

文章编号:1001-5078(2009)01-0059-04

· 光电技术与系统 ·

光纤光栅 F - P 解调技术及变尺度采样方法

赵 兵, 张志利, 仲启媛, 谭立龙

(第二炮兵工程学院, 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025)

摘 要:针对武器装备系统的特殊性,提出采用 F - P 扫描法的光纤光栅解调技术,分析了 F - P 解调原理,提供了 F - P 腔的设计、选择方法,指出该方法在实现动态参数检测的困难,为降低电路设计上的难度,采用变尺度采样解决该问题。实验结果表明,该方法能够极大地降低每次 F - P 扫描时的采样数据量,提高采样数据的效率,可以使解调速度提高 5 倍以上而对精度没有影响。为光纤光栅传感技术在部队的应用和研究提供条件。

关键词:光纤光栅;武器装备检测;F - P 解调方法;变尺度采样

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A

F - P Demodulation Method of Fiber Bragg Grating and Scale Changeable Sampling Technique

ZHAO Bing, ZHANG Zhi-li, ZHONG Qi-yuan, TAN Li-long

(Lab. of Armament Launch Theory & Technology, National Key Discipline, The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: According to the particularity of weapon equipments system, F - P demodulation method was advance and analyzed to use in Fiber Bragg Grating sensor system. how to design and choice a F - P filter was provided, and the difficulty of F - P demodulation method used in dynamic parameter detection was pointed out. scale changeable sampling technique was introduced to deal with the problem and the difficulty of circuitry design was reduced. The result of experiment indicated that the data quantum of sampling was reduced heavily at a time of F - P scan, and the efficiency of data sampling was advanced, so the speed of demodulation was advanced more than five times and it's precision wasn't reduced. The paper provides conditions of application and research of Fiber Bragg Grating sensing technology used in army.

Key words: fiber bragg grating; detection of weapon equipments; F - P demodulation method; scale changeable sampling technique

1 引 言

武器装备系统结构复杂,使用环境恶劣,电磁干扰强,防静电要求高,需要对多种物理参量在多点同时进行检测,以及时发现和排除安全隐患,确保其处于良好的工作状态。普通传感器不能满足武器装备的检测要求。光纤光栅传感器非常适用于武器装备系统检测,但光纤光栅作为光信息技术的热门和前沿领域,在武器装备智能检测中的应用还没有进行过研究,因此,对光纤光栅传感技术的在武器装备检测中的应用进行深入研究是十分必要的。

国内外对光纤光栅传感技术进行了大量的研究

和开发^[1],国内主要在市场开拓上有优势,大都做一些工程应用上研究,尤其是光纤光栅传感器取得飞速发展,国内解调仪基本上也都是购买国外的器件研发的。国外光纤光栅传感技术相对要成熟,尤其是应力检测^[2-3],解调仪器要比国内性能好得多,其精度较高,解调速度快^[4-5]。国内对温度检测较

基金项目:院校“创新人才工程”基金项目支持(No. xy2007jj06)资助。

作者简介:赵 兵(1982 -),男,博士研究生,主要从事光通信检测技术研究。E-mail: yangcheng0514@163.com

收稿日期:2008-07-29

为成熟,应力检测很不成熟。

本文将研究基于 F-P 扫描法的光纤光栅解调技术,对该方法深入研究分析,对 F-P 的设计选择进行研究,以提高整个解调系统的性能。分析了对动态信号解调的困难,提出变尺度采样方法解决这个问题,为光纤光栅在武器装备系统动态检测中的应用提供技术支持。

2 光纤光栅 F-P 解调技术

解调技术本质是对传感光栅反射谱进行实时监测,分析出编码波长。为了开发结构简单而且实用的高分辨率光纤光栅解调系统,国内外开展了许多研究工作,提出了多种解调方法。目前常用的有:光谱分析法、匹配光栅滤波法、可调谐 F-P 滤波器法、边缘滤波器法、线性滤波法、非平衡 M-Z 干涉法、非平衡迈克尔逊干涉法、可调谐激光扫描法等^[6-7]。

由于武器装备系统使用环境的特殊性,对参数检测的精度要求高,同时检测的参数点较多,而且需要有一定的动态信号检测能力,而对动态参数能较好解调的 M-Z 干涉法不能检测静态信号,且没有同时检测多个信号的能力。综合考虑,采用可调谐 F-P 滤波器法。

2.1 F-P 精细度及信号重构原理

两块优质的玻璃平晶或石英平板,彼此相对两个平面高度平行,中间填充介质,构成一谐振腔,通过多光速干涉选择所输出的波长。发生谐振条件为^[8]: $nL\cos(\theta) = \frac{N\lambda}{2}$, $N = 1, 2, 3, \dots$ 。式中, n 为介质折射率; L 为腔长; θ 为入射角; λ 为中心波长; N 为干涉级数。对理想的 F-P 滤波器,其功率传输系数为:

$$T_{FP} = \frac{T^2}{(1+R)^2} \left[1 + \frac{4R}{(1+R)^2} \sin^2(knL\cos\theta) \right]^{-1} \quad (1)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$, R, T 分别为两平板的功率反射系数和功率透射系数。峰值功率传输系数 $T_{\max} = \frac{T^2}{(1-R)^2}$, 不计平板的损耗(吸收或散射)时, $T_{\max} =$

1, 考虑损耗 $A = 1 - (T + R)$ 时, $T_M = \left(\frac{T}{T+A}\right)^2$ 。定义相邻的两种心波长之长为自由光谱范围(FSR), 由式(1)得:

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (2)$$

功率传输系数降为最大值一半时所对应的频带

宽度为 3dB 带宽(FWHM), 也叫分辨率, 由上式得:

$$\text{FWHM} = \frac{\lambda^2(1-R)}{2\pi nL\sqrt{R}} \quad (3)$$

精细度(F)为自由光谱范围和 3dB 带宽之比:

$$F = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (4)$$

F-P 信号重构的实质就是通过可调 F-P 滤波器, 调节 F-P 谐振腔的长度, 将空间上多个频率混在一起的光信号, 转变为时间上的频率相互间隔的光信号。设可调谐 F-P 滤波器的输出光谱为 $S(\lambda)$, 传感光纤光栅的反射谱为 $G(\lambda)$, 耦合器的分光比造成的总损耗为 β , 则探测器所接收到的光功率为:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \beta S(\lambda) G(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

当对滤波器 FP 进行调谐使得输出光谱发生改变时, 探测器的接收光强也跟着发生改变。为了便于研究, 我们对问题进行合理简化, 假设滤波器 FP 的输出光谱和光栅的反射光谱均为高斯分布^[9], 则有:

$$S(\lambda) = I_0 \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda_0^2}\right] \quad (6)$$

$$G(\lambda) = R_B \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_B^2}\right] \quad (7)$$

式中, $I_0, \lambda_0, \Delta\lambda_0, \lambda_B, R_B, \Delta\lambda_B$ 分别为激光器的输出光强、中心波长、光谱的半强度带宽和传感光纤光栅的反射率、中心反射波长、反射光谱的半强带宽。将式(6)、式(7)代入式(5), 进行积分变换和运算后, 可得:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \beta S(\lambda) G(\lambda) d\lambda = \beta I_0 R_B \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\ln 2}} \left\{ \frac{\Delta\lambda_0 \Delta\lambda_B}{(\Delta\lambda_0^2 + \Delta\lambda_B^2)^{1/2}} \times \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda_0 - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_0^2 + \Delta\lambda_B^2}\right] \right\} \quad (8)$$

由式(8)可知, 当 $\lambda = \lambda_B$, 即当激光器与光纤光栅中心波长匹配时, 探测器接收光功率达到最大值:

$$P_{\max} = \beta I_0 R_B \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \frac{\Delta\lambda_0 \Delta\lambda_B}{(\Delta\lambda_0^2 + \Delta\lambda_B^2)^{1/2}}$$

2.2 F-P 解调原理

宽带光源发出的光经 3dB 的耦合器进入多个不同反射波长的传感光栅 FBG, 满足 Bragg 条件的光被反射后, 经 3dB 的耦合器进入可调光纤 F-P 滤波器, 通过在 F-P 腔的压电体(PZT)上施加锯齿波扫描电压调节其腔间隔, 当 F-P 的透射波峰与 FBG 的反射波峰重合时, F-P 滤波器的透射光强最大, 不同的扫描电压对应的透射光的波长不同, 这

样,就使多个 FBG 同一时刻反射回来的不同中心波长的光脉冲信号在同一扫描周期的不同时刻通过 F-P 腔,经过光电检测,把光信号转换为电信号,对电信号进行采集数据,处理,通过校正系统得出电压信号与波长信号的精确关系,最终,解调出被测信号。使用时,根据物理参数如温度、应力与波长变化的对应关系,可以实时得出被检构件的参数情况。F-P 解调原理如图 1 所示。

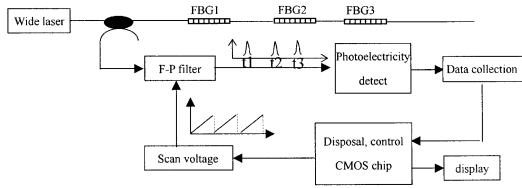


图 1 F-P 解调原理

3 F-P 解调精度及速度分析

探测器所接收到的光功率是关于中心波长 λ_0 的高斯函数,与光栅的反射光谱函数分布一致,但展宽会变大,由均方根 $\Delta\lambda_B$ 变为 $\Delta\lambda_0^2 + \Delta\lambda_B^2$ 。 $\Delta\lambda_0$ 越小,即滤波器带宽越窄,则解调的信号展宽越接近于光栅的反射光谱信号的展宽,这有利于提高解调精度和光栅复用个数。因此用于光纤光栅解调的 F-P 腔设计和选择非常重要,F-P 腔的自由光谱区范围应大于光源光谱范围,即信号光通过可调滤波器时只能出现一级干涉。滤波器的带宽理想情况下越窄越好,但带宽过窄,精细度变大,输出光功率减小,信噪比降低,不利于信号检测,影响检测精度。我们选择美国 MOI 公司提供的可调 F-P 滤波器,其中心波长为 1550nm,带宽约为 0.15nm,FSR 为 80nm 左右,能够很好的满足光纤光栅解调的需要。

解调的精度与扫描电压精细度之间有很大关系,由于可调滤波器采用压电陶瓷 (PZT) 制作,采用电压控制 PZT 产生形变控制谐振腔长度进而输出特定中心波长的窄带光脉冲,因此,产生高精度高分辨率的可调电压信号是实现高精度光纤光栅解调的关键之一。但电压分辨率越高,每单次扫描光谱的电压扫描次数越多,数据量巨大,对设计高速解调产生很大压力。例如,对带宽为 80nm 的信号光,扫描一次等距采样 80000 个点,精度可认为是 1pm,一秒钟扫描 200 次,即解调频率为 200Hz,每个采样点为 16 位数据,这样一秒钟所采集的数据为 32MK。

由上分析可知,经光纤光栅返回的光信号为由特定中心波长的窄带信号,中心波长的变化对应相应检测点应力与温度等参数的变化,当十数个中心波长相互不重叠的光纤光栅传感器串联时,返回的

信号为有数个相互不重叠的窄带光信号,每个窄带的对应相应的光栅传感器,解调时,只要检测出各个窄带的中心波长,对应到相应的光栅就检测出各个点的参数及变化。但逐点扫描每秒钟要传输和处理的数据量太大,这给电路设计部分带来了巨大压力。本文提出变尺度采样的方法解决该问题。

4 基于变采样步长的快速解调原理

多速率数字信号处理,始终是数字信号处理中重要的研究领域之一。尽可能地降低所处理信号的采样率,可以大大降低实现算法的运算量。同时,在适当的部分改变采样率,可以提高系统的性能^[10]。

变尺度采样的原理为:在信号变化缓慢,即可近似为稳态的情况,加大数据采集的间隔。在信号变化比较大,即暂态情况下,减小数据采集的间隔,以求达到采样信号的实时性。其数学模型为:对连续变化的信号采样 $x(t)$,其信号变化快慢由一阶导数 $x'(t)$ 决定,若实时采样周期为 T ,则第 m 次变尺度采样时刻为: $t_m = N_m \cdot T$, $N_m - N_{m-1} = \alpha = f(x'(t_{m-1}))$, α 为与信号变化有关的系数,信号变化大时, α 值就大,信号变化较小时 α 就小。其值可以通过实验选取一个合理的函数得出。变尺度采样原理如图 2 所示。

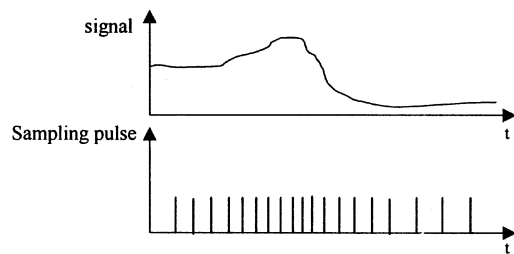


图 2 变尺度采样原理

工程实践中, α 很大程度上取决于经验值。对于被测对象是处于暂态还是稳态,可根据所采集到的数据幅值进行判断,判定的依据可以取队列中的数据最大值与队列中 N 个数据的算术平均值之差,无论在暂态还是稳态情况,滑动队列的长度是一定的,数据采集间隔的变化影响的只是数据更新的快慢。

5 实验及分析

工程使用的光纤光栅传感器其带宽一般为 0.3nm,根据复用光纤光栅传感器的中心波长范围,通过电压控制 F-P 腔的输出,使光谱扫描范围为 1545 ~ 1555nm 之间,扫描电压可通过高精度高速 A/D 转换器 AD9747BCPZ 及相应的电路得到,该芯片提供最高速率为 250MSPS,16 位分辨率的输出电压,由于噪声干扰,实际使用时该芯片的转换频率仅

能达到兆赫级别。电压与 F-P 腔的输出波长关系可通过搞稳定性的 GC 室得到,其精度在皮秒级以上。

采用深圳市宏泰公司生产的 PD75-AP-P/FA-10 光电探测器对光信号进行检测,所检测到的光功率信号大部分位于功率较小、对解调无用的信号,只有少数峰值信号是有用的,由于在峰值和谷值附近信号变化都较小,因此需要设定一个功率阈值,大于该值后以实时采样对信号进行抽样。经实验,对一个扫描周期内所检测的值进行平均,以均值加 5 为阈值最合适。

分别进行实时采样和变采样实验,对于变采样:
 $\alpha = f(x'(t_{m-1})) = \text{int}[(\max(x'(t)) - x'(t_{m-1}))/40]$,图 3 为实时采样检测到的功率值,采集次数为 1001 次,图 4 采用变尺度采样方法,采集次数仅为 182 次,且保留了峰值这一重要信息,峰值精度与实时采样精度一致。可以看出通过变尺度采样,对带宽为 80nm 的信号光,精度为 1pm,解调频率为 200Hz 时的光纤光栅解调系统,一秒钟所采集的数据可由原来的 32MK 降为 5MK,大大降低了解调电路的设计困难,采用适当的峰值检测技术,根据使用环境适当降低信号解调带宽及精度,基于 F-P 扫描法的光纤光栅高速解调是能够实现的。

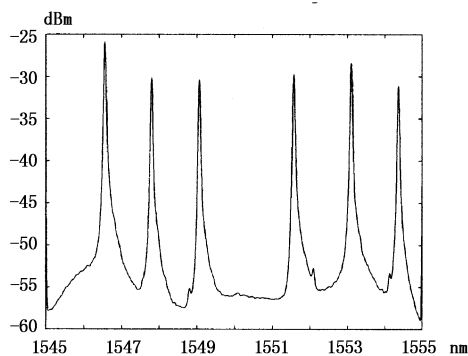


图 3 实时采样检测的光信号

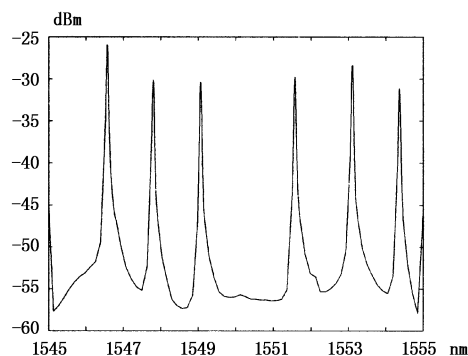


图 4 变尺度采样检测的光信号

6 结论

本文研究了光纤光栅解调技术,针对武器装备

检测的特殊使用环境,提出基于 F-P 扫描法的解调技术,对 F-P 腔的选择及解调速度进行深入分析,并指出该方法对动态信号检测时在电路上实现的难度。针对该问题,提出变尺度采样方法解决这个问题,经实验,该方法能够极大地降低每次 F-P 扫描时的采样数据量,提高采样数据的效率,可以使解调速度提高 5 倍以上,为光纤光栅在武器装备系统动态检测中的应用提供技术支持,并推动光纤光栅高速解调技术的发展。

参考文献:

- [1] C Schmidt-Hattenberger, P Otto, M. Topfer, et al. Development of fiber Bragg grating (FBG) permanent technology for borehole applications sensor [J]. SPIE, 2004, 5502: 124 - 127.
- [2] S Toroghi, M Afshari, M Afshari, et al. A new structure of fiber Bragg grating with increased sensitivity to pressure and decreased sensitivity to temperature [J]. SPIE, 2006, 6162: 226 - 252.
- [3] Giuseppe Coppola, Pietro Ferraro, Mario Iodice, et al. Detecting vibrations by Fiber Bragg sensor interrogated with a bipolished Silicon sample [J]. SPIE, 2003, 4943: 100 - 107.
- [4] Jie Sun, Yitang Dai, Yejin Zhang, et al. Tunable dispersion compensation in 40 Gb/s system using a thermally controlled fiber Bragg grating [J]. SPIE, 2005, 6021: 1106 - 1240.
- [5] Shinji Komatsuzaki, Seiji Kojima, Akihito Hongo, et al. Development of small-diameter optical fiber sensors and high-speed optical wavelength interrogator for damage detection in composite materials [J]. SPIE, 2006, 6167: 616703 - 8.
- [6] Baoxi X Xu, Wanxun X He, Lungtat Ng, et al. Thermal analysis of packaging device with metal-coated fiber Bragg grating [J]. SPIE, 2004, 5349: 486 - 538.
- [7] Jian-wei Fu, Li-zhi Xiao, Yuan-zhong Zhang, et al. A new method for fiber Bragg grating wavelength demodulation with calibration [J]. SPIE, 2006, 6027: 1340 - 1519.
- [8] Liu Ji-fang. Contemporaneity optics groundwork [M]. Xi'an: Xi'an electronic science and technology university press, 2004, 202 - 203. (in Chinese)
- [9] Xie Fang, Zhang Shu-lian, Li Yan. A new wavelength shift detecting technology for fiber Bragg grating system [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22 (6): 726 - 2730. (in Chinese)
- [10] Li Feng, Huang Rui-guang. Signal disposal based on changeable speed of Sampling [J]. Wireless engineering, 2004, (3): 45 - 47. (in Chinese)