

文章编号: 0253-2239(2010)06-1776-07

# 并联复用光纤法-珀加速度传感器及解调方法的研究

王代华<sup>1,2</sup> 刘书信<sup>1,2</sup> 袁 刚<sup>1,2</sup> 贾平岗<sup>1,2</sup> 赵 艳<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)  
(<sup>2</sup> 重庆大学光电工程学院精密与智能实验室, 重庆 400044)

**摘要** 提出了一种基于菲佐干涉仪的并联复用光纤法-珀加速度传感器的解调原理及系统,其中光纤法-珀加速度传感器是基于惯性质量引起法-珀腔腔长变化实现加速度传感的原理。针对此并联复用系统,建立了菲佐干涉仪的相对输出光强与光纤法-珀加速度传感器的法-珀腔腔长和菲佐干涉仪的厚度之间的关系模型,进一步建立了基于菲佐干涉仪的光纤法-珀加速度传感器系统的加速度传感理论模型。在此基础上对菲佐干涉仪解调并联复用光纤法-珀加速度传感器信号的原理进行了数值仿真,并对基于菲佐干涉仪解调的多通道光纤法-珀加速度传感器并联复用能力进行了分析。研究表明,数值仿真结果和理论分析相吻合,菲佐干涉仪解调多通道光纤法-珀加速度传感器并联复用系统具有可行性。

**关键词** 菲佐干涉仪; 光纤法-珀加速度传感器; 并联复用

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1776

## Study on Parallel Multiplexed Fabry-Pérot Fiber Optic Accelerometers and the Signal Demodulation Method

Wang Daihua<sup>1,2</sup> Liu Shuxin<sup>1,2</sup> Yuan Gang<sup>1,2</sup> Jia Pinggang<sup>1,2</sup> Zhao Yan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China

<sup>2</sup>Precision and Intelligence Laboratory, Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University,  
Chongqing 400044, China

**Abstract** A demodulation principle and system for the multi-channel multiplexed Fabry-Pérot fiber-optic accelerometers in parallel based on a Fizeau interferometer are proposed, and the Fabry-Pérot fiber-optic accelerometers are based on the principle that the acceleration can be sensed through changing the length of the Fabry-Pérot cavity by the inertial mass. The function of the relative output intensity from the Fizeau interferometer with the Fabry-Pérot cavity length of the accelerometers and the wedge thickness of the Fizeau interferometer is established. Furthermore, a theoretical acceleration model for the multiplexed Fabry-Pérot fiber-optic accelerometers based on Fizeau interferometer is also established. On these bases, the demodulation and multiplexing principle of the multiplexed Fabry-Pérot fiber-optic accelerometers based on the Fizeau interferometer are numerically simulated and the multiplexing capacity is analyzed. The research results indicate that the numerical results are consistent with the theoretical analysis and the accelerometers are feasible.

**Key words** Fizeau interferometer; Fabry-Pérot fiber-optic accelerometer; parallel multiplexing

## 1 引 言

光纤加速度传感器与其它加速度传感器相比具

有体积小、灵敏度高、性能稳定、抗电磁干扰能力强和能进行远程信号处理等优点<sup>[1]</sup>,在振动测试、地震

收稿日期: 2009-04-27; 收到修改稿日期: 2009-06-30

基金项目: 高等学校科技创新工程重大项目培育资金(708048)、重庆市自然科学基金计划(CSTC, 2007BB3127)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0765)资助课题。

作者简介: 王代华(1966—), 教授, 博士生导师, 主要从事智能结构与系统、传感技术及系统、光纤传感技术、多维精密定位/振动控制和微装配技术等方面的研究。E-mail: dhwang@cqu.edu.cn.

波监测和航空航天等领域具有良好的应用前景<sup>[2~9]</sup>。根据工作原理的不同,常用的光纤加速度传感器可分为强度调制型<sup>[10]</sup>和相位调制型<sup>[11~14]</sup>两种。其中相位调制型光纤加速度传感器可分为法-珀(Fabry-Pérot)型<sup>[11,12]</sup>、迈克耳孙(Michelson)型<sup>[13,14]</sup>和马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)型<sup>[15]</sup>。Gerges等<sup>[12]</sup>最早提出并研究了一种基于惯性质量引起法-珀腔腔长变化实现加速度传感的光纤法-珀加速度传感器,研究表明,光纤法-珀加速度传感器具有动态范围大和分辨率高等优点,但是上述文献中只对传感现象和性能进行了初步分析,并没有给出解调方法和解调后的加速度时间曲线。

光纤法-珀传感器已用于力、变形、位移、温度、电压、电流和电场等物理量的传感,其常用的解调方法有强度解调法和相位解调法两种<sup>[16~26]</sup>。强度解调法实现方式简单,成本低,但是光强容易受光源波动的影响,传感精度低<sup>[16]</sup>。相位解调法主要有条纹计数法<sup>[17]</sup>、傅里叶变换法<sup>[18]</sup>、离散腔长变换法<sup>[19]</sup>和菲佐干涉仪解调法<sup>[20~21]</sup>。其中条纹计数法、傅里叶变换法<sup>[18]</sup>和离散腔长变换法<sup>[19]</sup>都需要较昂贵的光谱接收装置,而且解调速度慢,不能用于高频条件下。基于菲佐干涉仪解调的光纤法-珀传感器及其复用系统最早由Belleville等<sup>[21]</sup>提出,但是相关文献中并没有对其具体原理进行论证。直到目前,菲佐干涉仪解调法仅限于用在测量应变和温度等低频条件下的光纤法-珀传感器的解调,而用于高频条件下的光纤法-珀加速度传感器及其复用系统尚未见报道。

菲佐干涉仪解调法不需要昂贵的宽带光源和光谱接收器件,也没有运动部件,不仅可以降低解调成本,而且能够满足解调系统长期的稳定性和高精度的

要求。此外,菲佐干涉仪解调法可以实现光纤法-珀传感器复用信号的解调。因此,针对开发的光纤法-珀加速度传感器,提出了一种基于菲佐干涉仪的多通道并联复用光纤法-珀加速度传感器的解调原理与方法,建立了菲佐干涉仪的输出相对光强与光纤法-珀加速度传感器的法-珀腔腔长和菲佐干涉仪的厚度之间的关系模型,进一步建立了基于菲佐干涉仪的光纤法-珀加速度传感器系统的加速度传感的理论模型,并进行了数值仿真和复用能力的分析。

## 2 原理及系统

基于菲佐干涉仪解调的多通道并联复用光纤法-珀加速度传感器的原理系统如图1所示。其中第*i*个光纤法-珀加速度传感器 $FPA_i$  ( $i=1,2,\dots,6$ )的工作原理和结构如图2所示。解调系统原理如图3所示。根据图1,宽带光源通过光纤隔离器进入 $2\times 2$ 光纤耦合器(仅一个输出端使用),再连接到 $1\times 6$ 的光纤耦合器上(以六通道为例进行分析),将输入光分成6个部分接入并联复用的6个光纤法-珀加速度传感器 $FPA_1, FPA_2, FPA_3, FPA_4, FPA_5$ 和 $FPA_6$ 。6个光纤法-珀加速度传感器经过反射和干涉后产生的输出光信号通过 $1\times 6$ 耦合器输入到 $2\times 2$ 耦合器中,再通过输出光纤依次进入光纤准直器、柱形透镜和菲佐干涉仪,最后在线阵CCD中将光信号转换成电信号,并根据菲佐干涉仪解调原理求解得到加速度输出,其中各光学元件间采用单模光纤连接。

根据图2(a),光纤法-珀加速度传感器主要由光纤准直器、弹性膜片和附着在弹性膜片上的平面反射镜与惯性质量构成,其中光纤准直器和平面反射

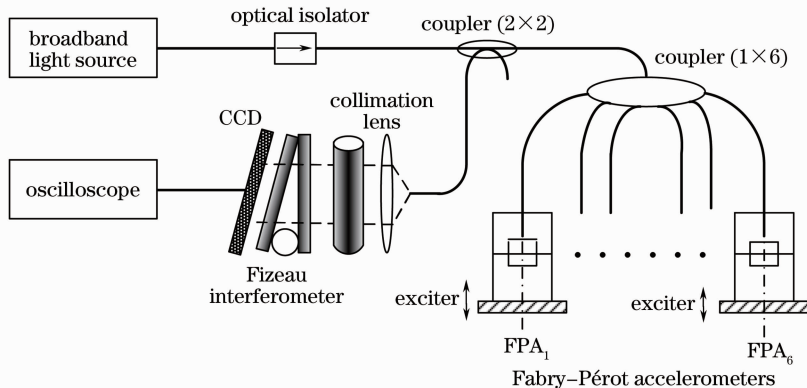


图1 菲佐干涉仪解调多通道并联复用光纤法-珀加速度传感器的原理

Fig. 1 Demodulation principle of the multi-channel multiplexed Fabry-Pérot fiber-optic accelerometers in parallel based on a Fizeau interferometer

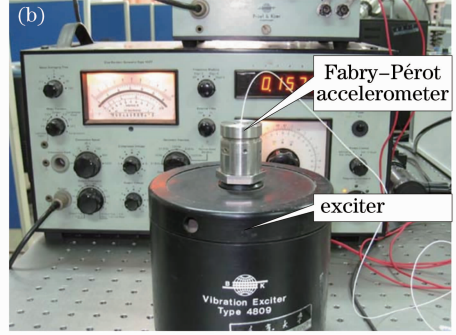
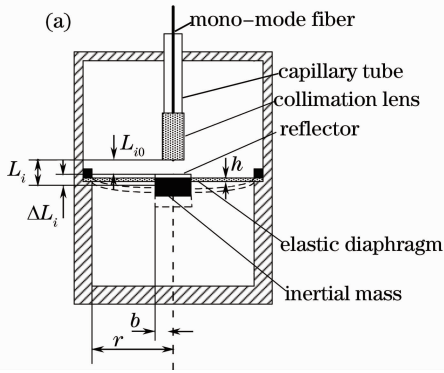


图 2 光纤法-珀加速度传感器。(a)结构原理;(b)实物图

Fig. 2 Fabry-Pérot fiber-optic accelerometer. (a) schematic; (b) photograph

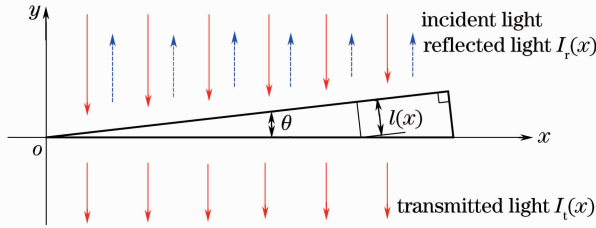


图 3 菲佐干涉仪原理

Fig. 3 Principle of the Fizeau interferometer

镜构成法-珀腔。当传感器受到沿弹性膜片轴向的加速度激励时,惯性质量在惯性作用下引起的弹性膜片变形使得法-珀腔腔长发生变化,从而改变反射和干涉后的输出光的相位。如图 2 所示。光纤法-珀加速度传感器  $FPA_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ) 静止(没有加速度作用)时的法-珀腔腔长为  $L_{i0}$ , 当  $FPA_i$  受到加速度激励时法-珀腔腔长变化量为  $\Delta L_i$ ,  $FPA_i$  的瞬时法-珀腔腔长  $L_i$  为

$$L_i = L_{i0} + \Delta L_i. \quad (1)$$

由于法-珀腔腔长变化量和光纤法-珀加速度传感器感受到的外界加速度之间存在线性关系<sup>[12]</sup>, 式中  $\Delta L_i$  可以写成

$$\Delta L_i = ka_i, \quad (2)$$

式中  $a_i$  为作用在  $FPA_i$  敏感轴向上的加速度, 光纤法-珀加速度传感器的灵敏度  $k$  为

$$k = \frac{3mv^2(1-\nu^2)}{\pi E h^3} \left[ \frac{(r/b)^2 - 1}{4(r/b)^2} - \frac{\ln^2(r/b)}{(r/b)^2 - 1} \right], \quad (3)$$

式中  $m$  为  $FPA_i$  的惯性质量,  $b$  为圆形质量块的半径,  $r, h, E$  和  $\nu$  分别为弹性膜片的工作半径、厚度和杨氏模量和泊松比。

通过对输出光相位的解调, 得到法-珀腔腔长的变化量  $\Delta L_i$ , 然后根据(2), (3)式即可求解出被测加速度  $a_i$ 。

菲佐干涉仪解调法(也称互相关解调法)实质上是一种腔长匹配法。根据图 1 和 3, 光楔的入射光为光纤法-珀加速度传感器输出的干涉光信号, 根据相

关原理, 在光楔厚度与光纤法-珀加速度传感器的法-珀腔腔长相等处透射输出的相对光强存在极大值。因此, 通过测量透射输出相对光强极大值处对应的光楔的厚度就可以得到光纤法-珀加速度传感器的法-珀腔腔长。根据图 3, 当光楔上下两表面反射率相等时, 在光楔厚度为  $l(x)$  处的透射输出光强为<sup>[27]</sup>

$$I_{co}(l) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{(1 - R_F)^2}{1 + R_F^2 - 2R_F \cos[4\pi l(x)/\lambda]} \times \sum_{i=1}^6 I_r(L_i, \lambda) d\lambda, \quad (4)$$

式中下标 co 表示相干光,  $\lambda$  为光的波长,  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$  分别表示宽带光源的最小和最大波长,  $R_F$  为光楔的表面反射率,  $I_r(L_i, \lambda)$  为  $FPA_i$  的输出光强,  $l(x)$  为楔角内任意位置  $x$  处的间隙(坐标原点位于光楔的顶角位置),  $l(x)$  和  $I_r(L_i, \lambda)$ <sup>[19]</sup> 分别由下式确定

$$l(x) = x \sin \theta, \quad (5)$$

$$I_r(L_i, \lambda) = \frac{2R_{FPi} [1 - \cos(4\pi L_i/\lambda)]}{1 + R_{FPi}^2 - 2R_{FPi} \cos(4\pi L_i/\lambda)} I_s(\lambda), \quad (6)$$

式中  $\theta$  为光楔的夹角,  $R_{FPi}$  为  $FPA_i$  的法-珀腔的反射率, 下标 r 表示光纤法-珀加速度传感器法-珀腔的反射光,  $I_s(\lambda)$  为传感器入射光光强。

为了讨论方便, 定义光纤法-珀加速度传感器的输出信号通过光楔后的输出相对光强为

$$I_o(l) = \frac{I_{co}(l)}{I_s(\lambda)}. \quad (7)$$

当  $R_{FPi}$  和  $R_F$  取较小的值时, 可以用双光束干涉近似法-珀腔的多光束干涉, 因此输出相对光强可表示为

$$I_o(l) = \sum_{i=1}^6 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left( 2R_{FPi} - 2R_{FPi} \cos \frac{4\pi L_i}{\lambda} \right) \times \left[ (1 - 2R_F) - 2R_F \cos \frac{4\pi l}{\lambda} \right] d\lambda, \quad (8)$$

令  $R_{FPi} = R_F, A = 2R_F, B = -2R_F, C = 1 - 2R_F,$

$$I_1 = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} ACd\lambda, I_2(L_i) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} CB \sum_{i=1}^6 \cos \frac{4\pi L_i}{\lambda} d\lambda,$$

$$I_3(l) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} AB \cos \frac{4\pi l}{\lambda} d\lambda,$$

$$I_4(L_i, l) = \frac{B^2}{2} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sum_{i=1}^6 \cos \frac{4\pi(L_i + l)}{\lambda} d\lambda,$$

$$I_5(L_i, l) = \frac{B^2}{2} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sum_{i=1}^6 \cos \frac{4\pi(L_i - l)}{\lambda} d\lambda,$$

则(8)式可写为

$$I_o(l) = 6I_1 + I_2(L_i) + 6I_3(l) + I_4(L_i, l) + I_5(L_i, l). \quad (9)$$

(9)式确定了菲佐干涉仪的输出相对光强与并联复用的光纤法-珀加速度传感器的法-珀腔腔长和菲佐干涉仪厚度之间的关系,(9)式确定的总相对输出光强与菲佐干涉仪厚度的关系如图4所示,图中 $p_1, p_2, \dots, p_6$ 分别为输出相对光强的6个极大值,表现为CCD上的亮条纹。(9)式中右边第一项 $6I_1$ 为菲佐干涉仪的相对输出光强中与腔长 $L$ 和菲佐干涉仪厚度 $l$ 均无关;第二项 $I_2$ 与腔长 $L$ 有关但与菲佐干涉仪厚度 $l$ 无关,在图像上表现为光强总体曲线向上平移 $6I_1 + I_2$ 。第三项 $6I_3$ 为菲佐干涉仪的输出相对光强中仅与菲佐干涉仪厚度 $l$ 有关的项,且变化幅度随着 $l$ 的增大而变小。第四项 $I_4$ 的等效腔长 $(L_i + l)$ 有6个,分别为6个传感器法-珀腔腔长和菲佐干涉仪厚度之和,由于这6个等效腔长均大于6个法-珀腔腔长 $L_i$ 和菲佐干涉仪厚度 $l$ 中任何一个,这就决定了这些等效腔长极易超过光源的相干长度,因此它比第三项 $I_3$ 的干涉条纹少得多,几乎没有体现出明显的干涉条纹,就已经进入白光的非干涉状态。第五项 $I_5$ 的等效腔长 $(L_i - l)$ 分

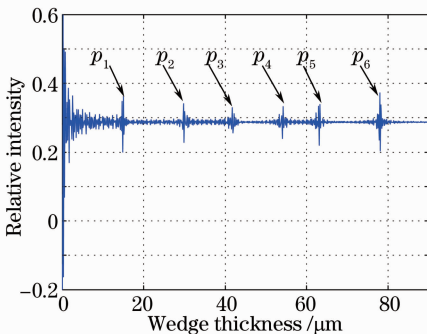


图4 菲佐干涉仪的输出相对光强

Fig. 4 Relative light intensity output from the Fizeau interferometer

别是6个法-珀腔腔长与菲佐干涉仪厚度之差,当 $l=L_i$ 时取得极大值,而这一项也就是本系统中的决定性因素,也即确定了菲佐干涉仪上第 $i$ 个亮条纹 $p_i$ 的位置 $x_i |_{\max[I_o(l)]}$ 。该亮条纹处菲佐干涉仪的厚度与 $FPA_i$ 的法-珀腔腔长相等,可表示如下

$$L_i = l \{ x_i |_{\max[I_o(l)]} \}, \quad (10)$$

式中 $x_i |_{\max[I_o(l)]}$ 为 $p_i$ 处对应的 $x$ 值。

根据(1),(5)和(10)式,可得到 $FPA_i$ 的法-珀腔腔长变化量为

$$\Delta L_i = x_i |_{\max[I_o(l)]} \sin \theta - L_{i0}, \quad (11)$$

(11)式确定了 $FPA_i$ 的法-珀腔腔长变化量与光楔上亮条纹的位置关系。根据(2)和(11)式, $FPA_i$ 的加速度 $a_i$ 与光楔亮条纹的位置 $x_i |_{\max[I_o(l)]}$ 之间的关系为

$$a_i = \frac{x_i |_{\max[I_o(l)]} \sin \theta - L_{i0}}{k}, \quad (12)$$

(3)和(12)式确定了基于菲佐干涉仪的光纤法-珀加速度传感器系统的加速度解调理论模型。根据(12)式,通过测量光楔上亮条纹的位置即可实现多通道并联复用光纤法-珀加速度传感器的解调。

### 3 菲佐干涉仪解调多通道光纤法-珀加速度传感器并联复用能力

对于菲佐干涉仪解调光纤法-珀加速度传感器并联复用的系统,光纤法-珀加速度传感器的复用能力越强,单解调系统所能解调的传感器数量越多,测量成本就越低。影响光纤法-珀加速度传感器复用能力的因素主要有三个:解调系统所能分辨的两传感器之间的最小腔长差,单个传感器的腔长变化范围和菲佐干涉仪的最大厚度。下面分别予以讨论。

#### 1) 系统所允许的最小腔长差

根据(6)式,两个光纤法-珀加速度传感器并联复用的总的输出信号可以表示为<sup>[20]</sup>

$$I_r(\nu) = \left[ 2E + F_1 \cos \left( \frac{4\pi L_i \nu}{c} \right) + F_2 \cos \left( \frac{4\pi L_{i+1} \nu}{c} \right) \right] I_s \exp \left[ - \frac{(\nu - \nu_p)^2}{2\sigma_\nu^2} \right], \quad (13)$$

式中 $\nu$ 为光源的频率, $\nu_p$ 表示光源中心波长的频率, $\sigma_\nu$ 表示高斯光源频率方差, $c$ 为光速, $L_i$ 和 $L_{i+1}$ 分别表示两个复用的光纤法-珀加速度传感器的法-珀腔腔长, $E, F_1$ 和 $F_2$ 均表示与光纤法-珀加速度传感器反射率有关的常数。令 $F_1 = F_2 = F$ , (13)式可表示为

$$I_r(\nu) = 2I_s \left[ E + F \cos \frac{2\pi\nu(L_i + L_{i+1})}{c} \times \cos \frac{2\pi\nu(L_i - L_{i+1})}{c} \right] \exp \left[ - \frac{(\nu - \nu_p)^2}{2\sigma_\nu^2} \right]. \quad (14)$$

根据(14)式,复合信号可以看成是空间“频率”为  $L_i + L_{i+1}$  的周期信号,其幅度除受到高斯函数的调制外,还受到“频率”为  $|L_{i+1} - L_i|$  的周期信号的调制。令  $\Delta\delta_L = L_{i+1} - L_i$ ,则差频信号周期为  $1/\Delta\delta_L$ 。当  $\nu = \nu_p \pm 3\sigma_\nu$  时,光源光强已由  $I_s$  降至  $0.011I_s$ 。也就是说,当  $1/\Delta\delta_L \leq 6\sigma_\nu$  时,在光源有效范围内才能观察到差频信号的一个整周期。因此,可以认为两个传感器复用时的最小腔长差  $\Delta\delta_L$  为

$$\Delta\delta_L \geq \frac{1}{6\sigma_\nu} = \frac{\lambda_p^2}{6\sigma_\lambda}, \quad (15)$$

式中  $\sigma_\lambda$  表示高斯光源的波长带宽,  $\lambda_p$  为峰值波长。由(15)式可知,光源带宽越宽,越易于分辨两个腔长相近的信号。

#### 2) 单个传感器的腔长变化范围

单个传感器的腔长变化范围与加速度引起的弹性膜片振动位移有关。对于图 2 所示的膜片型光纤法-珀加速度传感器,根据(2)和(3)式,其腔长变化范围可以通过调整传感器的结构参数进行控制。

#### 3) 菲佐干涉仪最大厚度

当解调系统所允许的两传感器之间的最小腔长差和单个传感器的腔长变化范围确定后,所能复用传感器的数量则完全由菲佐干涉仪的最大厚度来确定。

菲佐干涉仪的最大厚度  $l_{\max}$  与光纤法-珀加速度传感器腔长  $L_i$  和光源相干长度  $l_c$  的关系是

$$|l_{\max} - L_i| \leq l_c, \quad (16)$$

式中光源的相干长度  $l_c$  为

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (17)$$

式中  $\Delta\lambda$  是光源的线宽。根据(16)和(17)式,光源的线宽越小,相干长度越大,光纤法-珀加速度传感器的法-珀腔腔长能达到的最大值也越大,从而能复用的光纤法-珀加速度传感器越多。由图 4 可知,当多个光纤法-珀加速度传感器复用时,在菲佐干涉仪厚度小于  $10 \mu\text{m}$  的地方,显示的是(9)式中第三项  $6I_3(l)$  的单边衰减条纹。所以在复用时传感器的法-珀腔腔长不能小于  $10 \mu\text{m}$ ,避免腔长匹配点  $p_i$  太靠近  $l=0$  附近的单边衰减干涉条纹,以便保证准确地读出  $p_i$  位置。因此,在讨论菲佐干涉仪最大厚度与传感器复用个数的关系时,必须考虑菲佐干涉仪厚度小于  $10 \mu\text{m}$  部分。根据(15)和(17)式,假定单个传感器腔长最大变化为  $\Delta L_{\max}$ ,则菲佐干涉仪的最大厚度  $l_{\max}$  与传感器的复用个数  $n$  之间的关系由下式决定

$$n \leq \frac{l_{\max} - l_0}{\Delta\delta_L + 2\Delta L_{\max}}, \quad (18)$$

式中  $l_0 = 10 \mu\text{m}$ ,表示在多个传感器复用时菲佐干涉仪厚度小于  $10 \mu\text{m}$  的部分不能准确确定  $p_i$  的位置。根据(16)和(18)式,菲佐干涉仪的最大厚度越大、光源相干长度越长、系统所能分辨的两传感器之间的最小腔长差越小以及单个传感器腔长最大变化范围越小,系统所能复用的传感器数目就越多。

根据上面复用特性分析可知,只要光纤法-珀加速度传感器腔长从上文中提到的 1) 和 3) 两个方面考虑,再根据 2) 选择合适的光源,菲佐干涉仪解调系统就能够实现多个并联光纤法-珀加速度传感器的解调。

## 4 数值仿真及讨论

考虑 6 个光纤法-珀加速度传感器的初始腔长分别为  $L_1 = 15 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 30 \mu\text{m}$ ,  $L_3 = 42 \mu\text{m}$ ,  $L_4 = 54 \mu\text{m}$ ,  $L_5 = 63 \mu\text{m}$  和  $L_6 = 78 \mu\text{m}$ ,6 个光纤法-珀加速度传感器的灵敏度均为  $k = 0.5 \mu\text{m}/g_n$  ( $g_n$  为标准自由落体加速度)菲佐干涉仪楔角  $\theta = 0.05^\circ$ 。光源为波长在  $400 \sim 700 \text{ nm}$  之间的白光光源。作用于光纤法-珀加速度传感器的激励信号为正弦振动激励  $[A \sin(2\pi ft + \varphi)]$ ,分两种情况:1) 初相位不同 ( $\varphi_1 = \pi/4$ ,  $\varphi_2 = \pi$ ,  $\varphi_3 = 0$ ,  $\varphi_4 = \pi/3$ ,  $\varphi_5 = 2\pi/3$  和  $\varphi_6 = 0$ )、振幅和频率相同,2) 频率不同 ( $f_1 = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 60 \text{ Hz}$ ,  $f_4 = 70 \text{ Hz}$ ,  $f_5 = 80 \text{ Hz}$  和  $f_6 = 90 \text{ Hz}$ )、振幅和相位相同。光纤法-珀加速度传感器出射光经菲佐干涉仪解调的数值仿真结果分别如图 5 和 6 所示。

图 5(a)和 5(b)分别为 6 个并联复用的光纤法-珀加速度传感器受到初相位为  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_6$ , 振动频率均为  $80 \text{ Hz}$  和振幅均为  $2 \mu\text{m}$  的正弦振动激励时出射光经菲佐干涉仪解调后的相对光强峰值与时间和菲佐干涉仪厚度的变化曲线和菲佐干涉仪解调出的加速度时间曲线。在图 5(a)中,光强峰值曲线  $p_1, p_2, \dots, p_6$  分别表示初始腔长为  $L_1, L_2, \dots, L_6$  的 6 个光纤法-珀加速度传感器在振动激励作用下通过菲佐干涉仪后的输出相对光强曲线。根据图 5(a),光纤法-珀加速度传感器经菲佐干涉仪后的输出相对光强随时间成正弦曲线变化,与输入的外界振动情况一致,菲佐干涉仪出射光的相对光强极大值与光纤法-珀加速度传感器的腔长完全匹配。根据图 5(b),菲佐干涉仪解调出的加速度时间曲线为幅度均为  $0.0806 g_n$ 、频率均为  $80 \text{ Hz}$  和相位分别为  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_6$  的正弦曲线,与输入振动的加速度时间曲线一致。

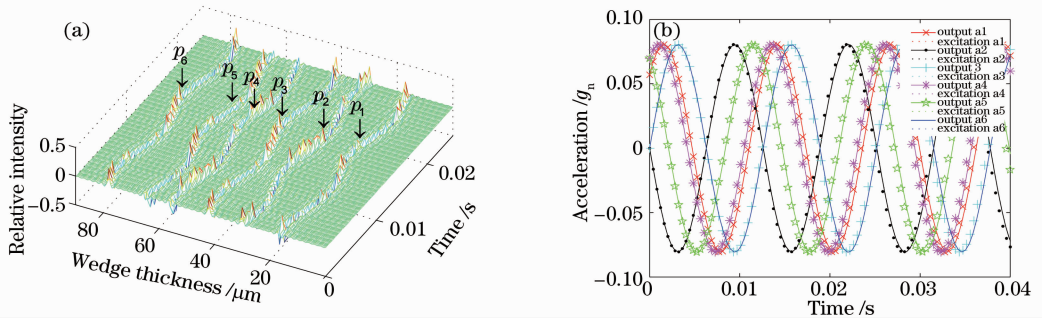


图 5 不同相位正弦激励下菲佐干涉仪解调的输出。(a)相对光强与时间和菲佐干涉仪厚度的变化曲线；  
(b)并联光纤法-珀加速度传感器的加速度时间曲线

Fig. 5 Output from the Fizeau interferometer when the FPAs are excited by sinusoidal excitations with different phases. (a) relative light intensity as a function of the time and the wedge thickness of the Fizeau interferometer; (b) demodulated acceleration time histories of the multiplexed Fabry-Pérot fiber-optic accelerometers in parallel

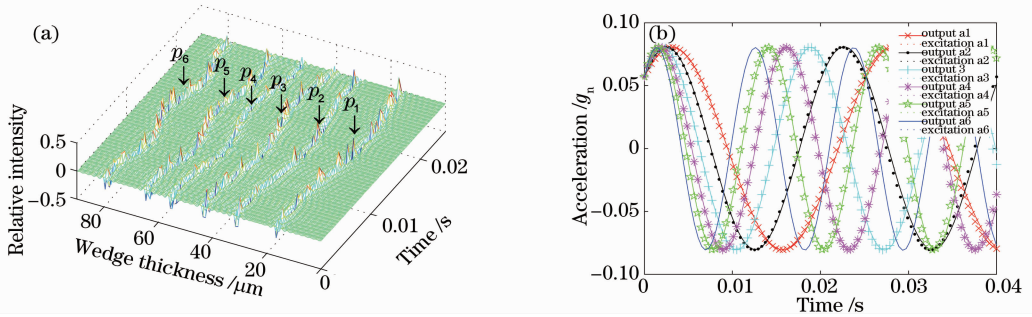


图 6 不同频率( $f_1, f_2, \dots, f_6$ )正弦激励下菲佐干涉仪解调的输出。(a)相对光强与时间和菲佐干涉仪厚度的变化曲线；  
(b)并联光纤法-珀加速度传感器的加速度时间曲线

Fig. 6 Output from the Fizeau interferometer when the FPAs are excited by sinusoidal excitations with different frequencies ( $f_1, f_2, \dots, f_6$ ). (a) relative light intensity as a function of the time and the wedge thickness of the Fizeau interferometer; (b) demodulated acceleration time histories of the multiplexed Fabry-Pérot fiber-optic accelerometers in parallel

图 6(a)和 6(b)分别为 6 个并联复用光纤法-珀加速度传感器受到振动频率为  $f_1, f_2, \dots, f_6$ , 振幅均为  $2 \mu\text{m}$  和初相位均为  $\pi/4$  的正弦振动激励时出射光经菲佐干涉仪解调后的相对光强峰值与时间和菲佐干涉仪厚度的变化曲线和菲佐干涉仪解调出的加速度时间曲线。根据图 6(a), 光强峰值曲线  $p_1, p_2, \dots, p_6$  与输入的振动频率、振幅和相位严格一致。根据图 6(b), 菲佐干涉仪解调出的 6 条加速度时间曲线为振幅均为  $0.0806 g_n$ 、相位均为  $\pi/4$ 、频率分别为  $f_1, f_2, \dots, f_6$  的正弦曲线, 与输入振动的加速度时间曲线一致。

图 5 和 6 的数值仿真结果表明, 菲佐干涉仪能够准确、实时地解调多通道并联复用的光纤法-珀加速度传感器的输出信号。

### 5 结 论

提出了一种基于菲佐干涉仪的多通道并联复用光纤法-珀加速度传感器的解调原理与方法, 建立了

菲佐干涉仪的输出相对光强与光纤法-珀加速度传感器的法-珀腔腔长和菲佐干涉仪的厚度之间的关系模型, 进一步建立了基于菲佐干涉仪的光纤法-珀加速度传感器系统的加速度传感的理论模型。在此基础上对菲佐干涉仪解调光纤法-珀加速度传感器信号的原理进行了数值仿真。并对基于菲佐干涉仪解调的多通道光纤法-珀加速度传感器并联复用的能力进行了分析。研究结果表明, 数值仿真结果和理论分析结果相吻合, 菲佐干涉仪解调多通道并联复用光纤法-珀加速度传感器系统具有可行性。

### 参 考 文 献

- 1 Zeng Nan, Shi Chunzheng, Zhang Min *et al.*. A 3-component fiber-optic accelerometer for well logging [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **234**(1-6): 153~162
- 2 Ding Guilun, Liu Zhenfu, Cui Yuming *et al.*. An all-fiber optic accelerometer based on compliant cylinders [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 340~343

丁桂兰, 刘振富, 崔宇明 等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 340~343

- 3 B. Lee. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**(2): 57~79
- 4 Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91  
肖浩, 李芳, 王永杰等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 87~91
- 5 Kang Chong, Zhang Min, Chen Hongjuan *et al.*. Pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical shell [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1214~1219  
康崇, 张敏, 陈洪娟等. 薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1214~1219
- 6 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 123~127  
杭利军, 何存富, 吴斌等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 123~127
- 7 Li Hongqiang, Yu Xiaogang, Miao Changyun *et al.*. Research of intelligent clothing for body temperature monitoring based on distributed optical fiber Bragg grating sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 208~212  
李鸿强, 于晓刚, 苗长云等. 光纤布拉格光栅人体测温的关键问题研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 208~212
- 8 Ma Bin, Xu Jian, Sui Qingmei. Experimental study on coupling high-frequency fiber-optic vibration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1177~1182  
马宾, 徐健, 隋青美. 耦合型高频光纤振动传感器实验研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1177~1182
- 9 Wang Zefeng, Hu Yongming. New anti-aliasing filtering underwater fiber-optic acoustic sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 65~69  
王泽锋, 胡永明. 一种新型的抗混叠滤波光纤水声传感器[J]. 光学学报, 2009, **29**(s1): 65~69
- 10 J. Kalenik, R. Pajak. A cantilever optical-fiber accelerometer [J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 1998, **68** (1-3): 350~355
- 11 Feng Lishuang, Liu Huilan, Lin Heng *et al.*. MOEMS accelerometer based on double Fabry-Pérot interferometers and closed loop [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, **32**(6): 691~694  
冯丽爽, 刘惠兰, 林恒等. 基于 Fabry-Pérot 干涉仪的闭环微光机电加速度计[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, **32**(6): 691~694
- 12 A. S. Gerges, T. P. Newson, J. D. C. Jones *et al.*. High-sensitivity fiber-optic accelerometer [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(4): 251~253
- 13 En De, Chen Caihe, Cui Yuming *et al.*. Integrated optics michelson interference acceleration seismic geophone [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 399~403  
恩德, 陈才和, 崔宇明等. 集成光学迈克尔孙干涉型加速度地震检波器[J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 399~403
- 14 Wang Ting, Wang Huinan. Fiber-optic accelerometer based on Michelson interferometry [J]. *Computer Measurement & Control*, 2005, **13**(10): 1066~1068  
王婷, 王惠南. 基于 Michelson 干涉原理的光纤加速度计的研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, **13**(10): 1066~1068
- 15 C. N. Pannell, J. D. C. Jones, D. A. Jackson. The effect of environmental acoustic noise on optical fiber based velocity and vibration sensor systems [J]. *Measurement Science and Technology*, 1994, **5**(4): 412~417
- 16 Sun Jiyong, Chen Weimin, Zhu Yong *et al.*. An optic fiber Fabry-Pérot strain sensor system based on tunable Fabry-Pérot [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(4): 49~50  
孙吉勇, 陈伟民, 朱永等. 基于可调谐法-珀腔解调的光纤法-珀应变传感系统[J]. 激光杂志, 2002, **23**(4): 49~50
- 17 Wang Yong, Liao Yanbiao, Tian Qian. Signal analysis of wavelength scanning interferometry for absolute distance measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4): 544~551  
王勇, 廖延彪, 田芊. 用于绝对距离测量的波长扫描干涉仪信号分析[J]. 光学学报, 1999, **19**(4): 544~551
- 18 Chen Weimin, Zhu Yong, Tang Xiaochu *et al.*. Study on the serial multiplex of optical fiber Fabry-Pérot strain sensors with Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1481~1486  
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
- 19 Chen Yusen. Algorithms and Multiplexing of Fiber Fabry-Pérot strain Sensor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. 16~20  
陈雨森. 光纤法-珀应变传感器的解调算法改进和复用技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003. 16~20
- 20 Zhang Peng. Study on Transform Demodulation Theory of Optical Fiber Fabry-Pérot Sensor and Implementation of Embedded System [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. 42~48  
章鹏. 光纤法-珀传感器非扫描式相关变换解调原理研究及嵌入式系统实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2005. 42~48
- 21 C. Belleville, G. Duplain. Fabry-Pérot optical sensing device for measuring a physical parameter [P]. US. 5,202,939 1993
- 22 Wang Yanhua, Liu Yan, Tan Zhongwei *et al.*. Modified rouard method for fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 840~845  
王燕花, 刘艳, 谭中伟等. 用于光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的改进的 Rouard 算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 840~845
- 23 Ma Jichi, Li Yan, Sun Wenke *et al.*. Fabry-Pérot interferometer using tunable diode laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1296~1300  
马骥驰, 李岩, 孙文科等. 可调波长半导体激光法布里-珀罗干涉仪[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1296~1300
- 24 Wu Jing, Wang Ming. Application of radial basis function network in demodulation of Fabry-Pérot pressure sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1145~1149  
吴婧, 王鸣. 径向基函数神经网络在光纤法布里-珀罗传感器解调中的应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1145~1149
- 25 Rao Yunjiang, Deng Ming, Zhu Tao. Visibility-enhanced in-line Fabry-Pérot interferometers by the use of femtosecond lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1459~1462  
饶云江, 邓明, 朱涛. 飞秒激光加工的高对比度法布里-珀罗干涉传感器[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1459~1462
- 26 Tang Caijie, Jiang Yi. High-finesse micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1062~1065  
唐才杰, 江毅. 高精度微透镜光纤法布里-珀罗干涉仪[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 1062~1065
- 27 C. Belleville, G. Duplain. White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 78~80