

相位生成载波调制解调法测量微振动的实现及干扰分析

唐伟杰 付雷 陈淑芬 邹正峰 孟彦彬

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 分析了相位生成载波(PGC)调制解调法测量微小振动的基本原理,搭建了迈克尔孙型干涉测量系统,研究了声波频段信号微振动的测量。在此基础上分析了压电陶瓷(PZT)调制时振动频率随机波动以及相位不匹配对解调造成的影响。理论和实验表明 PZT 调制的稳定性对最后解调的波形有很大的影响,调制频率的稳定可以消除解调引入的信号失真,相位的匹配能使解调信号信噪比达到最大。为减小 PZT 的影响,对实验系统进行了改进。

关键词 相干光学;振动测量;相位生成载波;频率波动;相位不匹配;锁相环

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0214001

Realization of Measuring Micro-Vibration Based on Phase Generated Carrier Modulation-Demodulation Method and Interference Analysis

Tang Weijie Fu Lei Chen Shufen Zou Zhengfeng Meng Yanbin

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The basic principle of measuring micro-vibration based on phase generated carrier (PGC) modulation-demodulation method is analyzed. A Michelson interferometer measurement system is set up and the micro-vibration measurement of acoustic frequency band signal is studied. Based on this, influences of random fluctuations of the vibration frequency and the phase mismatch in the modulation of the piezoelectric ceramic (PZT) on the demodulator are analyzed. Theoretical and experimental results show that the stability of the PZT modulation has a great impact on the final demodulated waveform. The stability of the modulation frequency can eliminate the signal distortion caused by demodulation, and phase matching makes the demodulated signal to noise ratio (SNR) maximum. In order to reduce the influence of PZT, the experimental system is improved.

Key words coherence optics; vibration measurement; phase generated carrier; frequency fluctuation; mismatch of phase; phase-locked loop

OCIS codes 030.1640; 280.3420; 230.0250

1 引言

激光相干检测方法具有灵敏度高、范围大、线性度好、可无源解调的优势,在诸多领域具有广泛的应用。国内外研究人员在利用激光对固定目标微小振动的测量^[1~4]、声信号的监听^[5,6]、光纤水听器^[7,8]等方面做了许多工作,研究了多种信号处理方法,如有源零差正交解调法、无源零差正交解调法、相位载波

(PGC)零差法^[9]和外差法^[10]等。其中 PGC 解调法是一种干涉型光传感零差解调技术^[11],有利于消除相位漂移引起的干涉输出不稳性,具有灵敏度高、动态范围大和线性度好的优点。本文主要讨论零差 PGC 探测方式的实现,在此基础上研究压电陶瓷(PZT)调制时振动频率随机波动以及相位不匹配对解调造成的影响。首先利用 Labview 平台来实现

收稿日期: 2012-08-17; 收到修改稿日期: 2012-10-07

作者简介: 唐伟杰(1987—),男,硕士研究生,主要从事光传感方面的研究。E-mail: tangwj_2012@163.com

导师简介: 付雷(1959—),男,博士,副教授,主要从事光传感和光纤激光器技术方面的研究。

E-mail: fulei_03@sina.com

模拟分析,然后搭建了迈克耳孙型实验平台,对微弱的声波振动信号的干涉测量进行了实验研究和分析。针对干扰产生的原因和形式,提出了改进方法。

2 PGC 原理及分析

图 1 为基本实验系统,由激光器出射的激光经分光镜分成两路光,一路经反射镜的 PZT 相位调制到达接收器,另一路经由目标振动源反射和分光镜也到达接收器,两路光产生干涉。干涉的表达式可以写为^[12]

$$I = A + B\cos[C\cos(\omega_c t) + D\cos(\omega_s t) + \varphi_0], \quad (1)$$

式中 A 是干涉的直流项, B 是干涉后交流项的系数,它们和两路干涉光的光强有关; $C = \frac{4\pi c}{\lambda}$, c 为 PZT

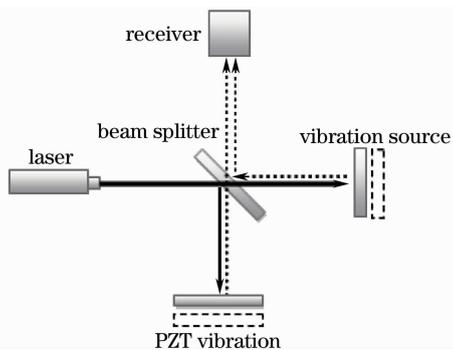


图 1 PGC 调制原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the PGC modulation

的振幅; $D = \frac{4\pi d}{\lambda}$, d 为振动信号的振幅; ω_c, ω_s 分别为 PZT 和信号的振动频率; φ_0 为噪声干扰; λ 为激光波长。

将(1)式展开为贝塞尔函数形式:

$$I = A + B \left\{ \left[J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos(2k\omega_c t) \right] \cos[D\cos(\omega_s t) + \varphi_0] - 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_c t \right] \sin[D\cos(\omega_s t) + \varphi_0] \right\}, \quad (2)$$

式中 $J(\cdot)$ 表示贝塞尔函数。从(2)式中可以看出干涉信号的频谱是由载波(PZT 振动)的各阶频谱两边携带信号的各阶频谱构成的。

PGC 解调的技术相对比较成熟,通常的解调流程如图 2 所示。

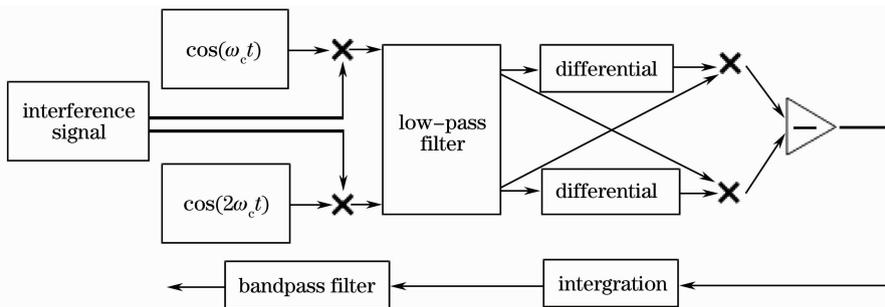


图 2 PGC 解调的流程

Fig. 2 Demodulation process of PGC

由探测器得到的干涉信号同载波的一倍和二倍频余弦信号相乘后,两路信号通过低通滤波器,在滤除高频项后,两路信号通过微分运算,分别同另一路交叉相乘,而后两路信号相减,进行差分放大。再将差分后的信号通过积分运算和带通滤波器就能得到解调后的信号。

设 PGC 解调中所加载波的幅度都为 1,那么依照流程在积分操作后信号可以表示为

$$I_{out} = B^2 J_1(C) J_2(C) [D\cos(\omega_s t) + \varphi_0]. \quad (3)$$

由(3)式得到的信号再通过合适的带通滤波器

(300~700 Hz)滤掉噪声 φ_0 就可以得到原始的振动源信号。

3 实验系统的搭建

为了对声波引起的微振动进行测量,搭建如图 1 所示的实验系统。在搭建的实验系统中,用一张四周被固定的白纸来作为漫反射目标振动源,在白纸后面放置一个扬声器。同时在参考光路中将一反光镜固定在片状 PZT 上用来形成对参考光的调制。为了不使干涉信号的频谱交叠,振动源的振幅

要小于激光波长的 0.6 倍。

实验中设置扬声器的频率为 500 Hz, PZT 的振动频率为 5200 Hz, 激光波长为 635 nm。实验得到的干涉信号频谱如图 3 所示。

从图 3 中可以看到, 在载波 5200 Hz 以及二倍频 10.4 kHz 处出现了声源信号的各阶谐波。

解调后的信号及频谱如图 4 所示。

至此信号已经被解调出来, 但是存在一定的干扰。在 300~700 Hz 的声波频段进行了测量, 均能得到良好的效果。可见, PGC 法能很好地实现微振动的测量。

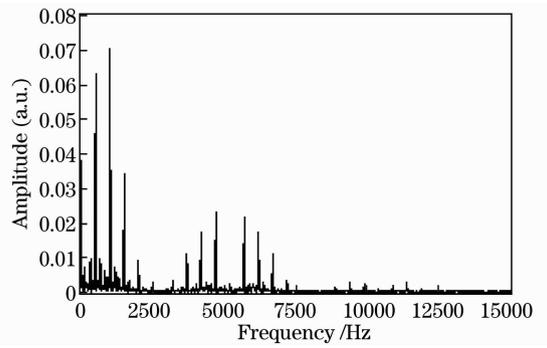


图 3 实验上获得的干涉信号频谱

Fig. 3 Frequency spectrum of interference signal in experiment

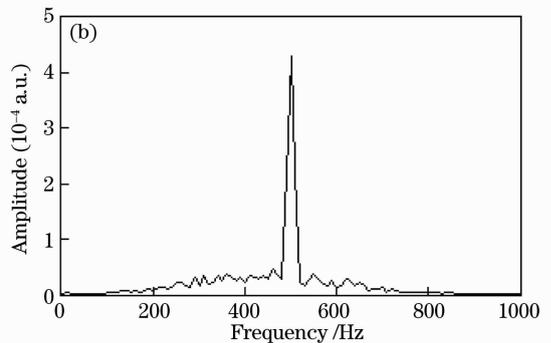
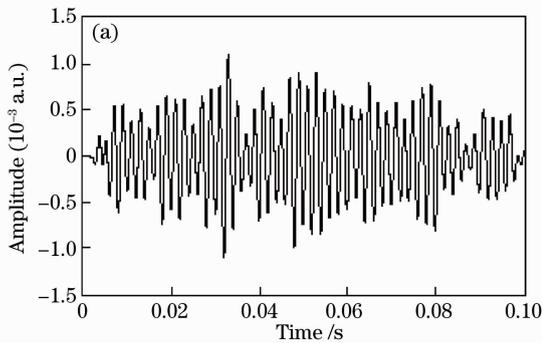


图 4 实验获得的干涉信号(a)解调波形和(b)频谱图

Fig. 4 (a) Demodulation waveform and (b) frequency spectrum of interference signal in experiment

4 实验结果及干扰分析

从(3)式和实验结果来看影响解调波形的主要因素有 3 方面的因素: 1) 噪声的影响; 2) PZT 振动频率不稳定的影响; 3) PZT 振动的相位不匹配的影响。

4.1 噪声的影响

解调波形的幅度有变化是因为噪声引起白纸振动的幅度接近于扬声器所引起的振动, 以及扬声器振动的不稳定性造成了振幅波动。

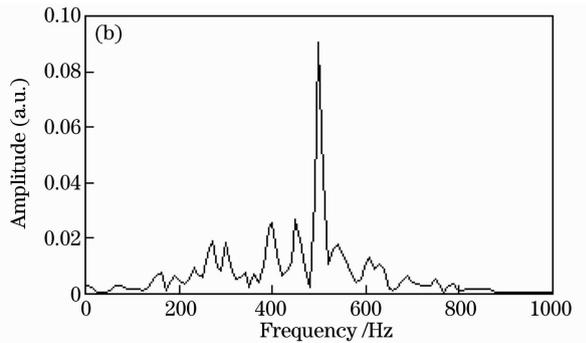
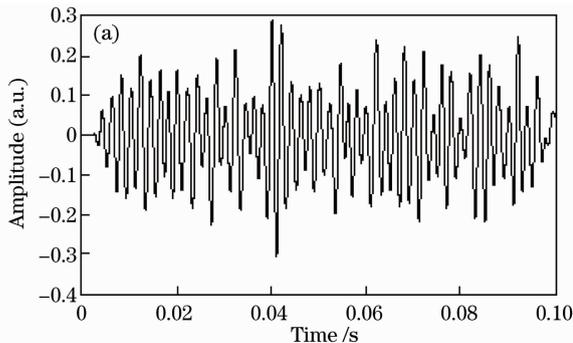


图 5 噪声影响下仿真得到的(a)解调波形和(b)频谱图

Fig. 5 (a) Demodulation waveform and (b) frequency spectrum under the influence of noise in simulation

4.2 PZT 频率不稳定的影响

PZT 的振动是一种机械振动, 尤其是片状 PZT

模拟仿真噪声的影响, 设置声源振动为 500 Hz, 振动幅度为 50 nm, PZT 振动为 5200 Hz, 同时加上均方根为 40 nm 的高斯噪声时, 仿真结果如图 5 所示, 噪声可以造成解调波形幅度明显的扰动, 同时从频谱上看, 当噪声接近于信号振动幅度时, 有用信号的频谱成分仍然很明显, 可见 PGC 法对噪声有很好的抑制作用。

在驱动电压较高的情况下才能得到比较好的调制效果, 但是较高驱动电压带来的较大振幅会造成振动频

率的漂移,它的振动频率 ω_c 会有一个微小的波动,使 PZT 的振动频率与解调用的载波频率不同,之间产生一个差值。设 PZT 的振动为 $C\cos(\omega_c + \Delta)t$,其中 Δ 为频率的偏移量,另设 $\varphi(t) = D\cos(\omega_s t) + \phi_0$ 为信号项, $\dot{\varphi}(t)$ 为其导数。通过解调系统差分放大后的信号可以表示为

$$I_{\Delta} = B^2 J_1(C) J_2(C) \left[\dot{\varphi}(t) \frac{\cos(3\Delta t) + \cos(\Delta t)}{2} \right] + B^2 J_1(C) J_2(C) \left\{ \frac{3\Delta}{4} \sin 2\varphi(t) [\sin(3\Delta t) + \sin(\Delta t)] \right\}. \quad (4)$$

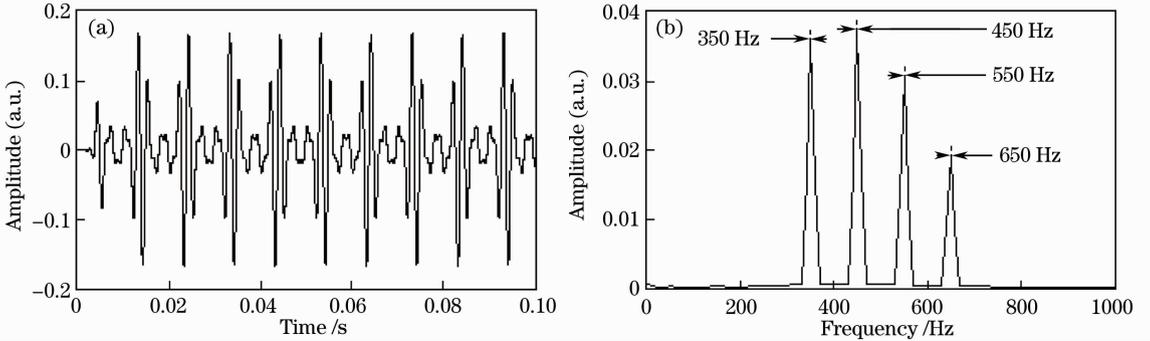


图 6 频移影响下仿真得到的(a)解调波形和(b)频谱图

Fig. 6 (a) Demodulation waveform and (b) frequency spectrum under the influence of frequency shift in simulation

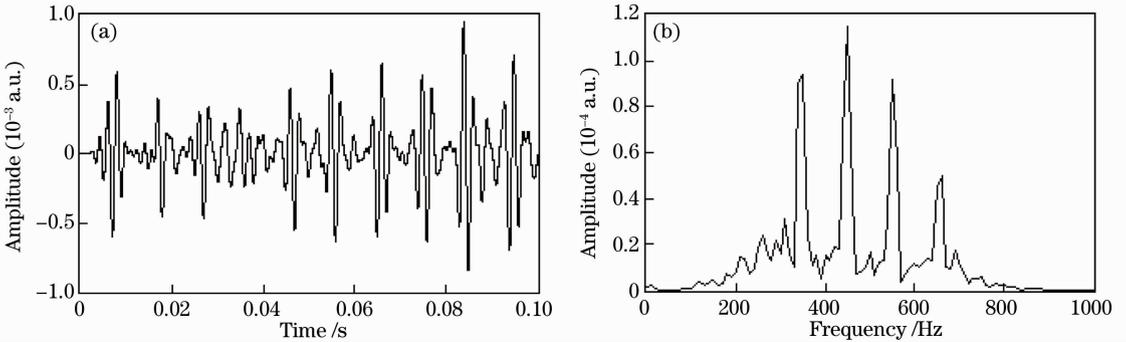


图 7 频移影响下实验得到的(a)解调波形和(b)频谱图

Fig. 7 (a) Demodulation waveform and (b) frequency spectrum under frequency shift in experiment

实验结果和仿真结果基本相符,由于实验中存在随机噪声,所以对解调的波形幅度略有影响。

综上所述,PZT 振动造成的频差所形成的频谱分离对解调结果有很大影响,会造成输出信号的严重失真。为提高输出信号质量,减小失真,应当尽量保证 PZT 振动频率稳定。

4.3 PZT 振动相位的影响

PZT 的振动相位对解调的波形也有影响。从图 2 中可知,PGC 解调要求 PZT 的振动和解调中所加的载波应当是同相位的余弦,但是在实际操作中很难达到同相位,相位的不匹配也会造成解调信号幅度的变化。为了反映这种影响,设 PZT 有一个

从(4)式中可以看出由于频差 Δ 的影响,在被测信号的频率及其二倍频的两侧将会分布有频差 Δ 的一倍和三倍频。通过带通滤波器后将只有低频项的分布。

对 PZT 频率变化的影响进行仿真分析。设置声源的振动频率为 500 Hz,PZT 振动频率为 5150 Hz,解调用载波频率为 5200 Hz,产生 50 Hz 的差值。仿真结果如图 6 所示,在频谱图中依次标注了各个峰值所处的频率值。以同样的条件进行了实验,结果如图 7 所示。

相位移动为 ϕ ,那么解调后的表达式为^[13]

$$I_p = B^2 J_1(C) J_2(C) \cos \phi \cos 2\phi. \quad (5)$$

由(5)式可以看出解调的波形受到了调制,将调制项关于相位移动 ϕ 的关系表示如图 8。图中给出了 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的情况,它和 $-180^\circ \sim 0^\circ$ 是对称分布的,可以看到当 PZT 的相位和载波相差为 0° 和 180° 的时候幅度有最大值,而在 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时则有零值。当噪声的幅度一定时,过小幅度的信号将会湮没在其中,所以相位的匹配与否直接影响到输出的信噪比(SNR)。如果要求调制幅度最小值减小到一半,那么实际中应控制 PZT 振动和载波之间的相位差在 $\pm 30^\circ$ 范围内。

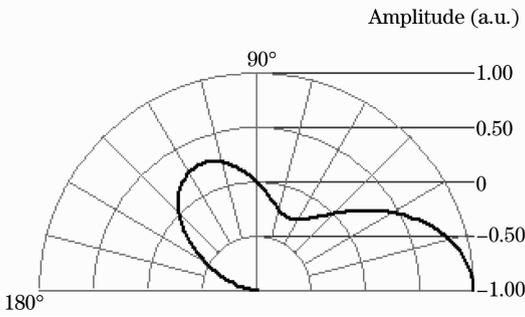


图 8 相位匹配仿真图

Fig. 8 Phase matching simulation diagram

5 实验系统的改进

从第 4 节中的分析可知,载波的振动情况对于最后的解调有很大的影响,为此,对实验光路进行了改进,如图 9 所示。

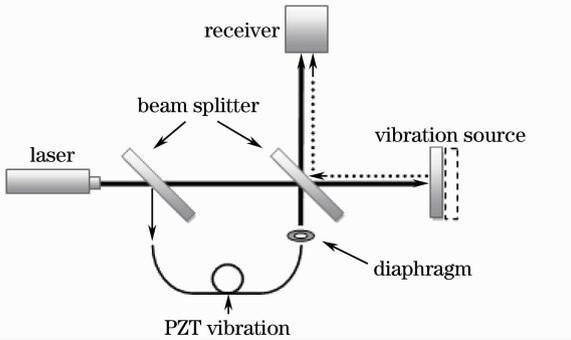


图 9 改进后的光路

Fig. 9 Improved optical path

在参考光一路使用光纤代替原来的光路,利用圆柱形的 PZT 来调制绕在上面的光纤。优点是不需要很高的 PZT 驱动电压,它的振动幅度很小,依靠光纤的长度来放大调制的效果,同时是一种径向的振动,比较稳定,可以减小频率的漂移。

为了保证相位的匹配,设计和采用了锁相环结构,原理如图 10 所示。图中 PD 为鉴相器,LF 为低

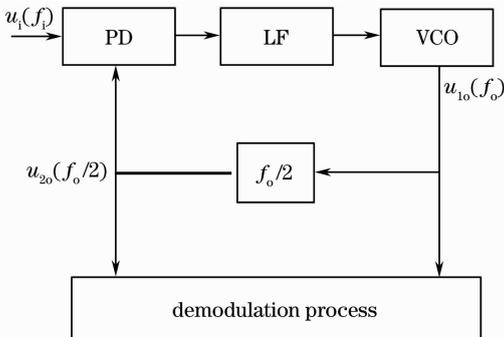


图 10 锁相环

Fig. 10 Phase-locked loop

通滤波器,VCO 为压控振荡器, $f_0/2$ 表示分频器。

锁相环结构能使输出信号和输入信号同频,且保持一定的相位差。利用 Labview 编写软件锁相环,利用这种结构将载波信号作为输入信号 u_i ,通过加有分频器的锁相环可以得到载波一倍频信号 u_{2o} ,二倍频的信号 u_{1o} ,同时调节使输入和输出信号的相位相差 0° 或 180° 。这样,这两路信号在解调时就可以确保同载波信号很好地相位匹配。

6 结 论

实现了对声波频段的微振动目标测量系统,分析了影响解调的因素及它们所能造成的影响。由分析可知,PZT 调制频率的稳定性对最后解调的波形有很大的影响,调制频率稳定可以消除调制引入的信号失真,相位的匹配能提高解调信号的信噪比。同时为减小干扰,提出了光纤调制和锁相环结构,为 PGC 解调系统设计提供了可靠依据。

参 考 文 献

- Liu Hewei, Qian Menglu. Measurement of small vibration by laser interferometer [J]. *Technical Acoustics*, 2001, **20**(2): 75~77
- 刘合伟, 钱梦霖. 激光干涉法测量微小振动[J]. *声学技术*, 2001, **20**(2): 75~77
- Li Yanhui, Wu Zhensen, Wu Yingli. Based on laser Doppler method for measuring small damping vibration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 231~235
- 李艳辉, 吴振森, 武颖丽. 基于激光多普勒法测量微小阻尼振动[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 231~235
- Tang Junxiong, Wan Lian, Wu Yifang *et al.*. Precision measurement of micro-vibration amplitude [J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(12): 1092~1097
- 汤俊雄, 万 炼, 吴义芳 等. 微振动振幅的精密测量[J]. *光学学报*, 1989, **9**(12): 1092~1097
- Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Real-time micro-vibration measurement with a laser diode interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 578~580
- 宋 松, 王向朝, 王学锋 等. 半导体激光微小振动实时干涉测量仪[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 578~580
- J. Solomon, R. Prigo. Eavesdropping with a laser[J]. *Am. J. Phys.*, 1987, **55**(4): 381
- Zhang Chaofan. The improvement and realization of laser eavesdropping[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(2): 145~148
- 张超凡. 激光窃听技术的改进与实现[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(2): 145~148
- Shen Hong, Luo Hui. The fiber optic hydrophone and its applications[J]. *Sensor World*, 2007, **13**(4): 27~29
- 沈 洪, 罗 辉. 光纤水听器传感技术及应用[J]. *传感器世界*, 2007, **13**(4): 27~29
- Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone using phase-generated-carrier techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1536~1540
- 曹家年, 张立昆, 李绪友 等. 干涉型光纤水听器相位载波调制及解调方案研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1536~1540
- Zhou Bo, Li Xuyou, Hao Yanling. Realization of interferometric

- fiber-optic hydrophone using homodyne demodulation techniques [J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(3): 32~37
- 周 波, 李绪友, 郝燕玲. 干涉型光纤水听器 PGC 零差解调技术研究[实现][J]. *光学仪器*, 2004, **26**(3): 32~37
- 10 Huang Jianhui, Cao Mang, Li Dacheng *et al.*. Review of phase generated carrier demodulation techniques for interferometric fiber-optic sensors [J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(3): 228~231
- 黄建辉, 曹 芒, 李达成 等. 用于干涉型光纤传感器的相位生成载波解调技术[J]. *光学技术*, 2000, **26**(3): 228~231
- 11 Zhou Xiaodong, Tang Weizhong, Zhou Wen. The realization of PGC scheme interferometric fiber-optic sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **25**(5): 411~414
- 周效东, 汤伟中, 周 文. PGC 调制-解调光纤水声传感器的研究与实现[J]. *中国激光*, 1998, **25**(5): 411~414
- 12 Li Xuyou, Zhang Likun, Zhang Xingzhou. Analysis and simulation of PGC detection of interferometric fiber-optic sensor [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 1999, **20**(2): 58~64
- 李绪友, 张立昆, 张兴周. 干涉型光纤传感器的 PGC 检测方法的分析与研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 1999, **20**(2): 58~64
- 13 Lan Tian, Zhang Chunxi, Li Lijing *et al.*. Carrier phase advance technique for digital PGC demodulation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(7): 49~52
- 蓝 天, 张春熹, 李立京 等. 全数字 PGC 解调的载波相位超前技术[J]. *光电工程*, 2008, **35**(7): 49~52

栏目编辑:李文喆