

FBG 的中心波长变动算法研究

鞠涛, 阳奇

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了快速而准确地获得应变信息, 针对基于法布里-珀罗(F-P)滤波器的光纤传感应用系统, 研究和对比分析了几种光纤布喇格光栅(FBG)光谱信号的中心波长变动计算方法。根据 FBG 反射光谱的功率分布波形对称特性, 提出一种优化查找中心波长值的算法, 利用相邻 2 次采样的光谱波形峰值的两侧数据, 依据最小二乘法原理进行优化计算获得中心波长的替代值。实验结果表明, 以此计算 FBG 光谱中心波长值变动量不大于 1 个采样点。

关键词: 光纤布喇格光栅; 法布里-珀罗滤波器; 中心波长值; 最小二乘法

中图分类号: TN253; TP31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)03-0041-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on central wavelength variation algorithms of FBG

JU Tao, YANG Qi

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to obtain the strain information quickly and accurately, several methods for calculating the central wavelength variation of fiber Bragg grating (FBG) spectrum signals are studied and analyzed based on the fiber sensing application system of Fabry Perot (F-P) filter. According to the symmetrical characteristics of the power distribution waveform of the FBG reflection spectrum, an algorithm for optimizing the central wavelength value is proposed. Based on the two side data of the peak value of the two adjacent sampling spectral waveforms, the alternative value of the central wavelength is obtained by the optimization calculation according to the principle of the least square method. The experimental results show that the variation of the central wavelength of FBG spectrum calculated by this method is not more than one sampling point.

Key words: fiber Bragg grating; F-P filter; central wavelength value; least square method

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)传感器具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰和耐腐蚀等许多独特优点, 已得到广泛应用。如何精确检测、计算中心波长的变动量是 FBG 传感器应用研究的关键, 包括 FBG 信号解调以及光谱曲线的中心波长计算。一般的 FBG 传感器的解调方法有光谱仪检测法、窄带光源调谐问讯法、线性边缘滤波器的滤波法、可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器法、非平衡马赫-曾德尔干涉仪解调法、匹配光纤光栅

滤波器法和电荷耦合装置(CCD)空间光谱分布解调法等^[5]。其中, 可调谐 F-P 滤波器法具备在一定带宽内调谐扫描的能力, 便于将 FBG 传感器阵列转换为一系列光谱曲线。常见的光谱曲线中心波长计算方法有: 简单寻峰法、功率加权法、高斯拟合法和一般多项式拟合法^[3]等。其中, 简单寻峰法和功率加权法精确度不高, 容易受干扰信号的影响; 而高斯拟合法和一般多项式拟合法的算法复杂, 计算量比较大。

因此, 受功率加权算法的启发, 本文基于 F-P 滤波器的 FBG 传感器解调系统, 以及光谱中心波长变动量的计算方法, 根据 FBG 传感器发生应变后波形整体移动的特性, 提出一种优化的查找中心波长值的算法, 以提高系统的抗干扰性, 更能反映中心波长的实际变动情况。

收稿日期: 2019-09-09。

作者简介: 鞠涛(1978-), 男, 山东潍坊人, 硕士, 高级工程师。主要研究方向为光信号检测与光传感。从事大动态 OTDR、光缆在线监测和光纤振动传感等方面的研究工作, 先后主持和参与了多项重大项目, 以及省市的科研项目的工作, 获得省部级科学技术进步奖二等奖 4 项(其中 1 项排名第一), 取得发明及实用新型专利 3 项。



1 基于 F-P 滤波器的 FBG 传感解调系统

基于 F-P 滤波器的 FBG 传感解调系统结构如图 1 所示。宽带光源发出的光经过光隔离器和光耦合器之后, 分别注入到光纤线路的 FBG 传感器和 FBG 参考光栅, 反射光信号由可调谐 F-P 滤波器进行解调。在嵌入式 ARM 微处理器输出的三角波扫描电压驱动下, F-P 滤波器内部压电陶瓷的位置随着驱动电压值做相应运动, 引起其内部腔体长度的变化而允许特定波长的光信号通过, 从而实现对光信号的波长解调^[3]。该解调光信号再经过光电转换和 ARM 微处理器的模数转换器(ADC)采样后即可获得各传感点的光谱曲线。当传感器发生应变时, 与之相应的传感光栅光谱曲线中心波长值将发生变化, 由此变化量逆推外部的应变变量就实现了光纤传感。如何利用一定的数据处理算法精确地检测光纤光栅反射光谱中心波长的变动量是光纤传感应用系统中的重要工作。

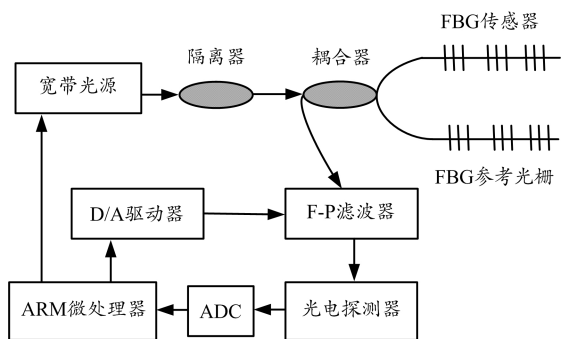


图 1 基于 F-P 滤波器的 FBG 传感解调系统结构图

本系统的核心光器件 F-P 滤波器采用 Micron Optics 公司的 FFP-TF2 滤波器, 它的自由光谱范围(FSR)为 1520~1620 nm, 精细度(Finesse)为 2000, 3 dB 带宽为 0.05 nm。由于该滤波器在高波长段非线性比较严重, 本方案在 L 波段和 C 波段分别插入了 7 根和 3 根 FBG 作为参考信号, 它们的中心波长标称值分别是: 1522±0.5 nm、1537±0.5 nm、1552±0.5 nm、1567±0.5 nm、1577±0.5 nm、1587±0.5 nm、1592±0.5 nm、1597±0.5 nm、1602±0.5 nm 和 1607±0.5 nm。在应用前需要经过台式光谱仪精确测量其实际波长值。

ARM 微处理器采用意法半导体的 STM32F407, 内部集成了 2 个独立的 12 位数模转换器(DAC)模块和 3 个独立的 12 位 ADC 模块。DAC 用于产生三角波驱动 F-P 滤波器; ADC 用于采集光电探测器转换的光谱信号。该微处理器的 CPU 主频高达 168 MHz, 为实时数据采集和计算分析处理提供了强大保障。

2 数据处理

根据 FBG 的传感原理^[2], 中心波长值的理论值需要用数值拟合, 算法比较复杂, 工程应用上往往采取某种算法提取一个特征点作为中心波长值的替代值。对于传感应用系统而言, 更关心的是中心波长的变动值, 因此, 作为中心波长替代值的特征点要求更稳定, 且易于计算。

本文提出了一种基于最小二乘法原理计算中心波长变动量的方法, 以波峰法和功率加权法作为对比研究。

2.1 波峰法

波峰值查找算法是光谱信号中心波长检测最常用的方法, 即通过寻找反射光谱波形曲线的局部最大值的方法确定中心波长的位置。该算法简单易于实现, 但是由于只采用了一个数据点(波峰值)来作为中心波长值, 导致计算结果容易受到光功率扰动以及采样随机性的影响。

2.2 功率加权法

设光谱信号波峰 A 处功率值为 P_A , 特征点 C 的功率为 P_C , 则:

$$P_C = \alpha P_A \quad (1)$$

其中, α 为阈值因子, 取值范围为 0~1。有关研究表明: α 取值在 0.2~0.9 范围内变化时, 特征点 C 对系统噪声扰动不敏感^[6]。此方法相当于从信号波峰值下降 n dB (n 的范围为 6.99~0.46 dB) 处作一条平行线, 与信号波形的交点就是特征点 C。中心波长值特征点的确定情况如图 2 所示。设信号波峰两侧的特征点 C_1 、 C_2 对应波长为 λ_1 、 λ_2 , 根据 FBG 光谱信号的对称特性, 可以取其中点 λ_M 作为中心波长值的替代值:

$$\lambda_M = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (2)$$

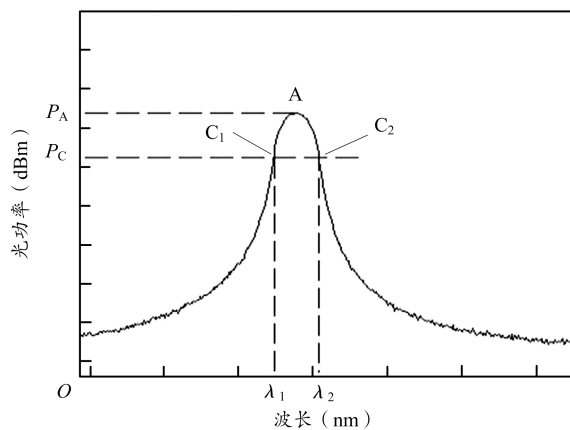


图 2 中心波长值特征点的确定情况

本文以光功率波峰值下降 6 dB 来求取特征点。为简化计算过程,可以直接使用光栅信号的 ADC 采样值进行计算,根据上述实验系统的电路设计原理,光栅信号的光功率值 $P(\text{dBm})$ 与 ADC 采样值 d 之间的转换关系为:

$$P = \frac{99}{4096} \times d - 90.97 \quad (3)$$

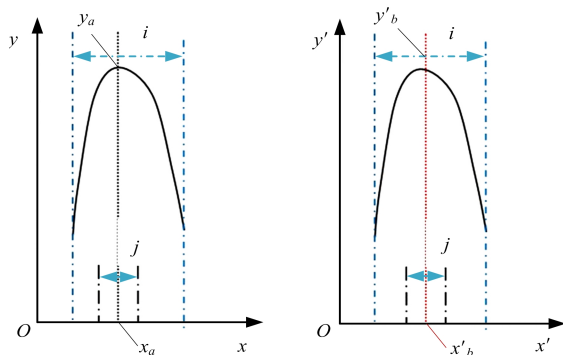
当功率下降 6 dB 时可以计算出,波形信号采样值相应地下降 248 点。

2.3 最小二乘法

最小二乘法的基本原理是通过计算比较使得 2 组数据之间误差的平方和为最小 (即最小化误差) 来寻找数据之间的最佳匹配。利用最小二乘法可以简便地求得未知数据的最优化数值,在工程实际中被广泛应用。

实际采集的 FBG 光谱信号,其中心波长是一个待确定的未知数值。根据信号波形的对称性和整体移动特性,可以在波峰值附近截取一段信号与标准信号,用最小二乘法进行计算获得最优的中心波长值。但是,由于标准的 FBG 光谱信号数据不容易获取,并且需要导入到嵌入式系统进行计算,因此我们采用实验系统的实测数据,从连续扫描获得的数据中提取相邻 2 次扫描的数据进行最小二乘法波形拟合,得到的波形如图 3 所示,其中图 3(a)、图 3(b) 分别表示某波峰第 1 次和第 2 次扫描的局部波形。

实验测试数据计算表明:多次扫描同一个 FBG 参考光栅,在无应变的情况下,其波峰位置的波动范围在 10 个采样点以内。因此,可以在波峰值位置左右各取 30 点数据,通过寻优算法确定一个最佳中心波长值作为理论中心波长值的替代值,用以计算传感光栅的应变变量。具体实施方法如下:



(a) 某波峰第 1 次扫描的局部波形 (b) 某波峰第 2 次扫描的局部波形

图 3 最小二乘法波形拟合示意图

设 2 次连续扫描获得的波形信号数据波峰位置分别为 x_a 和 x'_b , 对应的光功率值为 y_a 和 y'_b , 则优化的最佳中心波长位置可表示为:

$$(x_{a+j}, x'_{b+j}) = \min_j \left(\sum_i (y_{a+i+j} - y'_{b+i+j})^2 \right), \quad j \in [-10, 10], i \in [-30, 30] \quad (3)$$

其中, i 为波峰位置的偏移量, j 为最佳中心波长位置的偏移量。

即当 2 组数据误差最小时波形最相似, 此时取得数据的位置 x_{a+j} 和 x'_{b+j} 就是这 2 个信号的最佳中心波长的替代值。整个算法的计算量为 400 次循环, 每次循环有 61 点数据参与相差、平方以及求和运算, 最后对 400 次计算结果的数据求其中的最小值。

2.4 实验数据对比

本文以上述实验系统的 10 个 FBG 参考信号为例, 分别用上述 3 种方法计算其中心波长值的变动量。首先将 10 根 FBG 固定好, 然后放置于 25 °C 恒温箱中以消除温度变化和应力的影响, 在解调系统工作预热 3 min 之后, 以 1 次/s 的扫描频率对 10 个参考信号连续扫描, 采样获得信号波形图如图 4 所示。其中, 纵轴是信号采样电压值 (对应光栅信号的功率值); 横轴是采样点数, 对应于 F-P 滤波器从低电压至高电压线性扫描的时刻。根据该 F-P 滤波器的频谱特性, 驱动电压与通过的光信号波长值成反比关系, 即随着驱动电压的升高, F-P 滤波器允许通过的光信号波长值从高到低变化。图 4 中用 1~10 分别表示波长为 1522~1607 nm 的 10 根 FBG 参考信号的波峰位置。

试验中, 首先取第 4、第 5 次扫描采集的数据, 分别使用上述 3 种方法计算各波长点的位置变动量; 然后扩大采样数据的时间间隔, 取第 5 和第 50 次扫描采

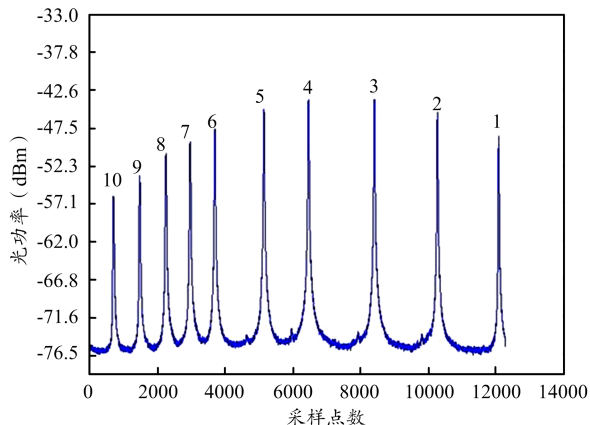


图 4 实测的 FBG 参考信号波形图

集的数据,再同样地计算各波长点的位置变动量,计算结果分别如表1、表2所示。表中的FBG序号1~10分别对应于图4中标示1~10的波形信号。

本文通过比较3种方法的计算结果可知:波峰法是单纯取波峰最大值位置(以采样点数表示),由于10个参考信号波长值的变动量在短时间内不一样,时间

表1 第4~5次实测数据中心波长变动量

FBG 序号	中心波长值 (nm)	中心波长位置之差(采样点数)		
		波峰法	功率加权法	最小二乘法
1	1522.008	-1	0	0
2	1536.984	-2	0	1
3	1551.896	2	1	0
4	1566.914	-1	0	0
5	1576.832	-1	1	0
6	1587.298	-2	1	0
7	1592.514	-3	0	0
8	1597.436	-1	0	0
9	1602.464	0	0	0
10	1607.504	2	1	0

表2 第5~50次实测数据中心波长变动量

FBG 序号	中心波长值 (nm)	中心波长位置之差(采样点数)		
		波峰法	功率加权法	最小二乘法
1	1522.008	-4	-3	-3
2	1536.984	-7	-5	-3
3	1551.896	-1	-3	-3
4	1566.914	-4	-3	-3
5	1576.832	-5	-3	-3
6	1587.298	-4	-3	-3
7	1592.514	-5	-3	-3
8	1597.436	-5	-3	-3
9	1602.464	-5	-3	-4
10	1607.504	-3	-2	-3

间隔增加之后差别也增大,这表明各个信号波峰值的随机性比较大,如果以此结果用于校准波长值则会造成波长分辨率的不确定性。功率加权法用其确定的特征点,在短时间内10个参考信号波长值变动量基本一致,但长时间扫描时波长变动值仍存在一定的不确定性。最小二乘法在不同时间长度内扫描10个参考信号,其波长变动值小于或等于1个采样点,具有较好的一致性,比较符合F-P滤波器输出信号的整体漂移特性。

3 结束语

本文基于一种典型F-P滤波器的光纤传感应用系统,以参考FBG信号为例,对比分析和研究了几种FBG光谱信号的中心波长变动计算方法。传统的波峰法和功率加权法计算简单,但长时间运行时计算结果具有较大的不确定性。本文根据最小二乘法原理,采取多点采样数据进行优化计算作为中心波长值的替代值,可以大大减少功率波动和采样随机性的影响。实验计算结果显示,以此计算的FBG光谱中心波长值变动量不大于1个采样点。

参考文献:

- [1] 许雪梅,蒋静,谢伟涛,等.基于梳状滤波器的光纤光栅传感系统解调方法[J].仪表技术与传感器,2016(2):87-90.
- [2] 吴付岗,张庆山,姜德生,等.光纤光栅Bragg波长的高斯曲线拟合求法[J].武汉理工大学学报,2007,29(12):116-118.
- [3] 尚秋峰,林炳花.光纤Bragg光栅传感系统典型寻峰算法的比较分析[J].电测与仪表,2010,47(2):1-4.
- [4] 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.
- [5] 于效宇.基于可调谐法布里—珀罗滤波器的光纤光栅解调技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2008.
- [6] 董海,井文才,刘琨,等.一种光纤Bragg光栅波长位移的计算方法[J].光电子·激光,2007,18(2):144-146.
- [7] 焦圣喜,姜娜.基于F-P滤波器的FBG解调系统改进及其寻峰算法对比分析[J].数字技术与应用,2016(4):123-124.

参考文献著录规则——会议录的著录格式

◆会议中析出的文献著录格式(有会议名称,有单篇文章题目)

作者.文章题目[C]//会议名称,会议日期(包括月、日、年),会议地点(包括城市、国家).出版地(指城市):出版单位,出版年.

[1] ABHINAVA S, SHARFUDDIN S, PING PAN, et al. Open transport switch: a software defined networking architecture for transport networks[C]// Hot topics in software defined networking 2013 (HotSDN2013), August 16-18, 2013, Hong Kong, China. New York: ACM, 2013: 115-120.