

文章编号: 0253-2239(2008)09-1664-07

# 减敏控制光纤法布里-珀罗腔单值性用于解调振动频率

王燕花<sup>1,2</sup> 谭中伟<sup>1,2</sup> 任文华<sup>1,2</sup> 刘 艳<sup>1,2</sup> 简水生<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; <sup>2</sup> 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要** 通过对光纤法布里-珀罗(Fabry-Pérot cavity, F-P)腔单波长功率监测,对时域信号进行快速傅里叶变换(FFT),检测振动信号频率。建立了F-P腔的瞬时响应模型。发现透射响应比反射响应有微小延时,证明了F-P腔的多次反射原理对于一般频率不超过几十千赫兹的振动信号的测量没有影响。直接作用在F-P腔上的振动较强时,超过解调单值范围,波形发生畸变。通过增大振动源与F-P腔的距离控制解调单值性,当距离增至8 cm时,获得相对准确的解调结果。

**关键词** 传感; 法布里-珀罗(F-P)腔; 振动; 解调; 单值性

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1664

## Monodromy Control of Fiber Fabry-Pérot Cavity by Desensibilization for Demodulation of Vibration Frequency

Wang Yanhua<sup>1,2</sup> Tan Zhongwei<sup>1,2</sup> Ren Wenhua<sup>1,2</sup> Liu Yan<sup>1,2</sup> Jian Shuisheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China  
<sup>2</sup> Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** Vibration signal frequency is measured by monitoring the single wavelength power of fiber Fabry-Pérot (F-P) cavity and applying fast Fourier transform (FFT) to the time domain signal. An instantaneous model is established and the minute response delay between transmission and reflection is shown. It is proved that the multi-reflection of F-P cavity has little influence on the measurement of vibration with a frequency generally not higher than some dozen kilohertz. The waveform will be distorted when the vibration directly applied on the F-P cavity is intense and out of the demodulation monotropic range. Desensibilization is implemented by increasing the distance between the vibration source and the F-P cavity to control the monodromy of demodulation and more accurate demodulation results are obtained when the distance is increased to 8 cm.

**Key words** sensing; Fabry-Pérot (F-P) cavity; vibration; demodulation; monodromy

## 1 引 言

光纤法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)腔传感器是目前应用最为广泛的光纤传感器之一<sup>[1~6]</sup>。与其他传感器相比,它具有抗电磁干扰、适用范围广、精度高、体积小、重量轻等优势,并且可以综合波分复用、频分复用、空分复用等多种复用方式,在大规模传感方面具有很高的潜力,成为当前光纤传感领域

的一个研究热点<sup>[7, 8]</sup>。

目前广泛使用的F-P腔传感器主要是将传感信号转化为腔长的变化,在接收端扫描透射谱,通过对透射谱做傅里叶变换,或进行可调谐腔长匹配,求得腔长的变化后解调出传感信号<sup>[9, 10]</sup>。每测量一个信号值,需要对整个波长范围扫描一次或者调谐一个周期以匹配腔长的变化,因此当信号变化较快时,

**收稿日期**: 2008-01-07; **收到修改稿日期**: 2008-04-02

**基金项目**: 国家自然科学基金(60607001)和北京交通大学基金(2006XZ010)资助课题。

**作者简介**: 王燕花(1982-),女,博士研究生,主要从事光纤通信及光纤传感等方面的研究。

E-mail: verphia@gamil.com

**导师简介**: 简水生(1929-),男,中科院院士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信及光纤传感等方面的研究。

E-mail: ssjian@bjtu.edu.cn

不便于进行实时测量,通常用于静态或缓变信号检测。本文采用 F-P 腔单波长功率监测,对时域信号进行快速傅里叶变换(FFT),用于检测快速振动信号频率。针对实验中出现的波形畸变引起的频率测量误差进行了分析。通过建立 F-P 腔的瞬时响应模型,证明了 F-P 腔的多次反射对于一般频率不超过几十千赫兹的振动信号的测量没有影响。畸变是由于振动较强,光相位变化超过解调单值范围引起。通过对 F-P 腔减敏,将直接作用在光纤布拉格光栅(FBG)F-P 腔上的信号强度控制在解调单值范围以内,可以准确解调振动信号频率。实验结果与理论分析有较好的一致性。

## 2 F-P 腔模型

### 2.1 F-P 腔稳态模型

F-P 腔结构如图 1 所示,腔长  $L$ ,腔内损耗因子为  $\sqrt{\alpha}$ ,传输常数为  $\beta$ 。设两反射端完全对称,透射和反射系数分别为  $t, r$ ,输入光复振幅为  $A_{in}$ ,经 F-P 腔透射和反射后的光复振幅分别为  $A_{out}, B_{out}$ 。设 F-P 腔内总的前向传输光在反射端 2 处的复振幅为  $A$ ,总的反向传输光在反射端 1 处的复振幅为  $B$ 。在没有传感信号的稳态下,有<sup>[11]</sup>

$$A = \sqrt{\alpha}(tA_{in} + rB) \exp(j\beta L), \quad (1)$$

$$B = \sqrt{\alpha}r \exp(j\beta L)A, \quad (2)$$

从中求解出  $A, B$  与输入光  $A_{in}$  的关系,进而可得

$$A_{out} = tA = \frac{\sqrt{\alpha}t^2 \exp(j\beta L)}{1 - \alpha r^2 \exp(j2\beta L)} A_{in}, \quad (3)$$

$$B_{out} = rA_{in} + tB = rA_{in} + \frac{\alpha r t^2 \exp(j2\beta L)}{1 - \alpha r^2 \exp(j2\beta L)} A_{in}, \quad (4)$$

则稳态下的透射率和反射率可分别由  $|A_{out}/A_{in}|^2$ 、 $|B_{out}/A_{in}|^2$  表示。

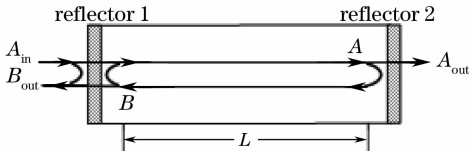


图 1 F-P 腔示意图

Fig. 1 Schematic of F-P cavity

### 2.2 F-P 腔瞬时干扰模型

当传感信号作用于 F-P 腔时,腔内的光相位将发生如下变化<sup>[12]</sup>:

$$\Delta\phi = \beta L \left( \frac{\Delta L}{L} \right) + L \left( \frac{\partial \beta}{\partial n} \right) \Delta n + L \left( \frac{\partial \beta}{\partial \alpha} \right) \Delta \alpha, \quad (5)$$

式中第一项表示由于应变效应由光纤长度改变引起

的相位变化;第二项表示由于光弹效应由折射率改变引起的相位变化;第三项表示由于泊松效应由光纤芯径改变引起的变化。设在 F-P 腔上瞬间增加一传感信号,腔内向相反两个方向传播的光每经过一次就会产生  $\Delta\phi$  的相位变化。对于反向传播的光,受到传感信号作用后第一次经反射端 1 部分透射的光与该时刻直接被反射端 1 部分反射的入射光之间的相位差,与稳态时的相位差相比发生了变化,因此反射光功率发生变化。而对于正向传播的光,受到传感信号作用后第一次经反射端 2 部分透射时,整个光束全部变化了  $\Delta\phi$ ,光束内部相对的相位差与稳态时相比并没有发生变化,所以透射光功率不会发生变化。直到反向传播的光经反射端 1 部分反射后到达反射端 2 时,透射光功率才第一次发生变化,因为此时被反射端 1 部分反射的光已经 2 次受传感信号的作用,相位变化了  $2\Delta\phi$ ,而同时到达反射端 2 经反射端 1 新透射的光只经过 1 次传感信号作用产生  $\Delta\phi$  的相位变化。与稳态的透射光相比,透射光束内部新增了的相差,使透射光功率发生变化。

根据这一模型,反射光功率发生变化之后,腔内光束又传输距离  $L$ ,然后透射光功率才发生变化。因此透射光功率应比反射光功率变化延时  $\tau = n_{eff}L/c$ 。实验制作了腔长  $L = 9$  km 的 F-P 腔。监测透射和反射光功率在外界随机干扰下发生的变化,结果如图 2 所示,上方 ch1 为透射光功率,下方 ch2 为反射光功率,透射光功率与反射光功率的变化反相,且整体延时约  $44 \mu s$ 。当  $L = 9$  km 时,计算得延时  $\tau \approx 43.4 \mu s$ ,与在示波器上观察到的结果基本一致。实验结果证明了以上瞬时模型的正确性。通常用于传感的 F-P 腔,腔长远小于 1 m,因此延时小于 2 ps,一般可以忽略不计。

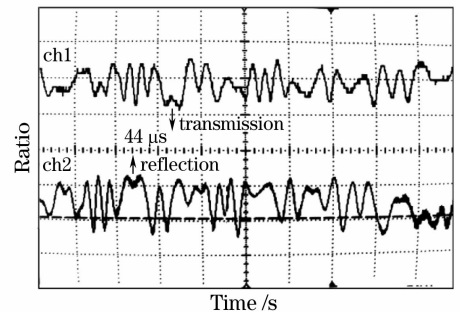


图 2 腔长  $L = 9$  km 的 F-P 腔反透射功率

Fig. 2 Transmission and reflection of F-P cavity with cavity length  $L = 9$  km

根据以上瞬时模型,计算第一次经传感信号作用后,腔内传输的光变化为

$$A(1) = \sqrt{\alpha}(tA_{in} + rB) \exp(j\beta L + j\Delta\phi), \quad (6)$$

$$B(1) = \sqrt{\alpha} \exp(j\beta L + \Delta\phi) A(1), \quad (7)$$

则第  $n$  次经传感信号作用后腔内传输的光可通过循环迭代求得:

$$A(n) = \sqrt{\alpha}[tA_{in} + rB(n-1)] \exp(j\beta L + j\Delta\phi), \quad (8)$$

$$B(n) = \sqrt{\alpha} \exp(j\beta L + j\Delta\phi) A(n), \quad (9)$$

最终达到新的稳态时的透射及反射光为

$$A_{out}(\Delta\phi) = \lim_{n \rightarrow \infty} tA(n) = \frac{\sqrt{\alpha} t^2 \exp(j\beta L + j\Delta\phi)}{1 - \alpha r^2 \exp(j2\beta L + j2\Delta\phi)} A_{in}, \quad (10)$$

$$B_{out}(\Delta\phi) = rA_{in} + \lim_{n \rightarrow \infty} tB(n) = rA_{in} + \frac{\alpha r t^2 \exp(j2\beta L + j2\Delta\phi)}{1 - \alpha r^2 \exp(j2\beta L + j2\Delta\phi)} A_{in}. \quad (11)$$

分别计算 F-P 腔不受传感信号作用, 以及受到传感信号作用产生  $\Delta\phi = \pi/3$  时, 反透射率第 1 次变化、第 2 次变化和最终到达新的稳态下的分布, 如图 3 所示。其中, F-P 腔长  $L = 5$  cm, 两端以透射深度为 3 dB 的光栅做反射端。可见, 由于传感信号的作用, F-P 腔的反透射谱不断变化, 直至达到新的

稳态。

理论上, F-P 腔光相位受扰动后经过腔内无穷次反射才能再次达到新的稳态。实际上, 当反射次数足够多, 反透射率与最终稳态误差较小时, 就可以认为已经达到新稳态。计算反透射率从第 1 次变化到第 10 次变化, 与最终稳态分布下的最大相对误差, 计算结果如表 1 所示。以两端采用透射深度 3 dB 的光栅制作 F-P 腔为例, 当经过 10 次反射后, 相对误差已经降低到 0.04%~0.05%。目前两端采用镀膜或光栅技术制作的 F-P 腔, 两端反射率很容易达到更高<sup>[6, 11]</sup>, 经 10 次反射后的相对误差会更小。即使腔长  $L$  为 1 m, 这一过程也仅需约  $\tau = 10n_{eff}L/c \approx 30$  ns, 当腔长较短时, 重新达到稳态所需的时间更短。对于一般的干扰源, 振动频率不超过几十千赫兹, 根据 Nyquist 采样定理, 实际中采样频率取最高振动频率十倍左右。即使如此, 采样周期仍远远大于 F-P 腔受扰动后再次达到新稳态所需的时间, 因此, 相对采样周期而言, 可以近似认为 F-P 腔瞬间从一个稳态达到另一个稳态, 外界传感信号的相位变化作用在这一瞬间保持不变。

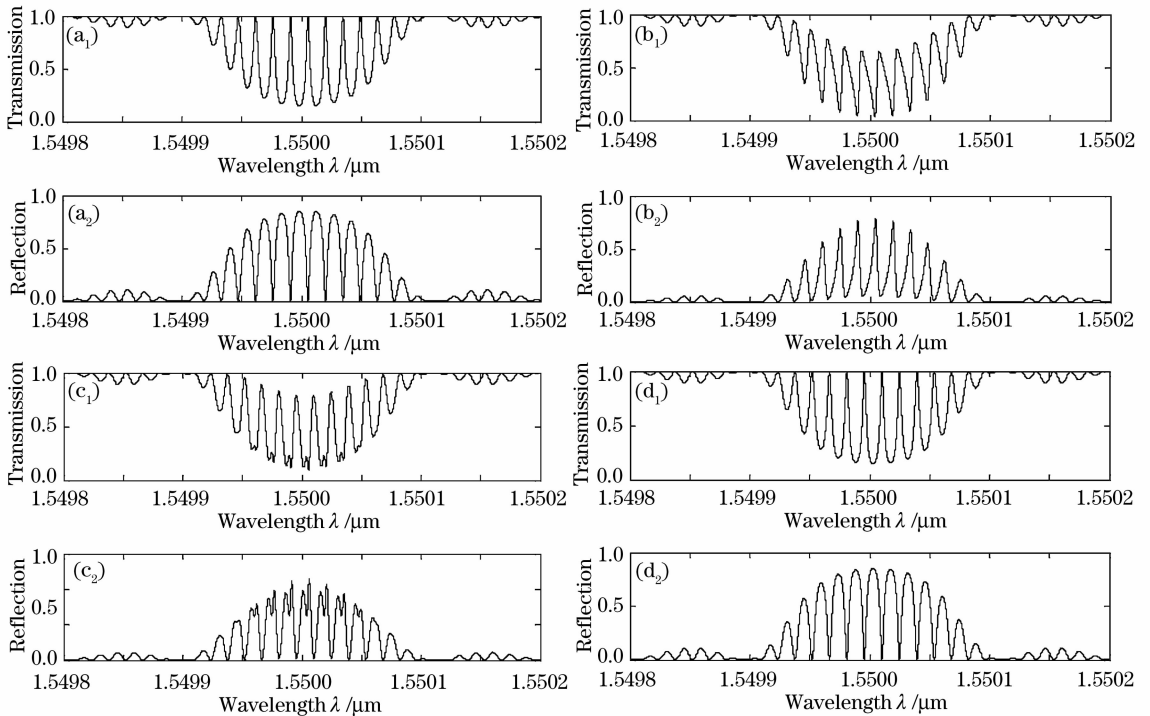


图 3 F-P 腔的反透射谱。(a)  $\Delta\phi=0$ , 稳态, (b)  $\Delta\phi=\pi/3$ , 第一次变化, (c)  $\Delta\phi=\pi/3$ , 第二次变化, (d)  $\Delta\phi=\pi/3$ , 最终稳态

Fig. 3 Transmission and reflection spectrum of F-P cavity. (a)  $\Delta\phi=0$ , stationary state, (b)  $\Delta\phi=\pi/3$ , the 1<sup>st</sup> change, (c)  $\Delta\phi=\pi/3$ , 2<sup>nd</sup> change, (d)  $\Delta\phi=\pi/3$ , final stationary state

表 1 反透射光功率的最大相对误差

Table 1 Maximum relative error of reflection and transmission power

Time	Reflection error	Transmission error
1	0.7415	0.3466
2	0.3614	0.162
3	0.1355	0.0805
4	0.0636	0.0391
5	0.0303	0.0185
6	0.0129	0.0086
7	0.0058	0.0039
8	0.0027	0.0018
9	0.0012	0.0008
10	0.0005	0.0004

### 3 F-P 腔检测振动信号的理论分析

可以设随时间变化的振动信号使 FBG F-P 腔内的光相位变化

$$\Delta\phi(t) = \Delta\phi(kt_0), \quad kt_0 \leq t < (k+1)t_0, \\ k = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

只要满足  $t_0 \gg \tau$ , 其中  $t_0 = 1/f_0$ ,  $f_0$  为满足 Nyquist 采样定理的采样频率;  $\tau$  为 FBG F-P 腔再次达到稳态所需的时间。相应地, 随时间变化的透射和反射光为

$$A_{out}(t) = \frac{\sqrt{at^2} \exp[j\beta L + j\Delta\phi(t)]}{1 - ar^2[j2\beta L + j2\Delta\phi(t)]} A_{in}, \quad (13)$$

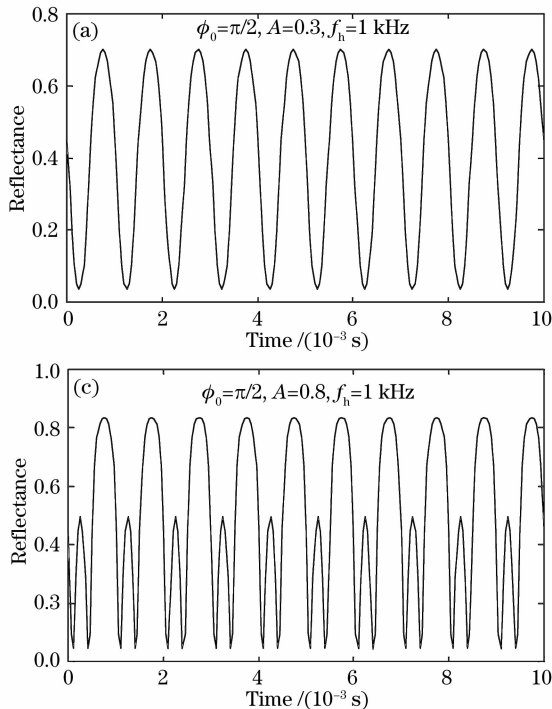


图 5 反射波形计算结果

Fig. 5 Calculation results of reflection waveform

$$B_{out}(t) = rA_{in} + \frac{art^2 \exp[j2\beta L + j2\Delta\phi(t)]}{1 - ar^2 \exp[j2\beta L + j2\Delta\phi(t)]} A_{in}. \quad (14)$$

设入射激光功率在线宽范围内高斯分布, 半峰全宽(FWHM)为  $10^{-6}$  nm(相当于线宽 100 kHz 左右), 激光信噪比(OSNR)为 70 dBm。计算  $\Delta\phi$  从 0 变化到  $2\pi$  时, F-P 腔反透射率的变化, 结果如图 4 所示, 反射率与透射率随  $\Delta\phi$  的变化恰好反相, 因此以下仅针对反射率进行讨论。反射率随  $\Delta\phi$  的变化以  $\pi$  为周期, 并且仅在  $\pi/2$  的范围内具有单值性。正确解调要求从解调量空间到测量量空间为映射关系, 因此对于非单值的对应关系, 或者增添新的测量量改变非单值的对应关系, 或者严格控制解调量使

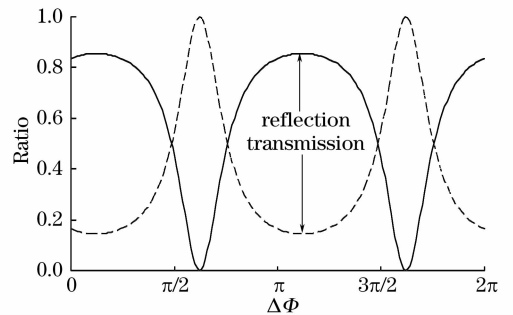
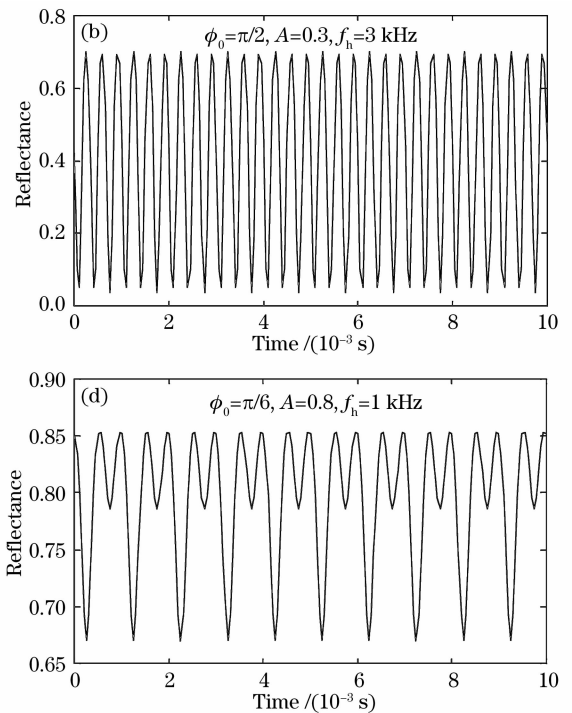


图 4 反射率与透射率与相位变化的关系曲线

Fig. 4 Reflection and transmission as a function of phase change  $\Delta\phi$



测量量保持在单值区间。增添新的测量量可以扩大可解调的单值范围<sup>[13]</sup>,但以增加系统的复杂性、增大系统成本以及大大增加高速处理数据量为代价。因此,在仅监测单波长功率的条件下,保证光相位变化范围在以内是正确解调信号的必要条件。同时,有效地调整直流工作点,可以尽量增大实际可用的相位变化范围。

设外界振动信号为单频振动信号,相应地,引起的相位变化可表示为  $\Delta\phi(t) = A\sin(2\pi f_h t) + \phi_0$ ,  $\phi_0$  为光相位直流工作点,这里设  $\phi_0 = \pi/2$ 。当振动较弱  $A=0.3$  时,在解调单值范围内光相位变化范围为 0.6。计算振动频率  $f_h$  分别为 1 kHz 及 3 kHz,反射及透射率随时间变化的结果,如图 5(a)、图 5(b) 所示。此时可直接观察到相应的信号基频为 1 kHz 及 3 kHz。但是随着振动增强,信号将出现畸变。以 1 kHz 振动信号为例,当  $A=0.8$  时,光相位变化范围增大到 1.6,超出解调单值范围,接收信号出现畸变,如图 5(c) 所示。在不同的工作点下,畸变信号的波形会有所不同,例如,当  $\phi_0$  调整为  $\pi/6$  时,畸变信号的波形如图 5(d) 所示。因此,实际应用中为了保证正确解调,应尽量减小直接作用在 F-P 腔上的信号强度。

## 4 实验结果

实验装置如图 6 所示。F-P 腔固定在塑料薄板上,振动源平行放置在板上且与 F-P 腔之间的距离可调,振动通过塑料薄板传递给 F-P 腔。在 F-P 腔上施加可调应力,用于调节工作点。实验采用的 F-P 腔长 3 cm,两端透射率 4 dB。可调激光器线宽不超过 300 kHz,OSNR 约 70 dB,经环形器输入到 F-P 腔,反射回的光经光电转换、隔直、放大、高速采样后送入计算机,高速采样频率为 25 kHz。采用 Labview 软件对采集信号进行处理。经 2 阶 Chebyshev 滤波器滤波(低通截频 12.5 kHz)后的时域波形及傅里叶变换后的频谱显示在界面上。

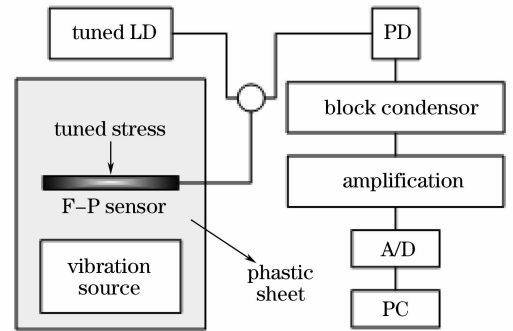


图 6 F-P 腔振动传感系统

Fig. 6 F-P cavity vibration sensing system

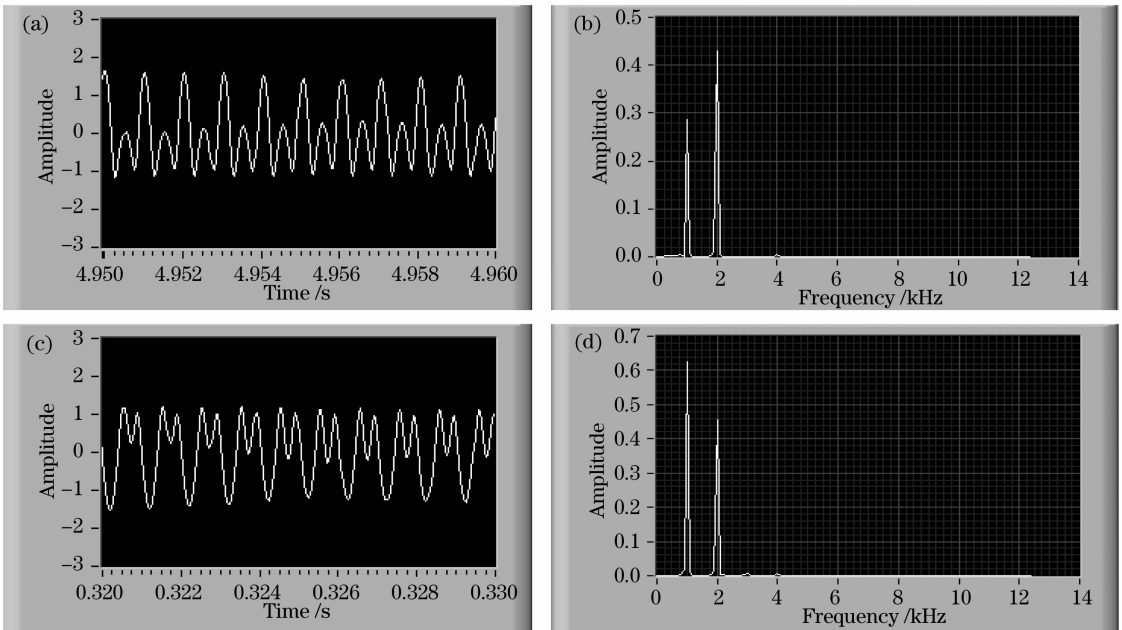


图 7 距离  $d=5$  mm, 信号频率  $f_h=1$  kHz 时的波形及频谱图。(a) 应力调节前的波形图, (b) 应力调节前的频谱图, (c) 应力调节后的波形图, (d) 应力调节后的频谱图

Fig. 7 Waveform and spectrum with distance  $d=5$  mm and signal frequency  $f_h=1$  kHz. (a) Waveform before stress adjustment, (b) spectrum before stress adjustment, (c) waveform after stress adjustment, (d) spectrum after stress adjustment

将振动频率调为 1 kHz, 当振动源与 F-P 腔的距离  $d=5$  mm 时, 在界面上观察到的结果如图 7 所示。此时直接作用在 F-P 腔上的振动较强, 引起的相位变化范围超过了解调单值范围, 波形畸变。微调作用在 F-P 腔上的应力, 调节 F-P 腔的工作点, 波形会有变化, 畸变后的典型波形与理论计算结果基本一致。此时测得频谱同时包含 1 kHz 与 2 kHz 成分, 结果有误。

保持振动频率不变, 逐渐增大振动源与 F-P 腔的距离, 随着距离的增大, 2 kHz 频率成分的幅度相

对 1 kHz 幅度逐渐降低。当振动源与 F-P 腔的距离增大至 8 cm 时, 2 kHz 频率成分几乎消失, 在界面上观察结果如图 8(a)、图 8(b) 所示。由于 F-P 腔距振动源较远, 直接作用在 F-P 腔的振动较弱, 波形恢复正常, 经 FFT 变换后得出正确的振动频率。继续增大距离, 频率成分不再发生变化, 仅有频谱幅度继续降低。在 8cm 处, 将振动频率调至 3kHz, 波形及频谱如图 8(c)、图 8(d) 所示。可见, 通过增大 F-P 腔与振动源的距离对 F-P 腔减敏后, 可以正确解调振动信号频率。

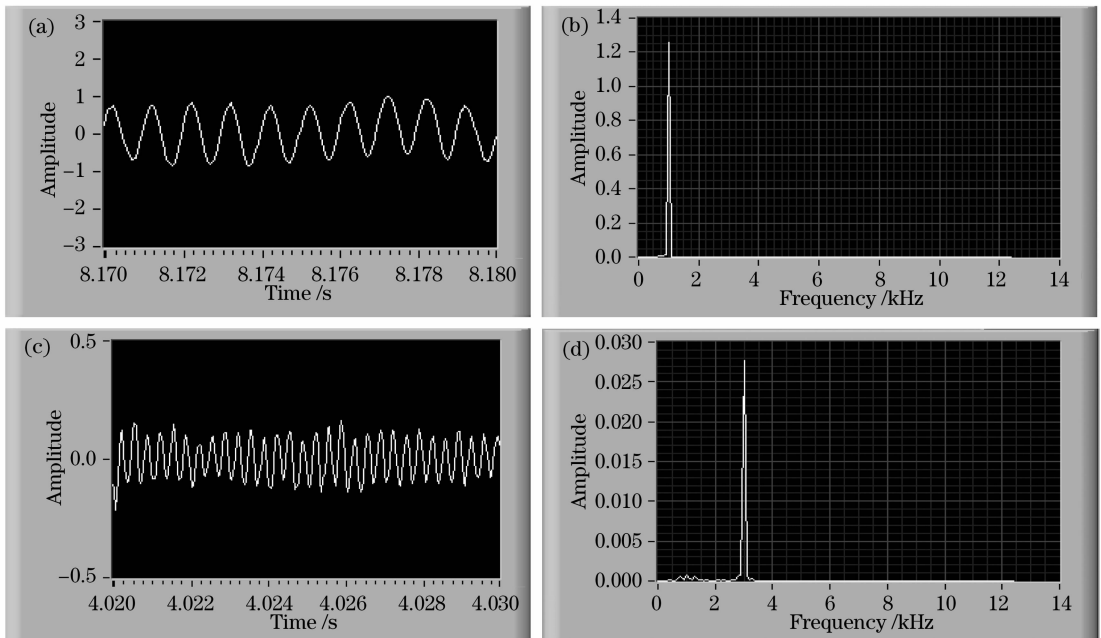


图 8 距离  $d=8$  cm 时的波形及频谱图。(a) 信号频率  $f_h=1$  kHz, 波形图, (b) 信号频率  $f_h=1$  kHz, 频谱图, (c) 信号频率  $f_h=3$  kHz, 波形图, (d) 信号频率  $f_h=3$  kHz, 频谱图

Fig. 8 Waveform and spectrum with distance  $d=8$  cm. (a) Waveform with signal frequency  $f_h=1$  kHz, (b) spectrum with signal frequency  $f_h=1$  kHz, (c) waveform when signal frequency  $f_h=3$  kHz, (d) spectrum when signal frequency  $f_h=3$  kHz

采用增大振动源与 F-P 腔距离的方法用于实际的未知振动信号频率检测时, 首先需要进行仔细的调试, 确定合适的距离范围。距离应增大至频谱分布相对较稳定。不再随距离增大而有明显变化, 以保证频率测量的准确性; 同时, 距离也不能过远, 在可以准确测量频率的前提下尽量提高直接作用在 F-P 腔上的振动信号强度, 充分利用解调单值区间, 以保证 F-P 腔良好的灵敏度。

## 5 结 论

本文采用减敏的 F-P 腔单波长功率监测, 对时域信号进行快速傅里叶变换(FFT), 用于检测快速振动信号频率。理论分析与实验结果证明 F-P 腔的多次反射对一般频率不超过几十千赫兹的振动信

号的测量没有影响; 当振动较强时, 由于解调单值性的限制, 信号会出现畸变; 在振动较弱时, 可以准确解调振动信号。对 F-P 腔进行减敏是保证解调准确最简单而有效的措施之一。本文通过增大振动源与 F-P 腔的距离, 实现了对单频振动信号的准确解调。实际使用中的具体的减敏工艺及措施有待进一步的研究。

## 参 考 文 献

- 1 Song Yanjun, Wang Jin'e. Fiber optic Fabry-Pérot sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1998, **35**(10): 1~6
- 2 宋彦军, 王金娥. 光纤法布里-珀罗传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 1998, **35**(10): 1~6
- 3 Toshihiko Yoshino, Kiyoshi Kurosawa, Katsuji Itoh *et al.*. Fiber-optic Fabry-Pérot interferometer and its sensor applications [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1624~1633

- 3 Kim Dae Woong, Shen Fabin, Chen Xiaopei *et al.*. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a reflection-mode long-period grating and an intrinsic Fabry-Pérot interferometer sensor[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 3000~3002
- 4 Lü Tao, Liu Desen, He Kaihua. Output characteristics of high precision optical fiber liquid-level sensor based on extrinsic and sensitive Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1614~1618  
吕涛, 刘德森, 何开华. 非本征敏感法布里珀罗腔高精度光纤液位传感器输出特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1614~1618
- 5 Ni Xiaoqi, Wang Ming, Chen Xuxing *et al.*. Wavelength multiplexing of optical fiber microelectromechanical system Fabry-Pérot pressure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 776~780  
倪小琦, 王鸣, 陈绪兴等. 光纤微机电系统法布里珀罗压力传感器的波分复用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 776~780
- 6 Tang Qingtao, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. High-resolution signal demodulation method for fiber-optic Fabry-Pérot multiplexing system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1353~1357  
唐庆涛, 饶云江, 朱涛等. 光纤法-珀传感系统高分辨率复用信号解调方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1353~1357
- 7 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Cengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 631~635  
饶云江, 周昌学, 冉曾令等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频分复用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 631~635
- 8 Wang Zhuang, Shen Fabin, Song Lijun *et al.*. Multiplexed fiber Fabry-Pérot interferometer sensors based on ultrashort Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(8): 622~624
- 9 Shen Zhenqiang, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan. Frequency-division multiplexing technique of fiber grating Fabry-Pérot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1173~1177  
沈震强, 赵建林, 张晓娟. 光纤光栅法布里珀罗传感器频分复用技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1173~1177
- 10 Wu Chaoxia, Wu Fei, Cai Lulu *et al.*. Strain measurement using a fiber Bragg grating Fabry-Pérot sensor[J]. *Optics Technique*, 2005, **31**(4): 559~562  
吴朝霞, 吴飞, 蔡璐璐等. Bragg 光纤光栅法布里-珀罗传感器的应变测量[J]. *光学技术*, 2005, **31**(4): 559~562
- 11 Guan Baiou, Yu Youlong, Ge Chunfen *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 34~38  
关柏鸥, 余有龙, 葛春风等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 34~38
- 12 Bi Weihong. *Research on Unsymmetrical Intrinsic Fabry-Pérot Fiber-Optic Strain Sensors* [D]. Ha' erbin: Harbin Industrial University, 2003. 25~26  
毕卫红. 非对称本征法珀光纤应变传感技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003. 25~26
- 13 Wang Tingting, Wang Ming, Li Ming *et al.*. Dual-wavelength demodulation and wavelength optimization for optical fiber Fabry-Pérot sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1297~1301  
王婷婷, 王鸣, 李明等. 光纤法布里-珀罗腔传感器双波长解调法及波长优化设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1297~1301