

文章编号: 1001-3806(2009)03-0323-03

高斯拟合提高光纤布喇格光栅波长检测精度

应祥岳, 徐铁峰

(宁波大学 信息学院, 宁波 315211)

摘要: 由于各种光噪声的影响, 基于可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器的光栅解调仪解调精度不够高, 光路噪声通常会带来 10pm 量级的波长测量误差。为了提高布喇格波长检测精度, 采用了在解调过程中对光纤光栅反射谱进行高斯拟合, 从而消减噪声影响的方法。实验发现, 拟合后中心波长的测量误差小于 2.5pm, 温度测量值与实际温度之间的标准方差为 0.3°C。结果表明, 在有害噪声信号不是非常大的情况下, 该方法能有效提高波长检测精度。

关键词: 光纤光学; 布喇格波长; 高斯拟合; 光纤布喇格光栅

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A

Improvement of measurement precision of fiber Bragg grating wavelength by means of Gaussian fitting

YING Xiang-yue, XU Tie-feng

(Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The measurement precision of the fiber Bragg grating demodulator with a Fabry-Perot filter is not high enough because of noise. This light noise always leads to about 10pm of wavelength measurement error. Gaussian fitting of the reflected spectrum was proposed to eliminate the noise and improve the demodulation precision. Experiments proved that the wavelength error was less than 2.5pm by means of Gaussian fitting when the standard deviation of the temperature was 0.3°C. It is proved by experiments that Gaussian fitting can be used to improve the wavelength measurement precision if there is not high noise in the system.

Key words: fiber optics; Bragg wavelength; Gaussian fitting; fiber Bragg grating

引言

1992年, Rutger 大学的 PROHASKA 等人首次将光纤光栅埋入到土木结构中测量应变。光纤布喇格光栅传感器在桥梁健康监测系统中的应用已成为近年的研究热点^[1]。传统的传感器在抗电磁场干扰、抗腐蚀、抗潮湿等能力上难以适应桥梁结构恶劣的工作环境。光纤光栅传感元件的发展为桥梁结构智能监测系统的发展提供了基础。它能测量应变、应力、温度、振动、压力等。光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、耐久性好、体积小、可分布式测量、精度高等优点^[2]。为了监测宁波市某大桥的结构健康状况, 在桥梁上布设了光纤光栅传感器网络, 并开发了健康监测软件系统。

为了精确地检测应变或温度的变化, 需要检测由被测量引起的布喇格波长的微小偏移。由于各种光噪

声的影响, 目前用于光纤光栅波长检测的各种方法的波长探测精度受到限制。特别是光路中的连接处存在固有反射时, 反射光同信号光干涉产生噪声, 限制了波长检测精度。当系统中使用宽谱光源时, 接收到的信号强度通常比较低, 使得系统的信噪比较低。光路噪声通常会带来 10pm 量级的波长测量误差。优化数字滤波及峰值提取算法是高精度测量中消减噪声影响的重要方法。数字滤波方法包括低通滤波^[3]、匹配滤波^[4]、自适应网络等^[5]; 峰值提取算法中曲线拟合精度较高, 适合光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 的函数型有多项式^[6-7]和高斯函数等。

1 高斯拟合的原理

桥梁结构健康监测系统中的光纤布喇格光栅传感器由宁波杉工结构监测与控制工程有限公司封装, 其反射率大于 90%, 光纤光栅解调仪采用美国 Micron Optics 公司的 si720 型光纤光栅解调仪。工程中记录的某个光纤布喇格光栅传感器的反射谱形状如图 1 所示。该反射谱较好地呈现出参考文献[8]中所提的高斯分布型反射谱 $R(\lambda)$:

作者简介: 应祥岳(1980-), 男, 实验师, 主要研究方向为光纤通信技术。

E-mail: xutiefeng@nbu.edu.cn

收稿日期: 2008-03-10; 收到修改稿日期: 2008-05-05

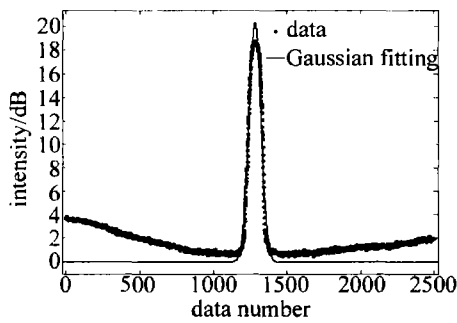


Fig. 1 Gaussian fitted curve of reflected spectrum

$$R(\lambda) = R_0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta \lambda_B} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中, R_0 是光栅布喇格波长处的反射率, $\Delta \lambda_B$ 为 3dB 半峰全宽 (full width at half-maximum, FWHM), λ_B 为峰值波长。

探测器接收到的光栅反射谱可以写成:

$$I_s(\lambda) = \frac{I_0}{4} R(\lambda) = \frac{I_0}{4} R_0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta \lambda_B} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, I_0 是激光器输出光强, $I_s(\lambda)$ 是探测器接收光强。因子 1/4 是由 3dB 耦合器引入的。此处认为激光器的半峰全宽远小于光栅的 3dB 半峰全宽, 而且在光栅光谱范围内, 激光器的输入光强为常数。

当系统中存在有害干涉信号时, 探测器接收到的光强可表示为一个复合信号 $I_s(\lambda) + I_{uw}(\lambda)$, 其中 $I_{uw}(\lambda)$ 是有害干涉带来的附加项, 这个附加项是由光栅反射的信号光和其它一些残余反射光之间相互干涉引起的。有害干涉信号可以写成^[9]:

$$I_{uw}(\lambda) = \frac{I_0}{2} \sqrt{R(\lambda) \alpha^2} \times [1 - R(\lambda)] \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} nL + \phi \right) \quad (3)$$

式中, α^2 是反射点处的光强反射率, n 是光纤的有效折

射率, $2nL$ 是信号光和反射光之间的光程差, ϕ 是由于环境干扰引入的随机相位变化。如果系统中存在多个反射点, 那么总有害干涉信号可以写成各个反射点引起的有害干涉信号的总和。

如图 1 所示, 实际工程中光信号在光纤中衰减较小, 有害噪声信号很小, 布喇格波长处相对光强达到近 20dB, 而且不出现旁瓣。因此, 考虑直接用高斯拟合的方法来提高波长检测的检测精度。由图 1 可看出, 用高斯函数来拟合虽然在布喇格波长处其光强尖峰变得更加突起, 对光强而言引入了误差, 但是, 反射谱的左右两条斜边与拟合的高斯函数重合非常好, 这样就很容易利用高斯函数左右两条斜边对称的关系, 找到位于两条边中间的布喇格波长的位置。

因为作者关心的是布喇格波长的位置, 而不是该波长处的光强的大小, 所以, 用高斯函数来拟合虽然引入了光强误差, 但利用它可以更精确地判断布喇格波长的位置。

2 高斯拟合效果分析

因为 MATLAB 软件包含有功能非常强大的曲线拟合工具包, 利用它可以方便地进行直线拟合、多项式拟合、指数型函数拟合、高斯拟合等多种拟合^[10]。利用 MATLAB 软件所带的曲线拟合工具包来分析高斯拟合对提高光纤光栅波长检测精度的效果。光纤光栅反射谱高斯拟合的结果见图 1。

选取一个光纤光栅传感器, 在恒定的条件下, 用光纤光栅解调仪多次记录其反射光谱。先用直接峰值检测的方法得到每次记录拟合前的中心波长, 再对每次记录的反射光谱进行高斯拟合, 然后再用峰值检测的方法得到拟合后的中心波长。测量的结果见表 1。对两种方法得到的中心波长的稳定度进行比较, 比较结果见图 2。

Table 1 Comparison of Bragg wavelength with Gaussian fitting

	1	2	3	4	5	6	7	8
without fitting/nm	1564.2075	1564.2000	1564.2225	1564.2275	1564.2075	1564.2100	1564.2300	1564.2200
Gaussian fitting/nm	1564.2075	1564.2075	1564.2100	1564.2100	1564.2075	1564.2075	1564.2100	1564.2100

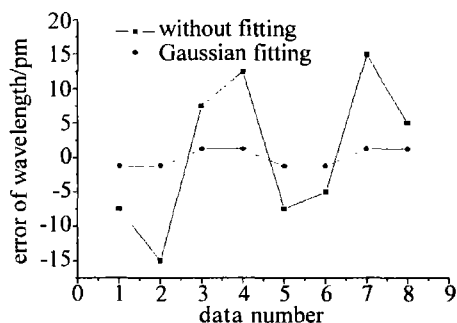


Fig. 2 Comparison of stability of Bragg wavelength with and without Gaussian fitting

由图 2 可以看出, 拟合以后测得的中心波长的误差小于 2.5pm, 这个精度大约比直接峰值检测的结果要好一个数量级。

3 温度传感器实验

为验证高斯拟合对提高光纤光栅传感系统检测精度的效果, 选取一个光纤光栅温度传感器进行实验研究。实验中采用水浴法。恒温槽采用宁波天恒仪器厂 THD-2006 型低温恒温槽, 其温度范围为 0℃ ~ 100℃,

温度波动度为 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。采用光纤光栅解调仪记录光纤光栅反射谱数据,该设备波长解调精度为 1pm ,数据送计算机进行高斯拟合,进而计算出中心波长。每次水箱达到预定温度后保持 10min ,等温度场趋于一致后开始测量,每隔 10°C 采集一次数据。

图3是测量的峰值波长与温度的关系图。通过线

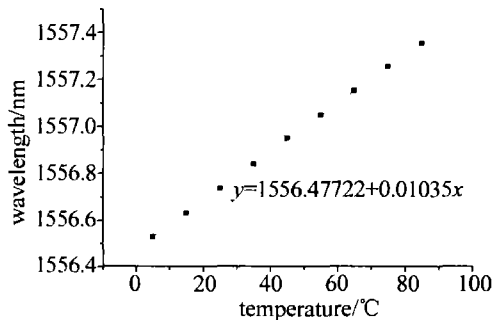


Fig. 3 Relationship of wavelength and temperature

Table 2 Water temperature and measuring temperature

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
water temperature/ $^\circ\text{C}$	5	15	25	35	45	55	65	75	85
measuring temperature/ $^\circ\text{C}$	5.11	14.79	24.95	34.88	45.52	55.21	65.13	75.3	84.97

4 结论

针对基于可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器的光纤光栅解调仪解调精度不够高的问题,提出了在解调过程中对光纤光栅反射谱进行高斯拟合,从而消减噪声影响的方法。研究表明,该方法能有效提高波长检测精度。拟合以后,中心波长的测量误差不大于 2.5pm ,这个精度大约比直接峰值检测的结果要好一个数量级。并且温度测量值与实际温度之间的标准方差为 0.3°C ,能满足一般工程的测量要求。

参考文献

- [1] ZHANG W, LU Zh T. Using fiber-optic sensors for bridge monitoring [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(3): 54-58 (in Chinese).
- [2] ZHOU Zh, TIAN Sh Zh, ZHAO X F, et al. Theoretical and experimental studies on the strain and temperature sensing performance of optical FBG [J]. Journal of Functional Materials, 2002, 33(5): 551-554 (in Chinese).
- [3] CHAN C C, JIN W, DEMOKAN M S. Enhancement of measurement accuracy in fiber Bragg grating sensors by using digital signal process-

性拟合,得到峰值波长与温度的线性关系: $y = 1556.47722 + 0.01035x$ 。利用此公式,由测量的峰值波长可以计算得到温度值,见表2。温度测量的误差如图4所示。温度测量值与实际温度之间的标准方差为 0.3°C 。

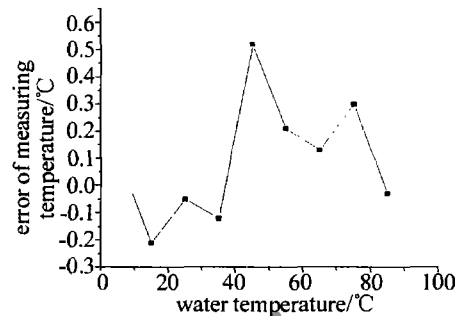


Fig. 4 Error of measuring temperature

ing [J]. Optics and Laser Technology, 1999, 31(4): 299-307.

- [4] CHAN C C, GONG J M, SHI C Z, et al. Improving measurement accuracy of fiber Bragg grating sensor using digital matched filter [J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2003, A104(1): 19-21.
- [5] CHAN C C. Improving the wavelength detection accuracy of FBG sensors using an ADALINE network [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(8): 1126-1128.
- [6] JIANG D Sh, GAO Zh T, ZHANG C. Fitted algorithm to improve the precision of demodulation system of Bragg grating sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(4): 65-66 (in Chinese).
- [7] JIANG D Sh, GAO P, ZHANG C, et al. Straight line fitting of fiber grating Bragg wavelength based on least square method [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(4): 25-27 (in Chinese).
- [8] XU M G, GEIGER H, DAKIN J P. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 391-396.
- [9] JIN W. Investigation of interferometric noise in fiber-optic Bragg grating sensors by use of tunable laser sources [J]. Appl Opt, 1998, 37(1): 17-25.
- [10] JI X L. Implementation of DSP based on MATLAB and VC complex programming [J]. Modern Electronics Technique, 2007, 31(15): 107-108 (in Chinese).

(上接第306页)

- [11] TATE T T, PRASAD P, NITIN V K. Effect of temperature, atmospheric condition, and particle size on extinction in a plume of volatile aerosol dispersed in the atmospheric surface layer [J]. Appl Opt, 1998, 27(3): 593-598.
- [12] YANG Y B. Air pollution and influence of weather condition in Chengdu [J]. Journal of Sichuan Meteorology, 2004, 24(3): 40-43 (in Chinese).
- [13] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some com-

ments [J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652-655.

- [14] FABRIZIO C, LUCA F, SIMONE T. Microwave attenuation measurements in satellite-ground links: the potential of spectral analysis for water vapor profiles retrieval [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 645-654.
- [15] LI X Y, HE Q, MAMTIMIN A, et al. Characteristics of wind velocity, humidity and temperature profiles near surface layer on a cloudy day in spring in the hinterland of taklimakan desert [J]. Arid Meteorology, 2007, 25(2): 22-28 (in Chinese).