

文章编号: 0253-2239(2006)07-0997-4

光纤菲佐传感器频分复用网络解调方法研究*

饶云江^{1,2} 王希晶¹ 朱涛^{1,2} 周昌学¹

(¹ 重庆大学光电工程学院, 重庆 400030
² 电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 610054)

摘要: 为了减小光纤菲佐传感器间的串扰,提高传感器网络的复用能力,提出了基于 Pisarenko 正弦波恢复法的光纤菲佐应变传感器频分复用网络光谱解调方案。在多光束干涉原理的基础上,建立了基于 Pisarenko 正弦波恢复方法的传感器频分复用解调模型,并对 2 个光纤菲佐传感器的串扰进行了实验研究。快速傅里叶变换能够达到应变精度好于 $\pm 10 \mu\epsilon$ 的传感器间最小腔长差约为 $500 \mu\text{m}$,而该方法可以把最小腔长差缩短至 $100 \mu\text{m}$ 左右。这意味着系统的复用能力提高了大约 5 倍。因此,该方法是一种串扰小、复用能力强的解调方法,在大容量准分布式传感网络中具有极大的潜在应用价值。

关键词: 导波与光纤光学; 光纤菲佐应变传感器网络; Pisarenko 正弦波解调; 串扰; 复用能力; 频分复用
中图分类号: TN253 文献标识码: A

Demodulation Algorithm for Frequency-Division-Multiplexed Fiber-Optic Fizeau Strain Sensor Networks

Rao Yunjiang^{1,2} Wang Xijing¹ Zhu Tao^{1,2} Zhou Changxue¹

(¹ Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030
² School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract: A spectral demodulation algorithm based on Pisarenko sine wave recovery method for frequency-division-multiplexed (FDM) fiber-optic Fizeau strain sensor networks is proposed, which is used to effectively reduce the cross talk between two adjacent sensors, and thus enhance the network multiplexing capability. Based on principle of multi-beam interferometry, demodulation model for such networks is built up and experiments are carried out to study the cross talk of two fiber-optic Fizeau sensors. The experimental results show that a strain accuracy better than $\pm 10 \mu\epsilon$ has been achieved even when the cavity length difference is $100 \mu\text{m}$ approximately, while it is about $500 \mu\text{m}$ for fast Fourier transform. It demonstrates that the multiplexing capability of the FDM fiber-optic Fizeau sensor networks can be improved by 5 times. Hence, with a low cross talk and strong multiplexing capability, the method can be widely used in quasi-distributed high multiplexing capability optical sensing systems.

Key words: guided wave and fiber optics; fiber-optic Fizeau strain sensor network; Pisarenko sine wave demodulation; cross talk; multiplexing capacity; frequency-division-multiplexing

1 引 言

在光纤传感器频分复用网络中,信号解调方法是影响系统复用能力的一个重要因素。目前已经提出了峰-峰法、离散腔长变换(Discrete gap transform, DGT)^[1]和快速傅里叶变换(Fast Fourier transform,

FFT)^[2,3]等方法,其中,应用最为广泛的是快速傅里叶变换。但是,由于快速傅里叶变换存在旁瓣效应和频谱泄漏,导致传感器之间串扰较大,限制了传感器网络的复用能力。

影响系统复用能力的另一大因素是传感器本身。

* 国家自然科学基金(60477030)和重庆市自然科学基金(8415)资助课题。

作者简介: 饶云江(1962~),男,江西人,重庆大学和电子科技大学教授,主要从事光纤传感器和光纤通信器件等方面的研究。E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

收稿日期: 2005-09-01; 收到修改稿日期: 2005-12-23

虽然光纤法布里-珀罗传感器(Fiber-optic Fabry-Pérot Interferometer, FFPI)在民用和军事领域获得了广泛的应用^[4~6],但由于复用能力不强,不适合于在大型设施如桥梁、大坝、飞机等的健康监测中使用。光纤菲佐传感器是一种改进的光纤法布里-珀罗传感器。由于在反射光纤端面上镀了一层高反膜,所以使可复用腔长大幅度增长,解决了光纤法布里-珀罗传感器复用能力弱的问题^[7]。本文采用基于参量化谱估计的 Pisarenko 正弦波恢复方法^[8],再辅以奇异值分解、总体最小二乘法,以及信号增强等技术^[9],使得系统的串扰得到有效抑制,大大提高了传感网络复用能力。

2 传感器结构

光纤菲佐应变传感器是基于多光束干涉原理,利用应变与菲佐腔腔长的变化关系来实现应变测量的,其结构如图 1 所示。现假设两反射镜的光强透过率为 T_i ,光强反射率为 $R_i, i=1,2$,在忽略损耗的情况下有 $T_i+R_i=1$,对应的干涉光光强为^[10]

$$I_r = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi} I_i, \quad (1)$$

其中 I_i 为输入光强, I_r 为反射光强, ϕ 为光线在两反射镜之间往返一次的相移,且

$$\phi = \frac{4\pi n l}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 λ 为光波在真空中的波长, l 为菲佐腔的腔长, n 为空气折射率。

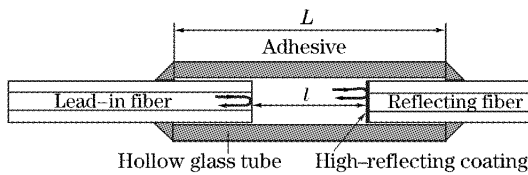


图 1 光纤菲佐传感器结构图

Fig. 1 Configuration of fiber-optic Fizeau sensor

频分复用系统要求在干涉腔腔长较长的情况下,仍然能够获得明显的干涉条纹。然而对于光纤法布里-珀罗传感器,由于其端面反射率仅为 4%,所以当腔长较长时,干涉信号已非常微弱,无法提取有用信号。相反,由于光纤菲佐传感器在反射光纤端面镀了一层高反膜(端面反射率可达 90%以上),所以在腔长相同的情况下,可以把干涉信号的强度提高近一个数量级^[11],使复用能力得到大幅度提高。

3 光谱解调

频分复用的解调过程,实际上是建立光强与空间频率,以及空间频率与应变之间相对关系的过程。根据 Pisarenko 正弦波恢复方法,如果已知测量信号是由 p 个正弦波叠加而成

$$\begin{cases} I(n) = \sum_{k=1}^p A_k \cos(2\pi f_k n), \\ n = 2p + 1, \dots, N, \end{cases} \quad (3)$$

其中 A_k, f_k 是待估计参量, N 为样本总数。那么,上式将满足差分方程

$$a_0 I(n) = - \sum_{i=1}^{2p} a_i I(n-i), \quad (4)$$

其中线性预测系数具有中心对称性:

$$\begin{cases} a_{2p-i} = a_i, & i = 1, 2, \dots, p, \\ a_0 = a_{2p} = 1, \end{cases} \quad (5)$$

求出 a_i 后,就可以解出以 a_i 为系数构成的特征多项式 $\Psi(z)$ 的 $2p$ 个共轭特征根。

$$\Psi(z) = \sum_{i=0}^{2p} a_i z^{2p-i}, \quad (6)$$

待求的空间频率可以用特征根表示为

$$f_k = \frac{\arctan[\text{Im}(z_k)/\text{Re}(z_k)]}{2\pi\Delta t}, \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, p$$

其中 z_k 为特征根, $\Delta t = 1/\delta\nu$, 为采样“时间”间隔。

结合(1)式、(2)式可知,由于光强是 $\cos \phi$ 的函数,而 ϕ 正比于腔长,因此,只要通过光强求出该余弦函数的空间频率,就可以得到腔长和应变。

把(1)式归一化,并化简为标准分式。把该分式的分母按照麦克劳林级数展开,并取二阶近似:

$$I \approx A + B_1 \cos \phi + B_2 \cos^2 \phi = A' + B'_1 \cos \phi + B'_2 \cos 2\phi, \quad (8)$$

其中 $A_1, B_1, B_2, B'_1, B'_2$ 均为可以用 R_1, R_2 表示的常数,并且对空间频率不产生影响。当 ϕ 为 π 的整数倍时,近似误差最大。在 $R_1 = 0.04, R_2 = 0.9$ 的情况下,最大误差小于 1%。因此,此近似是合理的。

滤掉直流分量以后,每个传感器的反射光强信号都可以转变成标准的(3)式。由于一次谐波与二次谐波同时存在,取(3)式中的 $p = 2k$,其中 k 为传感器复用个数。然后,对波长进行抽样,抽样频率为

$$\delta\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/(N-1), \quad (9)$$

虽然频域抽样频率 $\delta\nu = 1/\lambda - 1/(\lambda + \delta\lambda)$,但是考虑到幅值较大的样本分布在中心波长 λ_p 附近,因此 $\delta\nu$ 可以近似表示为

$$\delta\nu = \delta\lambda/\lambda_p^2. \quad (10)$$

由(4)式,理想状态下的光强信号满足矩阵:

$$\begin{bmatrix} I(2p) + I(2) & I(2p-1) + I(3) & \cdots & I(p+1) \\ I(2p+1) + I(3) & I(2p) + I(4) & \cdots & I(p+2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ I(N-1) + I(N-2p+1) & I(N-2) + I(N-2p+2) & \cdots & I(N-p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(2p+1) + I(1) \\ I(2p+2) + I(2) \\ \cdots \\ I(N) + I(N-2P) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

并记作

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \quad (12)$$

但是,实际测量值与理想值之间总存在误差,因此上式的系数矩阵 \mathbf{A} 和向量 \mathbf{b} 都同时受到噪声的影响,因此,采用总体最小二乘法而不是最小二乘法来求出线性预测系数。

记数据矩阵 $\mathbf{C} = [\mathbf{A}, \mathbf{b}]$, 上述优化问题可以转化为对 \mathbf{C} 求奇异值分解:

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H = \sum_{k=1}^{p+1} \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^H, \quad (13)$$

其中 \mathbf{U}, \mathbf{V} 为酉阵, $\mathbf{\Sigma}$ 为对角阵, $\{\sigma_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k\}$ 称为矩阵 \mathbf{C} 的第 k 个奇异值,左奇异向量和右奇异向量。用求到的第 $(p+1)$ 个右奇异向量最后一个元素的相反数对 \mathbf{v}_{p+1}^H 进行归一化。归一化后的前 p 个值即为要求的系数向量 $[a_1, a_2, \cdots, a_p]^T$ 。将该向量代入(6)式、(7)式后,即可求得某一腔长条件下的空间频率解调值。

但是,在对多项式(6)求根时,若系统的信噪比较低,则会使算法的灵敏度降低。为了得到更精确、更稳定的解,可以对数据采用汉克尔(Hankel)矩阵奇异值分解的方法进行信号增强预处理。经过预处理后,将有效地降低噪声的干扰,并得到显著改善的空间频率估计值。

求得空间频率后,把它代入离散化后的(2)式 $\phi(n) = 4\pi l \cdot \delta v m$, 有

$$l_k = f_k / 2\delta v = f_k \lambda_p^2 / 2\delta \lambda. \quad (14)$$

最后,应变与空间频率的关系为

$$\epsilon_k = \frac{f_k \lambda_p^2 / 2\delta \lambda - l'_k}{L}, \quad k = 1, 2, \cdots, p \quad (15)$$

其中 l'_k 为非佐腔的原始腔长, L 为传感器长度。

4 实验验证

为了获得基于 Pisarenko 正弦波恢复方法的应变测量精度,对采用此解调方法后传感器之间的串扰进行研究,并对大规模复用进行可行性论证,实验中使用了 2 个长度为 40 mm 的光纤菲佐应变传感器

进行频分复用实验,实验装置示意图如图 2 所示。

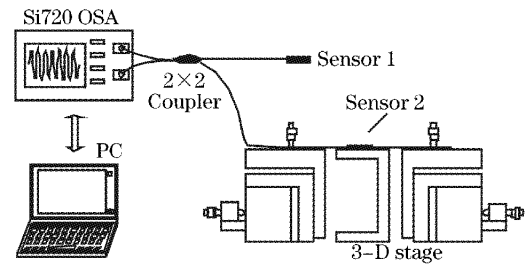


图 2 实验系统结构图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

本文使用的是美国 Micron Optics 公司生产的 Si720 光谱仪,分辨力达 0.25 pm,精度达 1 pm,光源中心波长为 1545 nm,可扫描带宽为 50 nm。首先,对传感器 1 进行封装,测得初始腔长为 1571 μm ;然后把传感器 2 置于三维微动台上,调节初始长度为 2571 μm 。之后,以 10 μm 为步距减小传感器 2 的腔长,并用 Si720 把各组光谱信息提取到电脑中。通过调试好的 Pisarenko 正弦波恢复程序和快速傅里叶变换程序分别对信号进行解调。通过计算,以两个传感器的腔长差为横坐标,解调出的应变为纵坐标做出串扰图,如图 3 所示。图 3(a)、图 3(b)是用正弦波恢复解调的结果,图 3(c)、图 3(d)是用快速傅里叶变换解调的结果。

从图 3(a)、图 3(c)两图的对比中可以看出:当采用 Pisarenko 正弦波恢复方法时,在满足应变精度小于 $\pm 10 \mu\epsilon$ 的前提下,两传感器间的腔长差最小可减少至 100 μm 左右;而快速傅里叶变换方法只有在腔长差大于 500 μm 时,才能达到此要求。这表明 Pisarenko 正弦波恢复方法的使用大大减小了传感器间的串扰。另外,在整个取样范围内,正弦波恢复的应变精度及可靠性明显高于普通的快速傅里叶变换。原因就在于:正弦波恢复是一种基于参量估计的信号处理方法,不存在谱线加宽和栅栏效应的问题,即使是在短数据流的情况下,仍然可以达到比较理想的效果。

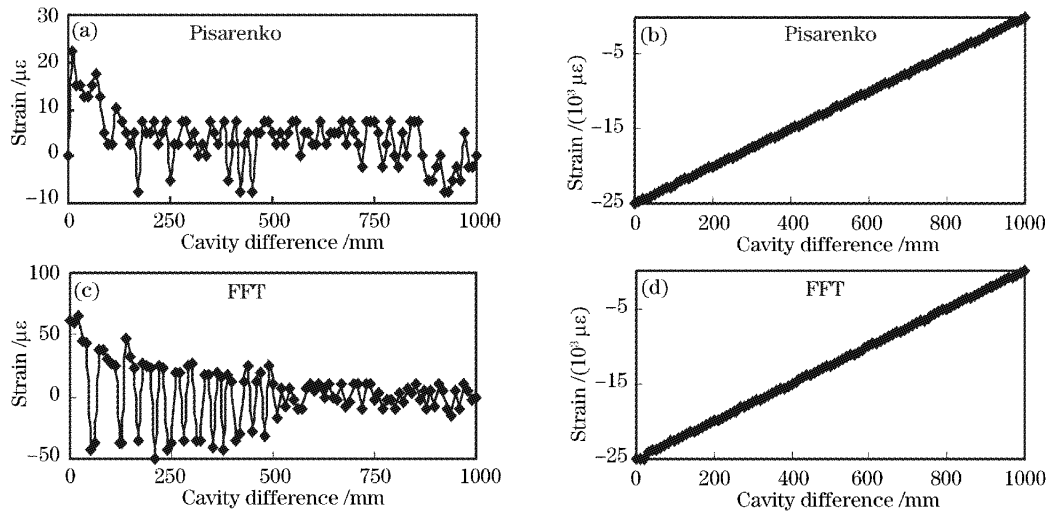


图 3 实验串扰图

Fig. 3 Experiment results of cross talk

5 结 论

本文通过实验证明:在大规模光纤菲佐传感器频分复用系统中,利用 Pisarenko 正弦波恢复模型,并辅以奇异值分解、总体最小二乘法和信号增强技术等手段,能够在腔长差小至 $100 \mu\text{m}$ 的情况下对频分复用光强信号实现高精度应变好于 $\pm 10 \mu\epsilon$ 的解调,是快速傅里叶变换对应的最小可复用腔长间隔的 $1/5$ 左右。因此,可以大大提高光纤菲佐应变传感器网络的复用能力,是一种适合于大规模传感器频分复用网络的高性能解调方案。该解调方法在大容量准分布式传感网络中将具有极大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 S. M. Musa. *Real-Time Signal Processing and Hardware Development for a Wavelength Modulated Optical Fiber Sensor System* [D]. PhD Thesis to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997
- 2 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 (in Chinese)
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
- 3 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 (in Chinese)
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**(2): 186~189
- 4 E. Udd. Overview of fiber optic sensors. (F. T. S. Yu, S. Yin eds. *Fiber Optic Sensors*) [C]. New York: Marcel Dekker, 2002. 1~39
- 5 H. F. Taylor. *Fiber Optic Sensors* [M]. New York: Marcel Dekker, 2002. 41~74
- 6 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. A novel extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensing system based on optical amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 183~186 (in Chinese)
江健,饶云江,冉曾令等. 光放大外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 183~186
- 7 Y. J. Rao, D. A. Jackson, R. Jones *et al.*. Development of prototype fiber-optic-based Fizeau pressure sensors with temperature compensation and signal recovery by coherence reading [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1685~1695
- 8 Zhang Xianda. *Modern Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 65~151 (in Chinese)
张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002. 65~151
- 9 J. A. Cadzow. Signal enhancement — a composite property mapping algorithm [J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1998, **36**(1): 49~62
- 10 C. E. Lee, H. F. Taylor. Sensors for smart structures based upon the Fabry-Perot interferometer. (E. Udd eds. *Fiber Optic Smart Structures*) [M]. New York: Wiley, 1995. 249~269
- 11 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Zhou Changxue *et al.*. Frequency-multiplexed fiber-optic Fizeau strain sensor system based on optical amplification [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2221~2225 (in Chinese)
江健,饶云江,周昌学等. 基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器频分复用系统[J]. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2221~2225