

文章编号: 0253-2239(2007)07-1173-5

# 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术\*

沈震强 赵建林 张晓娟

(西北工业大学理学院 光信息科学与技术研究所 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710072)

**摘要:** 理论分析了光纤光栅法布里-珀罗(F-P)传感器频分复用技术的原理,并给出了信号处理对腔长选取的要求。数值模拟结果表明,不同腔长的传感器具有不同的谐振条纹频率,为保证频域中的信号不发生重叠,要求不同光纤光栅法布里-珀罗传感器间的腔长之差必须大于光纤光栅的长度。进一步的实验及模拟分析结果发现,温度等测量量的变化仅仅使光纤光栅法布里-珀罗传感器的反射光谱整体平移,相应的频域信号只产生相移而形状不发生变化,因而不能采用普通光纤法布里-珀罗(FFP)传感器的腔长傅里叶变换解调法解调频分复用光纤光栅法布里-珀罗传感器的信号。根据这一特点,提出了利用自相关分析实现频分复用传感器系统信号解调的方案。

**关键词:** 光纤光学;法布里-珀罗传感器;频分复用;光纤光栅

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Frequency-Division Multiplexing Technique of Fiber Grating Fabry-Pérot Sensors

Shen Zhenqiang Zhao Jianlin Zhang Xiaojuan

(*Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*)

**Abstract:** The principles of frequency-division multiplexing technique of fiber grating Fabry-Pérot (F-P) sensors were theoretically analysed and the restrictions on the length of F-P cavity for signal processing were given. The numerical simulation results shown that sensors with different cavity lengths are represented by different spectral fringe frequencies. To ensure that signals in the frequency domain will not overlap, the difference in the cavity length of any two fiber grating F-P sensors must exceed the length of fiber Bragg grating. The further experiment and simulation analysis also show that the change of measurands (i. e. temperature) will only cause the whole spectra shift without shape change, and the corresponding signal in the frequency domain produces only phase shift, so that the demodulation method based on Fourier transform for common fiber Fabry-Perot (FFP) sensor would be inapplicable here. According to this specialties of the frequency-division multiplexing signal, an autocorrelation analysis method has been suggested for the signal demodulation of this sensor system.

**Key words:** fiber optics; Fabry-Pérot sensor; frequency-division multiplexing; fiber grating

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器和光纤法布里-珀罗(FFP)传感器是目前应用最为广泛的两种光纤传感器<sup>[1,2]</sup>。光纤布拉格光栅传感器的主要优点是<sup>[3]</sup>:1)对外界参量的绝对测量;2)易于波分复用技术;3)制作简单,可批量生产。与光纤布拉格光栅传感器相比,光纤法布里-珀罗传感器可对微小变化

进行高灵敏度测量<sup>[4]</sup>,但制作工艺复杂、复用难度大。将光纤布拉格光栅与法布里-珀罗腔相结合构成的光纤光栅法布里-珀罗传感器,解决了传统光纤法布里-珀罗传感器的制作难题,并可以达到相同的测量精度<sup>[5,6]</sup>。实际应用中,选择合适的传感器系统必须考虑每个传感元件的成本,而提高系统的复用能力是降低成本的重要途径。受测量范围和光源

\* 西北工业大学研究生创业种子基金(Z200058)资助课题。

作者简介: 沈震强(1981-),男,江苏吴江人,硕士研究生,主要从事光纤传感器等方面的研究。

E-mail: bigblue@mail.nwpu.edu.cn

导师简介: 赵建林(1958-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2006-10-24; 收到修改稿日期: 2007-01-04

带宽的限制,一般的光纤布拉格光栅传感器系统通过波分复用技术只能集成 20 个左右的光纤布拉格光栅<sup>[7]</sup>。同时,普通的光纤法布里-珀罗传感器系统通过频分复用技术可集成的法布里-珀罗腔的数目也只有 20 个左右<sup>[8]</sup>。而结合光纤布拉格光栅的波分复用与法布里-珀罗腔的频分复用两种技术的光纤光栅法布里-珀罗传感器系统,其复用数目至少能提高一个数量级。因此关于光纤光栅法布里-珀罗传感器复用技术的研究逐渐引起了人们的重视<sup>[9]</sup>。本文从理论和数值模拟两方面分析频分复用技术的原理及其对腔长选取的限制,并给出适用于频分复用的光纤光栅法布里-珀罗传感器的信号解调方法。

## 2 理论分析

在同一根光纤上相隔一定的距离  $h$  写入两个中心反射波长相同的光纤布拉格光栅,就构成了光纤光栅法布里-珀罗腔,如图 1 所示。

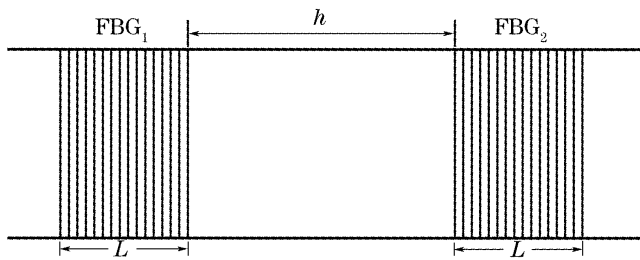


图 1 光纤光栅法布里-珀罗腔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber grating Fabry-Pérot cavity

为简化分析,假定组成光纤光栅法布里-珀罗腔的一对光纤布拉格光栅完全相同,则该法布里-珀罗腔的反射率可表示为<sup>[10]</sup>

$$R_{\text{F-P}} = \frac{F \sin^2 \phi}{1 + F \sin^2 \phi}, \quad (1)$$

式中  $F = \frac{4R_g}{(1 - R_g)^2}$ ,  $\phi = \left( \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} h + \varphi_r \right)$ ,  $R_g = |r|^2$ , 为光纤布拉格光栅的强度反射率,  $r$  为光纤布拉格光栅的复振幅反射系数,  $\lambda$  为光波在真空中的波长,  $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率,  $\varphi_r$  为  $r$  的相位角。(1) 式是光纤光栅法布里-珀罗腔反射率的严格表达式,本文对光纤光栅法布里-珀罗腔反射光谱的数值模拟均以(1)式为基础。当光栅反射率较弱 ( $R_g \ll 1$ ) 时,(1)式可简化为

$$R_{\text{F-P}} = 2R_g (1 - \cos \phi), \quad (2)$$

从(2)式可以看出,光纤光栅法布里-珀罗腔的反射光谱包含两部分:由光纤布拉格光栅的反射谱确定的包络以及由法布里-珀罗腔形成的谐振条纹。假

定光纤光栅法布里-珀罗腔对光纤布拉格光栅的中心反射波长  $\lambda_B$  满足谐振条件,即

$$\delta(\lambda_B) = \frac{2\pi}{\lambda_B} n_{\text{eff}} h + \varphi_r(\lambda_B) = m\pi, \quad (3)$$

$m$  为整数,则光纤光栅法布里-珀罗腔的相邻谐振峰的间隔  $\Delta\lambda$  满足关系

$$2\pi n_{\text{eff}} h \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda_B^2} \right| + |\varphi_r(\lambda_B) - \varphi_r(\lambda_B + \Delta\lambda)| = \pi, \quad (4)$$

在反射谱的零点带宽(指中心反射波长两侧反射率第一次为零的两波长之间距)内,反射系数的相位角  $\varphi_r$  是连续变化的<sup>[11]</sup>,从带宽的短波长反射率零点处的  $1.5\pi$  逐渐减小到长波长反射率零点处的  $-0.5\pi$ 。由于反射系数相位因子的作用,光纤光栅法布里-珀罗腔谐振条纹的间距要比等腔长的普通法布里-珀罗腔的条纹间距小。当谐振条纹的数目较多时,可忽略(4)式中左边第二项的作用,此时  $\Delta\lambda$  可近似表示为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_B^2}{2n_{\text{eff}} h}, \quad (5)$$

在弱光栅近似 ( $\delta n_{\text{eff}} \rightarrow 0$ ) 下,光纤布拉格光栅的零点带宽  $\Delta\lambda_0$  可表示为<sup>[12]</sup>

$$\Delta\lambda_0 = \frac{\lambda_B^2}{n_{\text{eff}} L}, \quad (6)$$

式中  $L$  为光纤布拉格光栅的长度,由此可得谐振条纹数目

$$M = 2h/L, \quad (7)$$

可见,为使(7)式成立,需要选择较大的  $h$  和较小的  $L$ 。由(5)式可知腔长为  $h$  的光纤光栅法布里-珀罗传感器的谐振条纹频率为

$$\nu = \frac{1}{\Delta\lambda} = \frac{2n_{\text{eff}} h}{\lambda_B^2}, \quad (8)$$

(8)式表明,频域中不同位置的信号代表着不同腔长的法布里-珀罗传感器,因此在光纤光栅法布里-珀罗传感器中保持光纤布拉格光栅的参量不变化,仅改变法布里-珀罗腔长即可以实现频分复用。由于光纤光栅法布里-珀罗腔只在光纤布拉格光栅的反射带宽内形成谐振条纹,因此频域中信号的宽度由下式给出

$$\delta\nu = \frac{2Ln_{\text{eff}}}{\lambda_B^2}. \quad (9)$$

## 3 结果与讨论

由(2)式可知,光纤布拉格光栅的反射光谱特性决定了光纤光栅法布里-珀罗腔的谐振特性,即该法布里-珀罗腔只能在相应光纤布拉格光栅的反射带宽

内谐振,在反射带宽外没有谐振条纹。图 2 是实验观察到的光纤光栅法布里-珀罗腔的反射光谱,实验所用的光纤光栅法布里-珀罗腔的参量为  $h=9\text{ mm}$ ,  $L=5.5\text{ mm}$ ,  $R_g=6.9\%$ 。

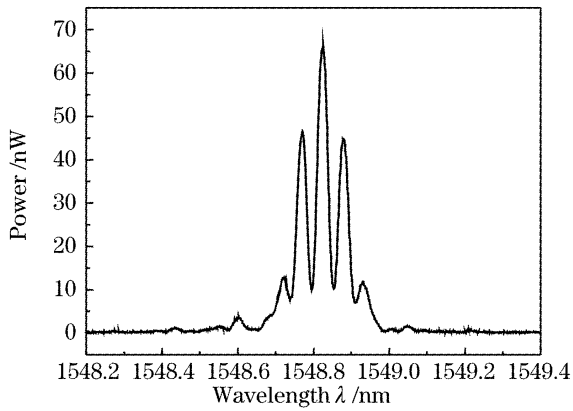


图 2 光纤光栅法布里-珀罗腔的反射光谱

Fig. 2 Reflection spectra of fiber grating Fabry-Pérot cavity

对图 2 中的反射光谱作傅里叶变换,结果如图 3 所示。将光纤布拉格光栅参量相同,但腔长  $h$  不等的光纤光栅法布里-珀罗传感器写入到不同光纤中,并通过  $2\times N$  耦合器与光源相连接,则系统总的输出信号是所有传感器反射光谱的线性叠加,为了在频域中将信号区分出来,由(8)式和(9)式可知,光纤光栅法布里-珀罗传感器系统中不同法布里-珀罗传感器的腔长之差必须大于  $L$ ,最短的法布里-珀罗腔长度至少为  $L$ 。根据抽样定理,光纤光栅法布里-珀罗腔的长度受到光谱的波长分辨力极限  $\delta\lambda$  的限制,即

$$h_{\max} \leq \frac{\lambda_B^2}{4n_{\text{eff}}\delta\lambda}, \quad (10)$$

(10)式给出了光纤光栅法布里-珀罗腔长的极限。由于光纤布拉格光栅引入,在光纤光栅法布里-珀罗传

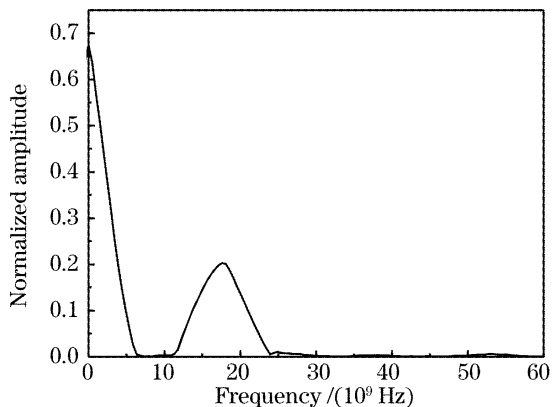


图 3 图 2 反射光谱的傅里叶变换

Fig. 3 Fourier transform of reflection spectra in Fig. 2

感器系统中实现波分复用变得简单,只需在制作光纤光栅法布里-珀罗时改变光纤布拉格光栅的中心反射波长并保证波长不互相重叠。将光纤布拉格光栅的波分复用与法布里-珀罗的频分复用两种技术结合,光纤光栅法布里-珀罗传感器系统复用的数目可以在单一复用技术的基础上提高 1~2 个数量级。

为了说明频分复用技术的工作原理,利用计算机进行了模拟实验。假定组成传感器系统的四个光纤光栅法布里-珀罗传感器均处于相同的环境条件下,腔长分别为 4.0 mm、6.5 mm、9.0 mm、11.5 mm。其中所有光纤布拉格光栅的长度均为 1 mm,中心反射波长为 1550.3 nm,有效折射率为 1.4545,有效折射率平均调制度为  $10^{-4}$ ,中心波长处的反射率约为 4%。图 4 为模拟得到的 4 个传感器信号叠加后的反射光谱,图 5 为所得到反射光谱的傅里叶变换。可以看出,在频域中各个信号没有发生重叠的现象,因此,通过频分复用技术可以轻易地提取每个传感器的信号。

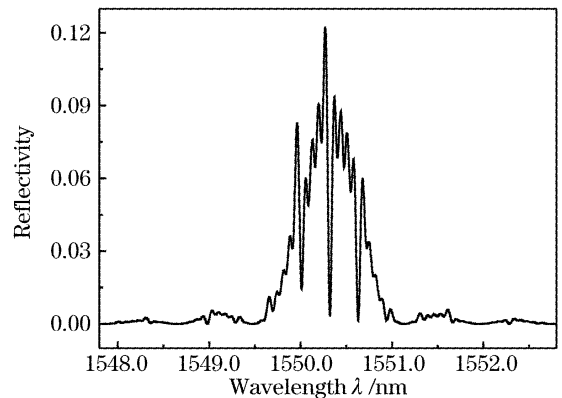


图 4 包含 4 个光纤光栅法布里-珀罗传感器信号的反射光谱

Fig. 4 Reflection spectra consisting of the signals from four fiber grating Fabry-Pérot sensors

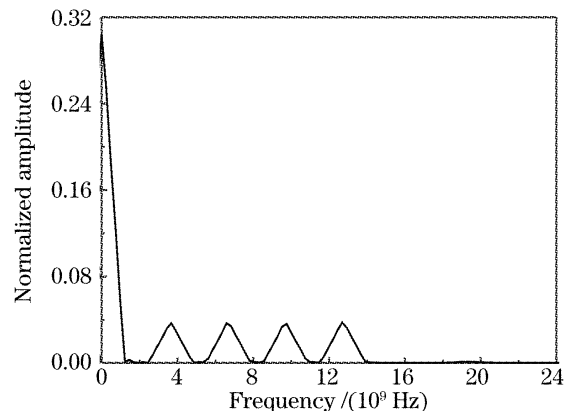


图 5 图 4 中反射光谱的傅里叶变换

Fig. 5 Fourier transform of the reflection spectra in Fig. 4

将光纤光栅法布里-珀罗传感器用于各种测量时,被测量的变化会改变光纤布拉格光栅的周期和有效折射率,光纤光栅法布里-珀罗传感器的腔长也会随之改变。假定只考虑温度的影响,则温度变化引起光纤布拉格光栅中心反射波长的相对漂移可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}, \quad (11)$$

式中  $\Lambda$  为光纤布拉格光栅的周期。在中心反射波长处,光纤光栅法布里-珀罗腔的初始相位可表示为

$$\phi(\lambda_B) = \left[ \frac{2\pi}{\lambda_B} n_{eff} h + \varphi_r(\lambda_B) \right], \quad (12)$$

而反射系数的相位角  $\varphi_r$  始终为  $0.5\pi$ <sup>[11]</sup>, 因此光纤光栅法布里-珀罗腔输出光信号相位的相对变化由下式给出

$$\left. \frac{\Delta\phi}{\phi} \right|_{\lambda=\lambda_B} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta h}{h} - \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}. \quad (13)$$

当温度变化引起光纤发生应变时,由于材料相同,光纤光栅法布里-珀罗腔的光栅周期和腔长等比例变化,即

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta h}{h}, \quad (14)$$

将(11)式和(14)式代入(13)式,得

$$\Delta\phi(\lambda_B) = 0. \quad (15)$$

(15)式表明,在中心反射波长处的相位变化始终为零,即温度变化仅使干涉条纹随中心反射波长发生平移,但反射光谱的形状没有变化(实验结果如图 6 所示)。因此对反射光谱作傅里叶变换时,相应的频域信号只产生相移而位置不发生变化(如图 7 所示),与普通光纤法布里-珀罗传感器(腔长的改变将引起反射光谱谐振条纹频率的变化)相比较有明显的不同,故适用于普通光纤法布里-珀罗传感器的腔

长傅里叶变换解调法不再有效,需要寻找其它的解调方法。以上只讨论了温度的影响,但所得结论对其它被测量同样适用。

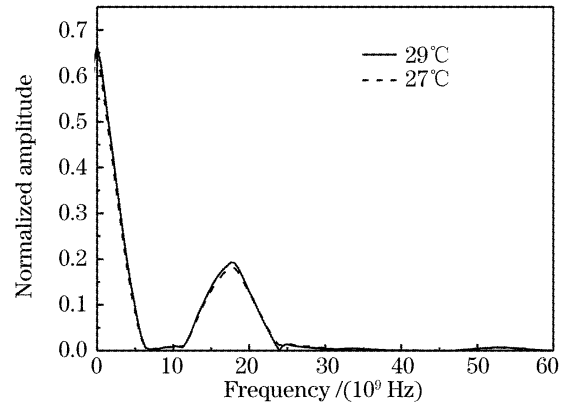


图 7 图 6 反射光谱的傅里叶变换

Fig. 7 Fourier transform of reflection spectra in Fig. 6

目前单个光纤光栅法布里-珀罗传感器的信号解调技术主要有自相关分析<sup>[13,14]</sup>和参量合成<sup>[15]</sup>两种。参量合成虽然可以解调出更多的信息,但运算繁复,只适合单个光纤光栅法布里-珀罗传感器的信号解调。自相关分析主要包括以下几个步骤:首先,对传感器的反射光谱作傅里叶变换;其次,与匹配滤波函数相乘(匹配滤波函数通常是测量前传感器反射光谱的傅里叶变换);最后,对乘积作逆傅里叶变换,根据傅里叶变换的自相关定理可知,函数值最大处即对应的波长位移。自相关分析的信号处理是在频域中进行的。而在频域中,不同腔长的传感器的信号是分离的且位置固定,通过自相关分析就可以逐个解调出波长的移动。因此,自相关分析同样也适用于多个光纤光栅法布里-珀罗传感器的信号解调。由于对反射光谱作傅里叶变换是频分复用过程的一部分,因此对频分复用传感器的信号解调可以直接跳过这一步,使得信号解调更加简单、直接。与光纤布拉格光栅传感器相比,光纤光栅法布里-珀罗传感器具有更加精细的反射光谱,经过信号解调可以提供更高的测量精度。

### 4 结 论

分析了光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术的原理,初步分析表明,可以利用自相关分析方法解调出频分复用光纤光机法布里-珀罗传感器不同腔长传感器信号的波长位移。分布式传感是传感器发展的趋势,采用频分复用技术可以大大提高光纤光栅法布里-珀罗传感器的复用能力,有着巨大的

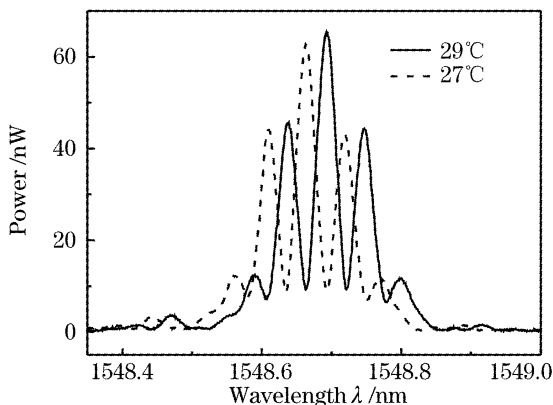


图 6 不同温度下光纤光栅法布里-珀罗腔的反射光谱  
Fig. 6 Reflection spectra of fiber grating Fabry-Pérot sensors under different temperature

应用潜力。

### 参 考 文 献

- 1 Byoungho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**(2): 57~79
- 2 Tarun Kumar Gangopadhyay. Prospects for fibre Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers in fibre-optic vibration sensing [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, **113**: 20~38
- 3 Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 4 Chung E. Lee, William N. Gibler, Robert A. Atkins *et al.*. In-line fiber Fabry-Perot interferometer with high-reflectance internal mirrors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(10): 1376~1379
- 5 Y. J. Rao, M. R. Cooper, D. A. Jackson *et al.*. Absolute strain measurement using an in fibre-Bragg-grating-based Fabry-Perot sensor[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(8): 708~709
- 6 T. Allsop, K. Sugden, I Bennion *et al.*. A high resolution fiber Bragg grating resonator strain sensing system [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2002, **21**(3): 205~217
- 7 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1462
- 8 T. Liu, G. F. Fernando. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Perot sensor system for strain and displacement measurements [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(3): 1275~1278
- 9 M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov, I. M. Borbon *et al.*. Multiplexed twin Bragg grating interferometric sensor[R]. 15th OFS 2002, 2002, **1**: 191~194
- 10 Guan Baiou, Yu Youlong, Ge Chunfeng *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 34~38 (in Chinese)  
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
- 11 Lü Changgui, Cui Yiping, Wang Zhuyuan *et al.*. A study on the longitudinal mode behavior of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1): 145~150 (in Chinese)  
吕昌贵,崔一平,王著元等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔纵模特性研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(1): 145~150
- 12 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 13 C. Caucheteur, K. Chah, F. Lhomme *et al.*. Autocorrelation demodulation technique for fiber Bragg grating sensor [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2320~2322
- 14 S. V. Miridonov, M. G. Shlyagin, D. Tentori. Twin-grating fiber optic sensor demodulation [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**(3): 253~262
- 15 C. Caucheteur, F. Lhomme, K. Chah *et al.*. Fiber Bragg grating sensor demodulation technique by synthesis of grating parameters from its reflection spectrum [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **240**(4~6): 329~336