

一种非本征光纤法布里-珀罗传感器的 信号解调算法

宋世德¹ 王晓娜² 于清旭² 徐世琅¹

(¹ 大连理工大学土木水利学院海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)
(² 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要 给出了一种基于均方误差估计的非本征光纤法布里-珀罗(EFPI)传感器的腔长解调算法。在参量估计方面, 均方误差将估计子的方差和偏差结合在一起, 具有更高的估计精度和准确度。如果给出某一个真值的一系列估计子, 则具有最小均方误差的估计子比其他估计子更为有效。在非本征光纤法-珀传感器的腔长解调方面, 则实际腔长对应于腔长均方误差估计取最小值时的腔长估计子。对一个非本征光纤法-珀压力传感器的测试结果表明, 腔长解调分辨率为 0.18 nm, 对应的压力分辨率可达 2.99 kPa。与传统的解调算法相比, 通过该算法可在较宽的动态范围内获得高的解调分辨率, 并实现绝对腔长的解调。

关键词 非本征光纤法布里-珀罗传感器; 解调; 均方误差; 估计子; 压力

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0332

A Signal Demodulating Algorithm for Extrinsic Fabry-Pérot Interferometer Sensor

Song Shide¹ Wang Xiaona² Yu Qingxu² Xu Shilang¹

¹ State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China

² School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China

Abstract A new precision demodulation algorithm based on mean square error (MSE) estimation is reported. In parametric statistics, MSE combines the errors the variance of the estimator and its bias, so the MSE incorporating both precision and accuracy is a perfectly reasonable way to assess the quality of an estimator. If there are numbers of estimators for a given true value, the estimator that leads to the smallest MSE is more efficient than the others. The actual air gap of the EFPI sensor is the air gap estimator whose MSE is minimum. The demodulation algorithm is evaluated with a pressure experiment, which shows an air gap resolution of 0.18 nm over the dynamic range of 1.84 μm , corresponding to a pressure resolution of 2.99 kPa over the applied pressure span of 31 MPa. Compared with traditional demodulation algorithms, both high-resolution and absolute air gap measurement can be achieved over a large dynamic range.

Key words extrinsic Fabry-Pérot interferometer (EFPI) sensor; demodulation; mean square error; estimator; pressure

1 引 言

非本征光纤法布里-珀罗传感器(EFPI)已应用于温度、压力、应变和振动等参量的测量中。到目前为止, 研究人员已经开发了多种非本征光纤法布里-珀罗(F-P)传感器的解调方法, 能从干涉光谱中

解调出传感器的腔长^[1~8], 比如快速傅里叶变换(FFT)方法, 离散腔长变换(DGT), 互相关解调算法等。

本文给出了一种基于均方误差估计的腔长解调算法, 与传统的解调算法相比, 本算法既可以获得

高的解调分辨率，也能在较宽的动态范围内获得绝对腔长的解调。

2 信号处理算法

非本征光纤法-珀传感器的结构如图 1 所示，将两根端面抛光的单模光纤插入准直石英毛细管，通过 CO₂ 激光将三者熔接在一起，通过两个抛光的单模光纤平端面及二者之间的空气隙构成了一个低细度 F-P 干涉仪。由于两个反射端面的菲涅耳反射率为 4% 左右，因此可以使用双光束干涉来分析低细度非本征光纤法-珀传感器，其传递函数可为

$$F(\lambda) = 2R \left[1 + \nu \cos \left(\frac{4\pi d}{\lambda} + \pi \right) \right], \quad (1)$$

式中 R 为端面的菲涅耳反射率， ν 为干涉条纹的对比度， d 为干涉腔的长度，相位 π 是由于光束在空气和光纤端面反射引起的半波损。

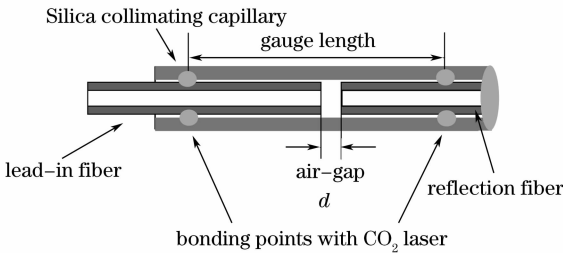


图 1 非本征光纤法-珀传感器的结构示意图

Fig. 1 Schematic of EFPI sensor

在参量统计理论中，信号的某一特征量的真值为 θ ，其估计子为 $\hat{\theta}$ ，一般希望真值 θ 的估计值 $\hat{\theta}$ 是无偏的，即其偏差 $\text{bias}(\hat{\theta}) = 0$ ，同时希望其方差 $v(\hat{\theta})$ 尽可能的小。均方误差则定义为估计值与真值误差的平方的数学期望，即

$$E_r = v(\hat{\theta}) + b^2(\hat{\theta}). \quad (2)$$

从(2)式可见，均方误差包含了偏差和方差所引起的误差，因此均方误差是评价一个估计值质量的一个非常好的手段。如果对于某一个给定的真值有一系列的估计值，则认为具有最小均方误差的估计值比其他的估计值更接近真值。

本文提出将均方误差估计的方法应用于非本征光纤 F-P 传感器的腔长解调。腔长为 d_0 的传感器反射光谱由光谱检测设备获取，进行处理后得到离散的归一化反射光谱序列 $x(n, d_0)$ ， $F(n, d)$ 则是理想反射光谱的离散化序列：

$$F(n, d) = 2R \left[1 + \nu \cos \left(\frac{4\pi d}{\lambda_0 + n\Delta\lambda} + \pi \right) \right], \quad (3)$$

式中， d_0 是待求解的腔长， d 为真实腔长 d_0 的估计子，则 $x(n, d_0)$ ， $F(n, d)$ 的均方误差估计为

$$E(d) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n, d_0) - F(n, d)]^2. \quad (4)$$

实际中可以根据所需要的腔长解调精度和运算速度，选择一个合理的腔长估计值的范围和步长，由(4)式可得到一系列的均方误差值，其中最小均方误差所对应的估计值 d 就是实际腔长 d_0 的最佳估计值。

图 2 给出了腔长估计子 d 从 260 μm 到 340 μm ，步长为 0.02 μm 的一系列的均方误差值，可见均方误差最小值对应的腔长估计子最接近实际腔长值。图 2 左上角的小图给出了腔长为 303.7168 μm 的非本征光纤 F-P 传感器的反射光谱。

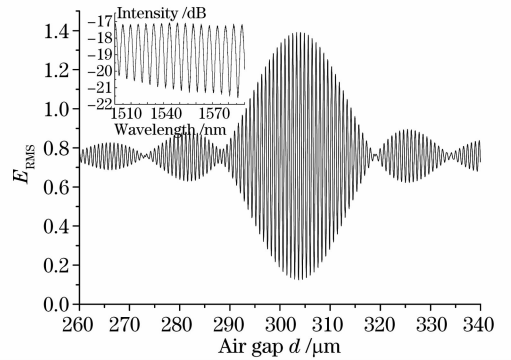


图 2 步长为 0.02 μm 的一系列的腔长估计子均方误差值 (左上角：非本征光纤 F-P 传感器的反射光谱)

Fig. 2 MSE values of the air gap estimator with a step length of 0.02 μm

(upper left: a reflected spectrum of an EFPI sensor)

3 实验结果和讨论

实验中，通过图 3 所示的解调系统来测试本解调算法的性能。高分辨率扫描激光查询仪输出的激光范围为 1510~1590 nm，输出激光通过光循环器传输到非本征光纤法-珀传感器，传感器的反射光谱

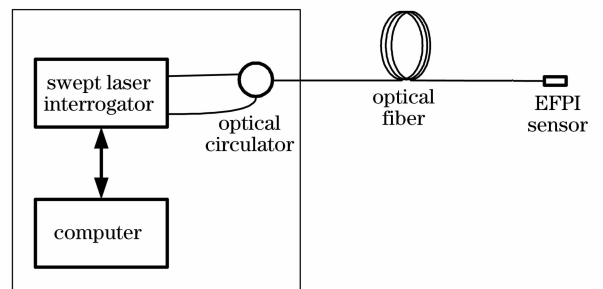


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

通过光循环器的另外一个分支后,由扫描激光查询仪获取,经过计算机归一化处理后得到 $x(n, d_0)$ 。

压力传感器的标定曲线如图 4 所示,可见在 31 MPa 的压力范围内传感器的腔长变化了 $1.84 \mu\text{m}$,标定曲线具有良好的线性,线性相关系数可以达到 -0.9999 ,该传感器的压力测量灵敏度为 59.19 nm/MPa 。

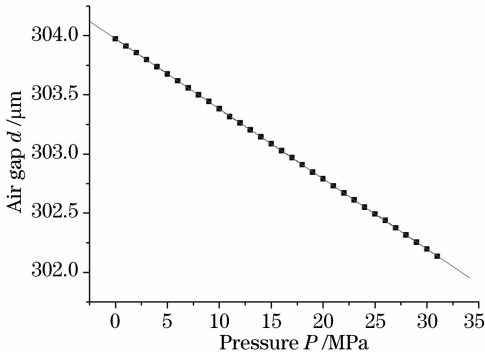


图 4 非本征光纤法-珀传感器的标定曲线

Fig. 4 Calibration curve of EFPI pressure sensor

图 5 给出了传感器在 30 min 内的腔长标准差 (SD),可见,腔长的平均值为 $303.921 \mu\text{m}$,标准差为 0.0886 nm ,如果以标准差的 2 倍作为腔长的分辨率,则采用本文解调算法得到的腔长分辨率为 0.18 nm ,对应 2.99 kPa 的压力分辨率。如果采用宽谱光源并减小腔长估计子的扫描步长,则可以进一步提高解调的分辨率。

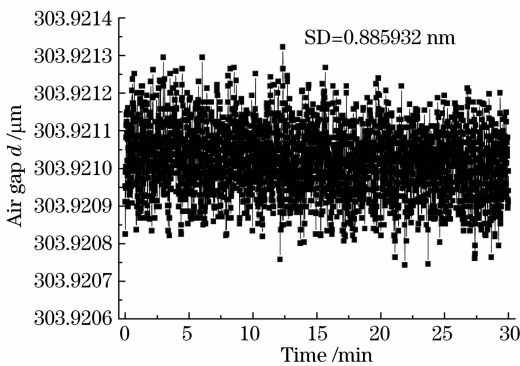


图 5 腔长的标准差

Fig. 5 Standard deviation of air gap

4 结 论

基于均方误差估计提出了一种非本征光纤 F-P 传感器的腔长解调算法。本算法首先计算一系列给定腔长估计子的均方误差值,并根据最小均方误差值对应的腔长估计子得到实际腔长的最佳估计值,并以此作为传感器的解调腔长。本文通过压力测量实验对本算法的性能进行考核,实验结果表明,在 $1.84 \mu\text{m}$ 的腔长变化范围内,腔长的解调分辨率为 0.18 nm ,对应的压力解调分辨率为 2.9 kPa ,表明本解调算法具有较高的解调分辨率,并能在较大的动态范围内实现绝对腔长的解调。

参 考 文 献

- 1 Claude Belleville, Gaetan Duplain. White light interferometric multimode fiber-optic strain sensor[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18** (1): 78~80
- 2 J. Wang, H. Xiao, J. Deng *et al.*. Self-calibrated interferometric/intensity-based (SCHIB) optical fiber pressure sensor[C]. *SPIE*, 1999, **3538**: 21~27
- 3 V. Bhatia, M. B. Sen, K. A. Murphy *et al.*. Wavelength-tracked white light interferometry for highly sensitive strain and temperature measurements[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(3): 247~249
- 4 B. Qi, G. R. Pickwell, J. Xu *et al.*. Novel data processing techniques for dispersive white light interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(11): 3165~3171
- 5 Shah M. Musa. *Real-Time Signal Processing and Hardware Development for a Wavelength Modulated Optical Fiber Sensor System* [D]. Doctor of Philosophy, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997, 30~62
- 6 陈伟民, 朱 永, 唐晓初等. 光纤法布里珀罗传感器串连复用的傅里叶变换解调方法初探[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1481~1486
Chen Weimin, Zhu Yong, Tang Xiaochu *et al.*. Study on the serial multiplex of optical fiber Fabry-Perot strain sensors with Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1481~1486
- 7 章 鹏, 朱 永, 唐晓初等. 基于傅里叶变换的光纤法布里-珀罗传感器解调研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 186~189
Zhang Peng, Zhu Yong, Tang Xiaochu *et al.*. Demodulation of the optical Fiber Fabry-Perot sensor based on Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 186~189
- 8 Jing Zhenguo, Yu Qingxu, Zhang Guiju *et al.*. A novel wavelength demodulating method for white light optical fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1347~1351
荆振国, 于清旭, 张桂菊等. 一种新的白光光纤传感系统波长解调方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1347~1351