波长曲线的斜率为 k 时,波长漂移量 $\lambda - \lambda_0$ 时,波长漂移引起的强度变化为

$$F(\lambda) = k \cdot (\lambda - \lambda_0) \quad (8)$$

因此,波长检测的精度主要取决于边缘滤波器的强度-波长曲线的斜率 k ,另一方面,精度也受到强度检测的精度,包括 A/D 转换的精度和系统的信噪比等因素的影响。为了提高波长解调的精度和灵敏度,斜率 k 越大越好,有人专门设计了三角形的啁啾光纤光栅来进行波长解调,但是,其缺点是带宽范围小,只能对一个光纤光栅进行波长解调,这就失去了光纤光栅传感器的最重要的波分复用特性。长周期光纤光栅也可以作为边缘滤波器,它的带宽可以覆盖几十纳米,但是由于它的带宽很大,因此,强度-波长曲线的斜率 k 很小,波长解调的精度和灵敏度都很低。

基于边缘滤波器的波长解调的优点是能够直接将波长漂移转换为强度变化,不需要进行波长扫描,在各种解调方法中,它的速度是最快的。但是,它的主要问题在于波长解调的精度和检测范围的矛盾。

1.3 非平衡 M-Z 干涉仪法

为了克服波长解调的精度和检测范围的矛盾,使用波分复用器(WDM)和波动阵列光栅(AWG)取代单波长的边缘滤波器,但是,目前它的主要困难在于这种滤波器并不是线性的,这就造成了不同波长处的灵敏度不同;或者,需要使用温度或机械调谐的方法用滤波器进行波长扫描,这就降低了检测的速度。

干涉法是利用干涉仪将反射光的波长量转化为易于探测的光信号参量(如强度、相位)来进行检测。最有代表性的就是非平衡 M-Z 干涉法。此种方法是利用非平衡 M-Z 干涉仪将传感光栅的波长变化转化为相位变化 Δf ,对干涉仪输出的相位信号进行检测, $\Delta \lambda$ 和 Δf 之间的关系可以表示为

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \cdot n \cdot d}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda \quad (9)$$

式(9)中, n 为光纤光栅折射率; d 为干涉仪臂长差; λ 为反射波长。由探测器探测到 Δf 便可得到FBG波长的变化量。其结构如图7所示。

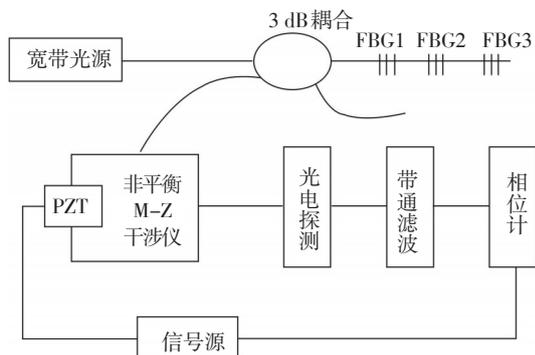


图7 非平衡Mach-Zehnder干涉仪解调原理图

A.D.Kersey 等人于1992年提出非平衡Mach-Zehnder (M-Z)干涉解调法,宽带光源通过耦合器入射到FBG上,其反射光经过耦合器进入不等臂长的M-Z干涉仪,当传感光纤光栅受到外界作用时,其中心波长的变化导致非平衡M-Z干涉仪的相位发生变化,解调出相位变化量即可得到波长偏移量,实现了在500 Hz下达到 $0.6n\varepsilon\sqrt{\text{HZ}}$ 的分辨率。

非平衡M-Z干涉解调法具有响应速度快、分辨率高的特点,但局限于动态应变测量,且测量范围非常有限(因干涉仪相位只能变化 2π),不适合于绝对应变的测量,极易受应变、温度等外界因素的干扰。

2 基于CCD的波长解调

将光纤光栅反射回来的光通过准直器入射到衍射光栅等色散器件中,利用衍射光栅的角色散将不同波长的光在空间中展开,再经过透镜准直后就可以在傅里叶平面上得到光谱的线性分布,利用线阵CCD(charge-coupled device)就可以检测光栅的波长变化。其原理如图8所示。

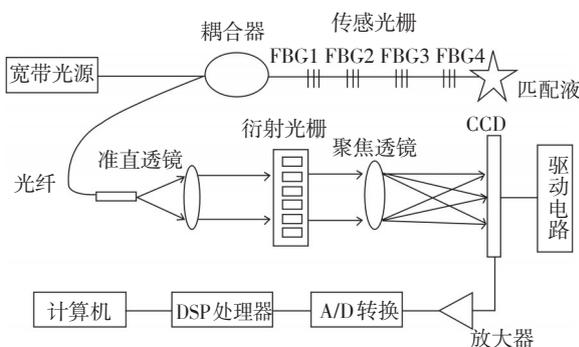


图8 基于CCD的光纤光栅传感解调示意图

其中,最为主要的元件是衍射光栅。衍射光栅的色散原理为:平行光束入射到平面光栅上,每条划痕起衍射作用,衍射角的正弦与波长成正比,而与每条划痕的同一波长的衍射光栅的方向一致。这样不同波长的光就被衍射至不同方向,达到了分光的目的。光栅的种类繁多,但不论是何种光栅,其必须满足光栅方程

$$d \cdot (\sin i + \sin \theta) = k \cdot \lambda, k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (10)$$

式中,划痕间距 d 被称为光栅常数;而 $1/d$ 为光栅的划痕密度; i 为入射角。

衍射光栅的基本特征可以用“分辨本领”和“色散率”来表征。

(1)分辨本领(又称分辨率) R ,定义为两条刚可被分开的谱线的波长差 $\Delta\lambda$ 除它们的平均波长,即

$$R = \bar{\lambda} / \Delta\lambda \quad (11)$$

按照瑞利条件,两条刚可被分开的谱线规定为:其中一条谱线的极强正好落在另一条谱线的极弱处,由此条件可以推得(从略)光栅的分辨本领

$$R = kN \quad (12)$$

式中, k 为光谱的级数, N 为光栅的总刻痕数,因为级数 k 不会变,所以光栅的分辨本领主要决定于狭缝数目 N 。

(2)角色散率(简称色散率) D ,光栅的色散率 D 定义为同一级两条谱线衍射角之差 $\Delta\theta$ 与它们的波长差 $\Delta\lambda$ 之比,即

$$D = \Delta\theta / \Delta\lambda \quad (13)$$

将式(13)两端微分得到 $d \cos \theta = k d \lambda$,代入 D 的定义式得

$$D = \Delta\theta / \Delta\lambda = k / d \cos \theta \quad (14)$$

由式(14)不难得出了光栅光谱的以下几个特点:

- ① 光栅常数 d 愈小,则光栅的色散率 D 愈大;
- ② 高级次光谱比低级次光谱有较大的色散;
- ③ 当衍射角很小时,色散率 D 可看作一个常数,此时衍射角 θ 与 λ 成正比。

光栅是微型光谱仪的色散元件,决定了系统的理论分辨率,直接影响到系统的光谱分辨率。光栅的选择要根据光谱仪的工作波段确定,并且在设计要求的分辨率下选择合适的光栅常数。一般来说,对于600线光栅,在不同的闪耀角下,其工作光谱范围为650 nm左右;而1200线光栅的光谱范围为200~300 nm。以此类推,1800线光栅的光谱范围更短。由此并结合光栅方程分析,在一定的系统相对孔径和成像谱面长度下,光纤光栅光谱仪的工作波

段宽度与光栅常数和起始工作波长有关。刻化密度越大,起始波长越大或光谱级次越高,光谱仪的工作波长范围越窄。光栅的选择至关重要,所以在光学平台设计中,要根据实际情况选取合适的光栅才能达到理想的结果。

经色散后的光线需经成像镜聚焦至线阵探测器探测面。成像镜焦距的选择关系到光学系统与光电探测器的匹配。设计时应控制成像镜焦距,使成像光谱长度和探测器像元长度匹配。基于以上考虑,初始设计时,成像镜焦距 f_2 应根据光谱仪工作波长范围、探测器像元长度和光栅线色散率来确定。

$$L_{\text{ccd}} = \frac{di}{d\lambda} \times (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (15)$$

式中, $\frac{di}{d\lambda}$ 为光栅的线色散率, L_{ccd} 为 CCD 探测器像元长度。其中光栅的线色散率为

$$\frac{di}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \frac{f_2}{\cos \delta_1} \quad (16)$$

式中, δ_1 是成像镜物距与焦平面法线方向的夹角。在设计时选定光栅的情况下,可以利用式(16)确定成像焦距。

电荷耦合器件(charge coupled devices, CCD)的突出特点是以电荷作为信号,这不同于以电流或者电压为信号的其他大多数器件。CCD的基本功能是存储电荷和转移电荷。因此,CCD工作过程的主要问题是信号电荷的产生、存储、传输和检测。

在本系统中,采用可编程逻辑器件进行 CCD 驱动电路的设计,这种设计方法就是使用与器件对应的基于 Windows 的开发软件,这类软件一般都支持电路图、VHDL 或 Verilog HDL 输入方式及仿真。首先按 CCD 时序发生器的原理将其分成高低几个逻辑关系层,利用模块化的设计方法,对各部分逻辑关系,混合使用原理图与硬件描述语言(ABEL-HDL)进行描述;并进行逐级仿真,以确保时序的正确性,最后将编译生成的 JEDEC 文件下载到可编程芯片上。Altera, AMD, Lattice 和 Atmel 公司均有 PLD 产品,虽然不同公司的产品在结构上差异较大,但都能实现可重复编程开发的功能。

该方法的优点是静态检测,没有机械扫描机构,因此性能稳定;响应速度也较快。该方法的主要缺点是波长的分辨率受到衍射光栅分辨率的限制,不能用于高精度的波长解调。

光纤光栅传感技术具有许多独特的优点,因而得到了广泛的应用。但是现有的光纤光栅传感技术距离真正的应用还较远,还需要在理论和实际方面进行深入的研究。目前研究的主要难点在于:(1)在一些实际应用中,对微弱信号、动静态信号的结合检测、混合复杂信号的检测方面存在许多难点。(2)在分布式光纤光栅传感网络中,有大量的传感光栅,如何准确地对每个传感光栅的波长进行编码并实现高精度的解调是多光纤光栅解调的难点。(3)光纤光栅传感器解调系统的成本也是我们一直关注的问题,如何设计出速度高、精度高、稳定性好、性价比高的解调系统,是光纤光栅传感解调技术实用化的关键。

参考文献

- [1] HILL K O. Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application Filter Fabrication[J]. Applied Physics Letter, 1978,32: 647-649.
- [2] Meltz G, Meorey W W, Glenn W H. Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method [J]. Optic Letters, 1989,14: 823-825.
- [3] 陈根祥,路慧敏,陈勇,等.光纤通信技术基础[M].北京:高等教育出版社,2010:208-220.
- [4] 禹大宽,乔学光,贾振安,等.光纤光栅传感系统的现状及发展趋势[J].传感器器件,2005,24(3).
- [5] 李川,张以谟,赵永贵,等.光纤光栅:原理、技术与传感应用[M].北京:科学出版社,2005:116-131,199-212.
- [6] Haiyun Xia, Chao Wang, Sebastien Blais, et al. Ultrafast and Precise Interrogation of Fiber Bragg Grating Sensor Based on Wavelength-to-Time Mapping Incorporating Higher Order Dispersion[J]. Journal of lightwave technology, 2010,28: 252-261.
- [7] H Y Fu, H I LIU, X Dong, et al. High-speed fibre Bragg grating sensor interrogation using dispersion-compensation fibre[J]. Electronics Letters, 2008, 44.
- [8] 詹亚歌,吴华,许毓敏,等.多参量和多功能型光纤光栅传感技术[J].激光与光电子学进展,2007,44:47-54.
- [9] 杨兴,胡建明,戴特力.光纤光栅传感器的原理及应用研究[J].重庆师范大学学报,2009,26(4):101-105.
- [10] 白冰.光纤光栅传感器原理与应用研究[J].气象水文海洋仪器,2005,(1):21-25.
- [11] 况庆强,刘永东,桑明煌,等.光纤光栅传感原理及其实用化问题的研究[J].江西师范大学学报,2008,32(1): 58-61.
- [12] 暴学志.光纤光栅传感器技术应用研究[J].中国科技信息,2010,17:42-43.
- [13] 王月明.光纤光栅传感产业化技术研究及应用,2009,11.

3 结 论