

## Design of FBG Vibration Demodulation System Based on FMCW and Analysis of Multiplexing Characteristics

TENG Fengcheng\*, YANG Gang, DONG Bo, DONG Like

(College Of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

**Abstract:** A FBG vibration demodulation system based on the FMCW and the principle of  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  couplers have been designed. The theoretical analysis of the multiplexing characteristics system has also been carried out. The influence of  $k$ , the sensing grating position factor  $k$ , the max of modulation frequency  $\Delta f$  and the control parameters of VCO  $f_s$  on multiplexing characteristics was analysed through the simulation experiment. A corresponding system was built to validate the designed system at the same time.

**Key words:** signal processing; FMCW (frequency modulation of continuows wave); wavelength demodulation; FBG (fiber bragg grating); distributed systems

EEACC: B40 doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.12.017

## 基于 FMCW 技术的光纤光栅振动解调系统设计及复用特性分析

滕峰成\*, 杨刚, 董博, 董理科

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 基于连续波调频技术(FMCW)及  $2 \times 2$ 、 $3 \times 3$  耦合器的原理,设计了一种光纤光栅振动解调系统.对系统复用特性进行了理论分析,并通过仿真实验分析了传感光栅位置系数  $k$ 、调制频率的最大值  $\Delta f$ 、压控振荡器的控制参量  $f_s$  对系统复用特性的影响,同时构建了相应的系统,对所设计的系统进行了实验验证。

**关键词:** 信号处理;连续波调频技术;波长解调;光纤光栅;分布式系统

中图分类号:O4391 文献标识码:A 文章编号:1004-1699(2010)12-1752-05

波长解调技术是光纤光栅传感系统的核心技术<sup>[1]</sup>,目前已有的波长解调方法有干涉法、滤波法、色散法等。而适合光纤光栅振动传感信息检测的波长解调方法有单点匹配光纤光栅检测、分布式匹配光栅滤波解调、可调 F-P 腔解调技术和基于 HBF (超波束形成技术)环境滤波技术的解调系统等。

单点匹配光纤光栅检测技术要求,在测量范围内,每更换一只不同波长的传感探头就必须重新选定与之匹配的参考光栅。在对测量有不同要求或者测量条件有所制约的场合是非常不便的。可调 F-P 腔解调技术完全突破了传统的 F-P 腔解调方案的限制,可以达到 10kHz 左右甚至更高。基于 HBF 环境滤波技术的解调系统采用全光纤设计,其解调速度快,解调精度也高。该系统中 HBF 的线性滤波范围大,可解调的振源的振幅范围大<sup>[2-5]</sup>。

本文把连续波调频技术应用到光纤光栅振动解调系统中来。与利用脉冲信号的 TDM(时分复用模式)方式相比,FMCW 方式的光源信号为连续波,光

源利用效率明显要高的很多,因此可能可以复用更多的传感器。

### 1 解调系统设计

连续波调频技术(FMCW)是一种光源光强连续频率调制技术<sup>[6]</sup>,它将光源光强变化频率用线性锯齿波或三角波调制,利用传感通道与参考通道信号的时延,产生拍频信号。不同的传感通道的探头有不同的时延;对应于不同的拍频,从拍频信号就可以区别传感通道中探头的位置。连续波调频技术曾经广泛应用于雷达测距系统<sup>[7-8]</sup>,随着现代电子技术的发展,高性能的压控振荡器和混频器配合通带可调的滤波器使得这种技术可以应用于光纤传感复用与解复用,并且复用带入的噪声和串扰也很小,接近于理论极限。由于这种技术也是利用通道间的时间延迟来区分传感器的位置,因而也可以把它归于 TDM 复用方式<sup>[9]</sup>。

FMCW 拍频信号产生的基本原理如图 1 所示。

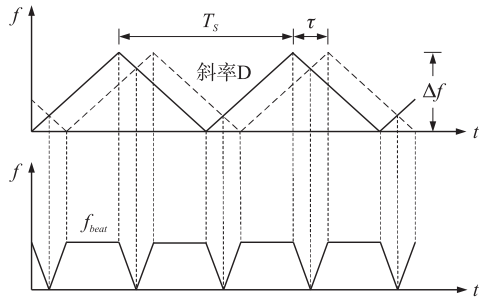


图 1 拍频信号产生的基本原理图  
图 1 中实线代表参考信号, 虚线代表传感信号,  $\Delta f$

为调制频率的最大值,  $T_s$  为调制的周期,  $\tau$  为传感信号与参考信号的时延,  $f_{beat} = (2\Delta f/T_s)\tau$ 。

基于 FMCW 技术的分布式光纤光栅振动传感系统的结构框图如图 2 所示。假设宽带光源发出的光在 A 点的光强为  $I_A$ , 在 B 点的输出光强为  $I_B$ , 其中光强度调制器由压控振荡器的输出信号控制。设压控振荡器的输出信号为三角波信号, 瞬时输出频率为  $f_i$ , 则在 t 时刻, 强度调制器在 B 点的输出光强为  $I_B$  表示为:

$$I_B = I_A [1 + m \cos(2\pi \int f_i dt)]$$

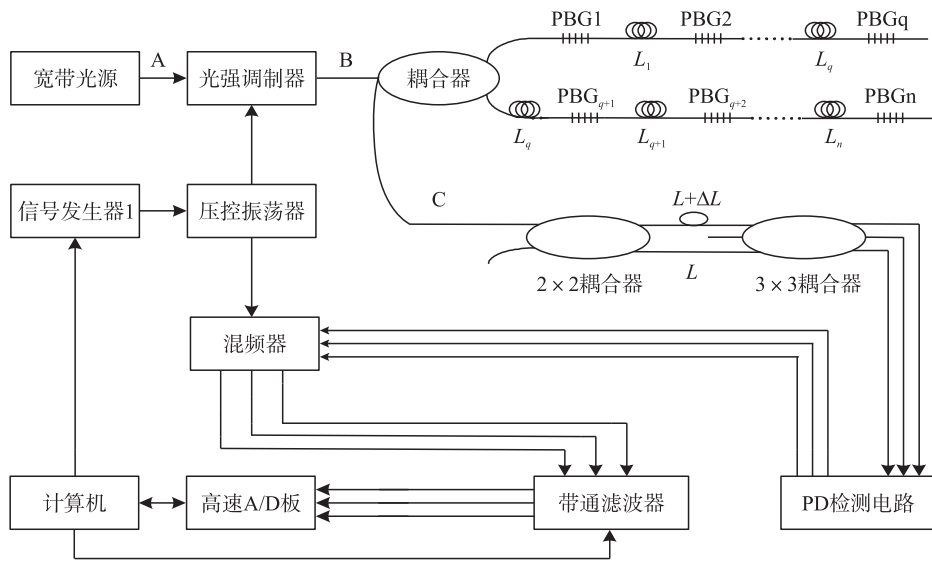


图 2 基于 FMCW 技术的分布式光纤光栅振动传感系统结构框图

式中:  $m$  为光强调制系数;  $2\pi \int f_i dt$  为光强调制的相位。

所以, 上式可写为:

$$I_B = I_A [1 + m \cos(\varphi(t))] \quad (1)$$

由光强度调制器发出的调制信号经耦合器输入到光纤光栅传感阵列, 传感光栅的反射光经耦合器进入 M-Z 干涉仪。此时, C 点的光信号为传感光栅的反射光信号的叠加。设  $I_c(t)$  为 C 点的光强, 若通道间最小光程差远远大于光源相干长度, 即不考虑干涉效应, 则  $I_c(t)$  的输出可表示为:

$$I_c = \sum_{i=1}^n I_{ci} \quad (2)$$

式中  $I_{ci}$  ——第  $i$  个光强。

$$I_{ci} = \beta R_i(\lambda) [1 + \cos(\varphi(t_i))] \quad (3)$$

式中  $\beta$  ——耦合器的损耗系数。

$R_i(\lambda)$  ——包含传感光栅光强的传感参量。

光信号经 M-Z 干涉仪后, 分三路进入光电转换电路, 转变为电信号。设  $V_{sb}$  为光电转换电路的输出, 则有:

$$V_{sb} = K_{sb} I_c \quad b = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式中  $K_{sb}$  ——M-Z 干涉仪和光电转换电路的响应系数。

混频器的输出  $V_{hb}$  可表示为

$$V_{hb} = V_{sb} V_r \quad b = 1, 2, 3 \quad (5)$$

式中  $V_r = V_0 \cos(\varphi(t_r))$  ——压控振荡器的参考信号。

由公式(2) - 公式(5)可得:

$$V_{hb} = V_0 K_{sb} \beta \{ \cos(\varphi(t_r)) \sum_{i=1}^n R_i(\lambda) + \frac{1}{2} m \sum_{i=1}^n R_i(\lambda) \cos[\varphi(t_i) + \varphi(t_r)] + \frac{1}{2} m \sum_{i=1}^n R_i(\lambda) \cos[\varphi(t_i) - \varphi(t_r)] \} \quad b = 1, 2, 3 \quad (6)$$

由公式(6)可知: 混频器的输出  $V_{hb}$  中包含  $\cos(\varphi(t_r))$ 、 $\cos[\varphi(t_i) + \varphi(t_r)]$  和  $\cos[\varphi(t_i) - \varphi(t_r)]$  三种频率信号。其中, 前两项信号频率与 FMCW 的调制频率相当, 为 MHz 级的高频, 第 3 项为一个差频信号, 其大小与压控振荡器的调制信号以及传感光栅的时延有关。由拍频信号产生的基本原理可知  $f_{beat} = (2\Delta f/T_s)\tau$ , 所以, 差频信号与调制信号相差很大。因此, 通过带通滤波器可以滤掉高频信号, 仅保留差频信号为:

$$V_b(t) = \frac{1}{2}GV_0mK_{sb}\beta \sum_{i=1}^n R_i(\lambda) \cos[\varphi(t_i) - \varphi(t_r)]$$

$$b = 1, 2, 3 \quad (7)$$

式中  $G$ ——混频器转换效率

由公式(7)可知:通过控制带通滤波器便可以将  $V_b(t)$  中的不同频率信号分别提取出来,实现传感光栅的定位。而由于每一个频率信号就是对应传感光栅信号的拍频幅度调制信号,所以通过数据处理可以得到传感信号幅值,并结合  $2 \times 2, 3 \times 3$  耦合器来证解调公式  $\frac{d(\Delta\varphi)}{d\lambda} = -\frac{2n\pi\Delta L}{\lambda^2}$ , 从而最终实现传感光栅的定位与振动信号的解调。<sup>[10-12]</sup>

## 2 系统复用特性分析

以上对所设计系统的测量原理在时域内进行了分析,下面将在频域内对系统的复用特性进行分析。

将  $V_b(t)$  进行傅立叶变换,可知当拍频信号  $f_{beat}$  为  $f_s$  的整数倍时,有信号输出,当:

$$\begin{cases} \omega = k\omega_s = \frac{2\Delta\omega}{T_s}\tau_i \\ \omega_0\tau_i - \frac{\omega T_s}{4} = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (8)$$

时,输出信号有最大幅值。式中:  $\omega_0$ ——FMCW 连续波信号的平均频率,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ——谱线的级数或位置系数,  $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ ,  $\omega = 2\pi f_{beat}$ 。

当  $k = 1$  时,由公式(8)可知:  $f_{beat} = 2\Delta f\tau_i f_s = f_s$ , 所以有:

$$\tau_{i\min} = \frac{1}{2\Delta f} \quad (9)$$

式中  $\tau_{i\min}$ ——系统最小时延值

由此对应于传感光栅之间的光纤最小长度为:

$$L_{\min} = \frac{c\tau_{i\min}}{2n} \quad (10)$$

式中  $c = 3 \times 10^8$  m/s——光速

$n = 1.46$ ——光纤折射率

公式(10)就是系统的空间分辨率。

(1) 传感光栅位置系数的影响 当传感光栅的位置系数不同时,即连接传感光栅的光纤是  $L_{\min}$  的不同整数倍时,传感光栅的反射信号与压控振荡器的参考信号的时延不同。不同的时延将导致系统输出信号的频谱也有所不同。下面以单传感光栅,  $\Delta f = 40$  MHz,  $f_s = 10$  kHz, 分别取  $k = 2, 10, 20, 40$  为例进行了分析、说明。

当系统选择上述参数时,由公式(9)、公式(10)可得系统的  $\tau_{i\min} = 12.5$  ns、 $L_{\min} = 1.25$  m。此时典型输出信号频谱如图 3 所示。

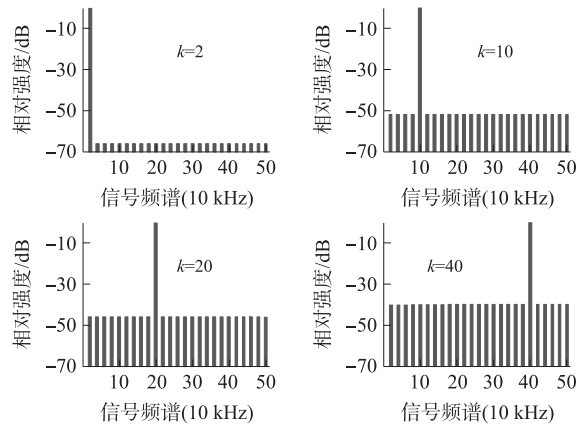


图 3 输出信号频谱图

由分析结果可知:传感光栅的位置越远 ( $k$  值越大),系统时延越大,同时旁瓣信号相对强度随  $k$  值的增加而增大,这就限定了传感光栅的复用数目。

(2)  $\Delta f$  对系统复用特性的影响 同理,以单传感光栅为例,设  $f_s = 10$  kHz,  $k = 10$ , 分别取  $\Delta f = 10, 40, 60, 100$  MHz,  $\Delta f$  的变化会导致  $\tau_{i\min}$  值的变化,从而影响系统输出频谱。典型输出信号频谱如图 4 所示。

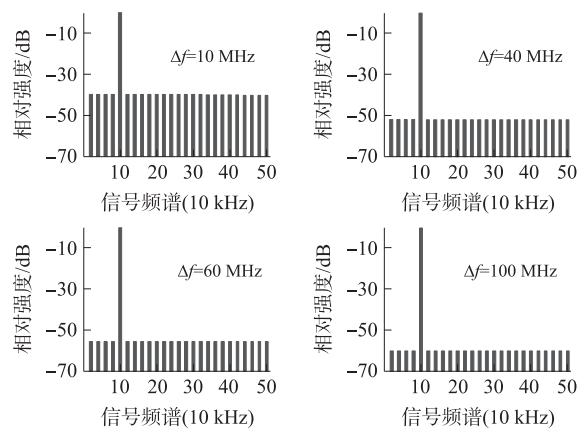


图 4 输出信号频谱图

由分析结果可知:旁瓣信号相对强度随  $\Delta f$  值的增加而减小。所以,实际应用时,应根据具体情况尽量选择较大的  $\Delta f$  值。

(3)  $f_s$  对系统复用特性的影响  $f_s$  作为压控振荡器的控制参量,其大小直接影响着光强调制器的输出信号。所以,应对由于  $f_s$  的变化而导致系统输出变化的情况予以考虑。设  $\Delta f = 400$  MHz,  $k = 10$ , 分别取  $f_s = 5, 10, 20, 40$  kHz。典型输出信号频谱如图 5 所示。

由分析结果可知:旁瓣信号相对强度随  $f_s$  值的增加而加大。如果以  $-48$  dB 为基准参数,则  $f_s$  值最大取 20 kHz。

(4)  $\Delta f, k$  与  $f_s$  之间的关联分析 以上分析了单个参数对系统输出频谱的影响,在此基础上对  $\Delta f, k$  与  $f_s$  之间的关联进行了分析,分析结果如图 6 和图 7

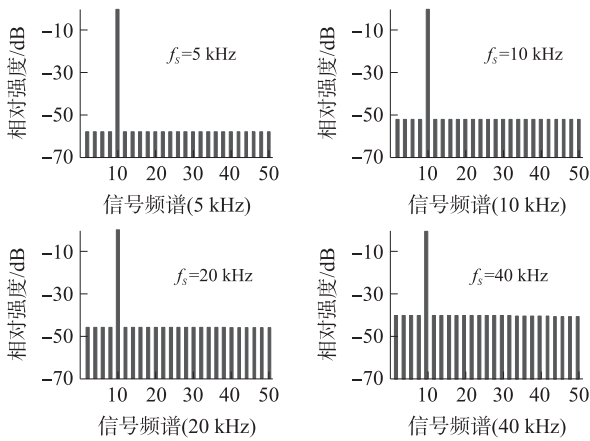


图 5 输出信号频谱图

所示。由图 6 和 7 图所知: 当满足条件  $\Delta f_A/k_A f_s = \Delta f_B/k_B f_s$  时, 虽然主通道谱线位置不一定相同, 但系统输出具有相同的旁瓣信号相对强度。在本例中:

$\Delta f_1/k_1 f_{s1} = 40/(10 \times 10) = 0.4$ 、 $\Delta f_2/k_2 f_{s2} = 80/(20 \times 10) = 0.4$ 、 $\Delta f_3/k_3 f_{s3} = 40/(5 \times 20) = 0.4$ 、 $\Delta f_4/k_4 f_{s4} = 60/(10 \times 15) = 0.4$ , 旁瓣信号相对强度均为  $-52$  dB, 而其主通道谱线位置分别为 10、10、20、10。

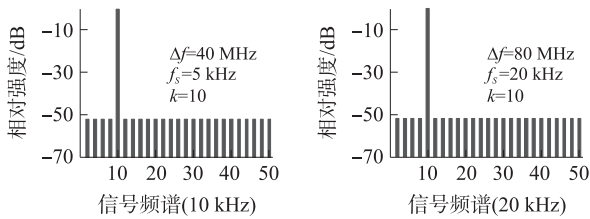


图 6 输出信号频谱图

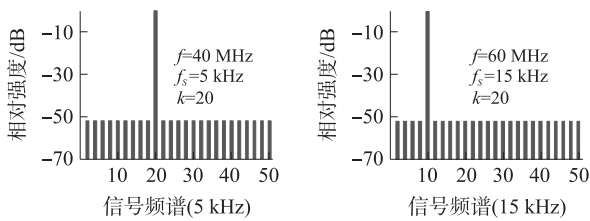


图 7 输出信号频谱图

(5) 系统传感光栅复用数量分析 不考虑光源、光强调制器和传感光栅的一些参数对系统输出的影响, 以  $\Delta f = 40$  MHz,  $f_s = 10$  kHz 为例对传感光栅在不同位置时系统最大复用数量进行分析。以旁瓣信号相对强度最大为  $-48$  dB 为基准,  $k = 2, 4, 6, \dots$  和  $k = 1, 2, 3, \dots$  时, 系统输出信号频谱如图 8 所示。

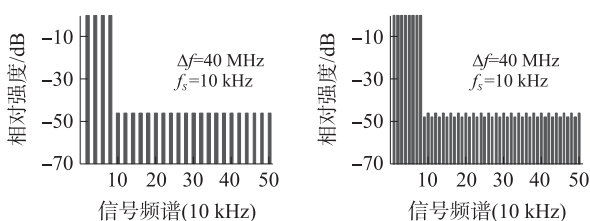


图 8 输出信号频谱图

显然, 这种条件下, 如果传感光栅置于  $k$  值的偶数位位置时系统最大复用数量为 4 个; 如果传感光栅位置从  $k = 1$  连续放置, 系统最大复用数量为 8 个。因此, 实际应用时应尽可能对传感光栅连续放置。

由单传感光栅的分析可知增加  $\Delta f$  和减小  $f_s$  均可降低旁瓣信号的相对强度, 可以提高系统的复用特性。下面以  $\Delta f = 80$  MHz,  $f_s = 5$  kHz,  $k = 1, 2, 3, \dots$  为例, 对由于  $\Delta f$  的增加和  $f_s$  的减小时而对系统最大复用数量所产生的影响进行分析。仍以旁瓣信号相对强度最大为  $-48$  dB 为基准, 系统输出信号频谱如图 9 所示。

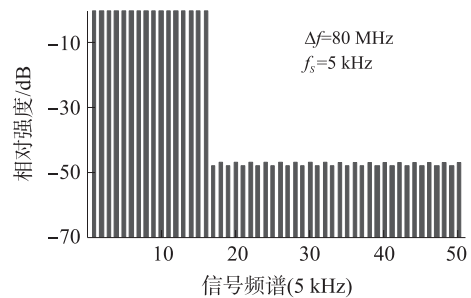


图 9 输出信号频谱图

随着  $\Delta f$  的增加和  $f_s$  的减小, 系统最大复用数量增加。由图 9 可知: 本例中为 16 个, 与上例相比系统最大复用数量增加 1 倍。

### 3 光纤光栅振动解调实验

基于 FMCW 技术的光纤光栅振动解调实验系统框图如图 3 所示, 光栅个数为 3。

实验中, 传感光纤光栅 FBG1 和 FBG2 串接且不施加外作用力, 光纤光栅 FBG3 粘结在 CSY<sub>10B</sub> 实验仪振动臂上。室温下静态时 3 个光栅的中心波长分别为 1 550.082 nm、1 551.039 nm 和 1 552.929 nm, 图中光纤长度  $L_1 = 5$  m,  $L_2 = 12$  m, 信号发生器频率为 5 kHz, 压控振荡器的频率范围为 55 M ~ 100 MHz, 采样板采样频率 1 MHz。首先调整 CSY<sub>10B</sub> 实验仪的频率钮和激励钮, 实验仪振动频率为 24 Hz, 当系统稳定一段时间后, 可测得 3 个传感光栅的拍频信号如图 10 所示。

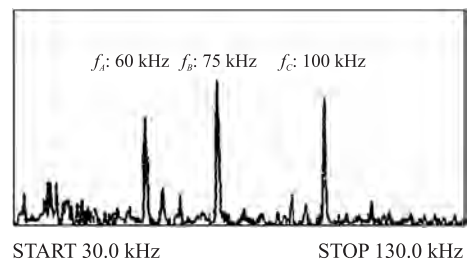


图 10 拍频信号图

图10中,拍频为60 kHz信号对应传感光栅FBG1,拍频为75 kHz信号对应传感光栅FBG2,拍频为100 kHz信号对应传感光栅FBG3。接着调整带通滤波器,使其只允许FBG3的拍频信号通过,启动采样板进行采样。采样数据处理后的实验结果如图11所示,CSY<sub>10B</sub>实验仪的振动频率为23.45 Hz,与CSY<sub>10B</sub>实验仪的频率旋钮给定值24 Hz基本一致。

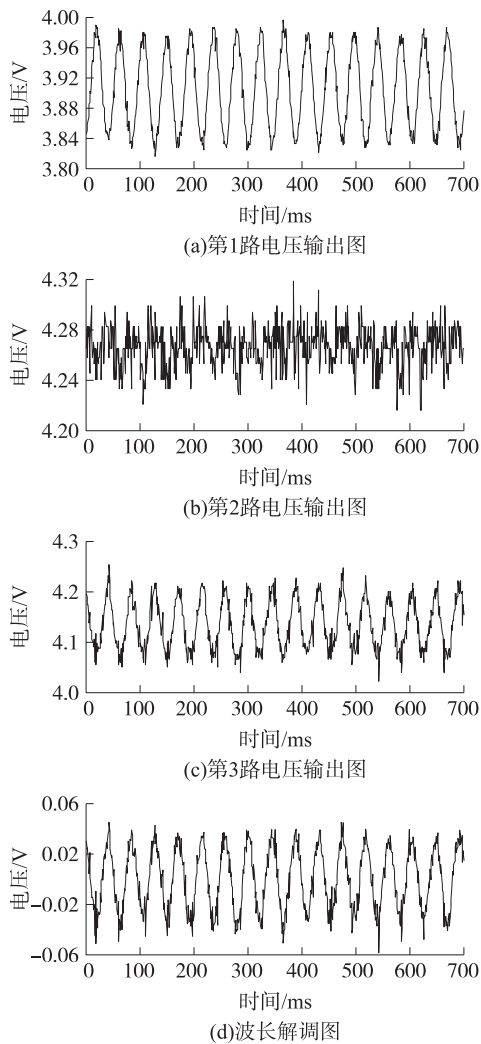


图11 实验结果图

## 4 结论

本文结合连续波调频技术和光纤光栅传感理

论,设计了分布式光纤光栅振动解调系统。分别分析了传感光栅位置系数 $K$ 、调制频率的最大值 $\Delta f$ 、压控振荡器的控制参量 $f_s$ 对系统复用特性的影响。在系统设计时应根据具体情况,应尽可能从 $k=1$ 开始对传感光栅连续放置;同时选择具有较大 $\Delta f$ 和较小 $f_s$ 的压控振荡器,以便系统获得最佳复用效果。根据实验得出CSY<sub>10B</sub>实验仪的实验振动频率与给定频率基本一致。

## 参考文献:

- [1] Peng Peng-Chun, Tseng Hong-Yih, Chi Sien. Long-Distance FBG Sensor System Using a Linear-Cavity Fiber Raman Laser Scheme[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 2(16): 575-577.
- [2] 曹晔,刘波,开桂云,等. 光纤光栅微振动高速精密检测系统的研究[J]. 光电子,激光,2006,17(1):102-106.
- [3] Chi Young Ryu, Chang Sun Hong. Development of Fiber Bragg Grating Sensor Using Wavelength-Swept Fiber Laser[J]. Smart Mater Struct, 2002, (11): 468-473.
- [4] Xiao Gaozhi, Zhao Ping, Sun Fengguo, et al. Zhiyi Zhang Arrayed-Waveguide-Grating-Based Interrogator for Wavelength-Modulated Multi-Fiber-Optic Sensor Applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 8(17): 1710-1712.
- [5] Kersey A D, Berkoff T A, Morie W W. Multiplexed Bragg Grating Fiber-Aser Strain-Sensor System with a Fiber F-P Wavelength Filter[J]. Opt Lett, 1993, 18(16): 1370-1372.
- [6] Peter K, Chen C, Jin W, et al. Multiplexing of Fiber Bragg Grating Sensors Using an FMCW Technique. IEEE Photonics Technology Letters, 11(11): 1470-1472.
- [7] 赵美凤,谢克明,闫高伟. 一种LFMCW雷达目标距离提取方法. 太原理工大学学报,2006,37(5):505-507.
- [8] 陈家军,王东进,陈卫东. LFMCW雷达目标运动补偿新方法. 现代雷达,2006,28(7):37-40.
- [9] 李志全,汤敏,许明妍,等. 分布式光纤光栅传感网络的复用解调技术[J]. 光电子技术与信息,2005,18(2):53-58.
- [10] 李向舜. 分布式光纤光栅传感器波长检测新技术简述[J]. 传感器世界,2003,11(5):1-5.
- [11] Alan D Kersey, Michael A Davis, Heather J Patrick. Fiber Grating Sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 8(15): 1442-1463.
- [12] Kersey A D, Berkoff T A, Morie W W. High-Resolution Fiber-Grating Based Strain Sensor with Interferometric Wavelength-Shift Detection[J]. Electron Lett, 1992, 28(3): 236-238.



滕峰成(1966-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤光栅解调技术的研究;光纤光栅传感系统网络化与工程性应用研究,tengfengcheng@163.com;



杨刚(1984-),男,燕山大学电力系统及其自动化专业,硕士研究生。