

doi:10.3788/gzxb20164512.1207004

# 改进式相位生成载波调制解调方法

郎金鹏, 常天英, 陈建冬, 刘野, 崔洪亮, 于淼

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130012)

**摘 要:**在对调制方法、混频原理、调制深度取值等问题深入研究的基础上,为得到更高的抗干扰能力,结合相位生成载波调制解调技术与微分交叉相乘解调算法,引入除法运算,提出一种改进的相位生成载波解调算法,以抑制光强扰动对解调结果的影响,并与传统的微分交叉相乘解调算法在光源产生低频干扰时的解调效果对比,进行仿真实验.对比信号源分别为 20 Hz 与 200 Hz 时的解调效果,结果表明,在光源有 1 Hz 低频扰动的情况下,在高频信号解调的结果中,改进的解调算法可以准确地实现对待测信号的解调,解调结果与传统方法相比具有更高的线性度.

**关键词:**信号处理;相位生成载波;微分交叉相乘;光源扰动;解调;低频干扰

**中图分类号:** TN252; O436.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2016)12-1207004-5

## Improved Phase Generated Carrier Modulation and Demodulation Method

LANG Jin-peng, CHANG Tian-ying, CHEN Jian-dong, LIU Ye, CUI Hong-liang, YU Miao

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Based on detailed analysis of modulation methods, frequency mixing principle, modulation depth value and so on, in order to get a better ability of anti-interference, combining the phase generated carrier demodulation and modulation technology with the differential and cross multiplying demodulation algorithm, introducing the method of division operation, an improved phase generated carrier demodulation method was proposed in this paper to reduce the effect of light intensity disturbance. Meanwhile, its demodulation results were compared with that of the traditional method and a simulation experiment was carried out. The demodulation results when the frequency of signal source is 20 Hz and 200 Hz were compared, the results indicate that in the condition of light intensity has a 1 Hz low frequency disturbance, the improved demodulation algorithm is much better than the traditional algorithm, especially in linearity and capacity of resisting low frequency disturbance for high frequency demodulation.

**Key words:** Signal processing; Phase generated carrier; Differential cross multiplying; Light intensity disturbance; Demodulation; Low frequency disturbance

**OCIS Codes:** 070.0070; 070.1170; 060.2310; 060.5060; 150.1135; 200.4560

## 0 引言

光纤传感器技术自 20 世纪 70 年代末发展以来,已经成为光电技术产业中不可分割的一部分.光纤干涉型传感器作为一种典型的光纤传感器,由于其体积

小、质量轻、抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高等特点<sup>[1]</sup>,被广泛应用于国防科技、海洋监测、工业医疗等领域<sup>[2-4]</sup>.

在诸多干涉型光纤传感器的解调方法中,相位生成载波(Phase-Generated Carrier, PGC)调制解调方

**基金项目:**海洋公益性行业科研专项(No. 201405026-01)、国家科技支撑计划项目(No. 2012BAK04B03)和科技部国际部国际合作项目(No. 2013DFA11550)资助

**第一作者:**郎金鹏(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术及其应用. Email: langjinpeng@126.com

**导 师:**崔洪亮(1956-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤通信和传感、固态电子及半导体物理和器件、THz 科学与技术、纳米光学和纳米电子学等. Email: hcui@jlu.edu.cn

**通讯作者:**常天英(1981-),女,副教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术及应用、太赫兹技术及应用. Email: tchang@jlu.edu.cn

**收稿日期:**2016-06-13; **录用日期:**2016-07-27

<http://www.photon.ac.cn>

法<sup>[5-6]</sup> 由于其灵敏度高、动态范围大、线性度好等特点, 成为监测领域内干涉型光纤传感器最常用的解调技术之一. 相位生成载波调制解调算法中最典型的两种算法是微分交叉相乘法 (Differential and Cross Multiplying, DCM) 和反正切法 (arctangent, arctan), 但其本身存在局限性, 如: 解调结果易受光源扰动<sup>[7]</sup>、调制深度的影响, 以及解调结果具有伴生调幅等问题, 针对不同的局限性, 各种改进的解调算法相继被提出. 为解决伴生调幅解调的失真问题, 宫铭举<sup>[8]</sup> 等提出三倍频微分交叉相乘解调算法, 利用干涉信号的高次谐波进行解调, 避免伴生调幅解调的失真, 这种算法削弱了伴生调幅对解调结果的影响; 但与传统的 DCM 解调方案相比, 由于采用三倍频混频信号, 导致采样频率升高, 需要采用抗混频滤波器使采样频率减小到与 DCM 算法相当. 为克服光源扰动的影响, HE Jun 对算法进行改进<sup>[9]</sup>, 提出一种反正切微分自相乘解调算法, 该算法与 DCM 算法相比, 从解调结果中消去与光强相关的量, 从而减小光源扰动对解调结果的影响; 与反正切算法和基频混频算法相比, 消除了与调制深度有关的贝塞尔函数项, 完全解除了解调结果对调制深度的依赖, 一定程度上降低了总谐波失真. 时隔两年, 中科院继续提出一种改进算法<sup>[10]</sup>, 在抑制光强噪声影响中具有重要意义; 美国海军实验室将无源相位生成载波与时分复用技术相结合, 提高了相位测量的灵敏度但仍然存在伴生调幅等问题<sup>[11]</sup>. 天津理工大学, 长沙大学等也在相位生成载波解调方法的研究中取得了突出进展<sup>[12-13]</sup>.

本文提出一种在高频信号检测中可以抑制光强低频扰动影响的解调算法, 并对算法进行仿真分析. 在仿真时, 模拟生成一个高频信号, 并给光源施加一个低频扰动信号, 与 DCM 解调算法相比, 在高频微震荡信号的监测中, 改进算法的抗干扰能力与解调结果的线性度均得到明显提高.

## 1 PGC-DCM 调制解调方法

### 1.1 调制技术

相位生成载波调制技术主要分为外调制和内调制两类. 外调制是将调制波施加在干涉臂上, 如图 1 中, Michelson 干涉光路中的①部分, 通常使用压电陶瓷 (Piezoelectric Transducer, PZT) 元件<sup>[14]</sup> 实现; 内调制是将调制波施加在激光器的驱动电流上, 如图 1 中 Michelson 干涉光路中的②部分, 通过一定频率调制激光器的驱动电流使激光器输出波长、功率实现同一频率的载波. 对于光纤干涉仪, 外调制与内调制效果等价, 外调制在光路中引入一个有源器件, 不利于实现全光纤网络, 但调制效果明显; 内调制方案利于实现全光纤网络, 但其结果不仅调制了输出波长, 同时也影响了

光输出功率.

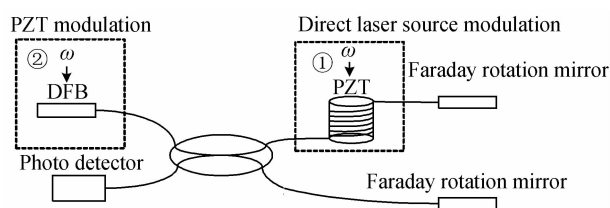


图 1 Michelson 光纤干涉型传感器

Fig. 1 Configuration of michelson interferometric fiber optic sensor

### 1.2 解调理论

DCM 解调原理框图如图 2. 干涉信号的输出<sup>[15]</sup> 表示为

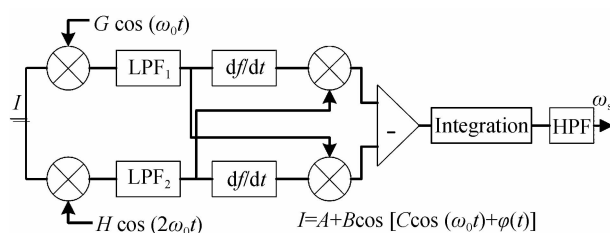


图 2 DCM 解调算法原理框图

Fig. 2 DCM demodulation flowchart

$$I = A + B \cos [C \cos (\omega_0 t) + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中,  $C$  为调制深度,  $A$  和  $B$  为常量, 并且  $B = kA$ ,  $A$  和  $B$  均为受光源影响的参量, 且  $k < 1$ ,  $k$  为干涉条纹可见度, 本文在数据仿真时取  $k = 0.5$ ,  $A, B$  值正比于光源发出的功率.  $\cos (\omega_0 t)$  为高频载波信号,  $\varphi(t)$  为待测高频信号, 即

$$\varphi(t) = D \cos (\omega_s t) + \Phi(t) \quad (2)$$

式中,  $\omega_s$  为信号源的频率,  $D$  为幅值,  $\Phi(t)$  为系统初始相位差. 将式 (1) 进行三角函数展开可得

$$I = A + B \cos [C \cos (\omega_0 t)] \cos [\varphi(t)] - B \sin [C \cos (\omega_0 t)] \sin [\varphi(t)] \quad (3)$$

由贝塞尔函数与三角函数的关系<sup>[16]</sup>

$$\cos (x \cos \varphi) = J_0(x) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m}(x) \cdot \cos (2m\varphi) \quad (4)$$

$$\sin (x \cos \varphi) = -2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m-1}(x) \cdot \cos [(2m-1)\varphi] \quad (5)$$

其中

$$J_m(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(m+k+1)} (x/2)^{m+2k} (k \geq 0) \quad (6)$$

将式 (2) 进行贝塞尔级数展开得

$$I = A + B \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(x) \cdot \cos (2k\omega_0 t)] \cos [\varphi(t)] - [2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot J_{2k+1}(C) \cos [(2k+1)\omega_0 t]] \sin [\varphi(t)] \} \quad (7)$$

当  $\varphi(t) = 0$  时, 只有  $\omega_0$  附近的偶倍频, 当  $\varphi(t) = \pi/2$

时,只有  $\omega_0$  附近的奇倍频.将幅度为  $G, H$ ,角频率分别为  $\omega_0$  和  $2\omega_0$  的信号与干涉信号进行混频后分别通过低通滤波器  $LPF_1$  和低通滤波器  $LPF_2$ .由式(7)可知,当与高频信号  $G\cos(\omega_0 t)$  混频相乘后可得

$$I \times G\cos(\omega_0 t) = AG\cos(\omega_0 t) + BG\{[J_0(C) \cdot \cos(\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) [\cos(2k+1)\omega_0 t + \cos(2k-1)\omega_0 t]] \cos[\varphi(t)] - [\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) [\cos[(2k+2)\omega_0 t] + \cos 2k(\omega_0 t)]] \cdot \sin[\varphi(t)]\} \quad (8)$$

当贝塞尔级数取 0 阶时,即  $k=0$  时

$$I \times G\cos(\omega_0 t) = AG\cos(\omega_0 t) + BG\{[J_0(C) \cdot \cos(\omega_0 t)] \cos[\varphi(t)] - [J_1(C) \cos(2\omega_0 t)] \sin[\varphi(t)]\} \quad (9)$$

使用滤波器滤除高阶信号,取滤波器的截止频率  $\omega_c < \omega_0$ ,通常为保证较好的滤波效果,取  $2\omega_c < \omega_0$  即可得到

$$I_1 = -BGJ_1(C) \sin[\varphi(t)] \quad (10)$$

同理当信号  $I$  与  $H\cos(2\omega_0 t)$  进行混频后通过低通滤波器  $LPF_2$  后的信号表示为

$$I_2 = -BHJ_2(C) \cos[\varphi(t)] \quad (11)$$

本文在进行仿真时采用的方法为基于矩形窗函数的有限冲击响应滤波器实现对信号的低通和高通滤波.将信号进行微分处理后得

$$I_1 = -BGJ_1(C) \varphi'(t) \cos[\varphi(t)] \quad (12)$$

$$I_2 = -BHJ_2(C) \varphi'(t) \sin[\varphi(t)] \quad (13)$$

微分处理后的信号按流程框图进行交叉相乘得

$$I_1 = -B^2GHJ_1(C)J_2(C) \varphi'(t) \sin^2[\varphi(t)] \quad (14)$$

$$I_2 = B^2GHJ_1(C)J_2(C) \varphi'(t) \cos^2[\varphi(t)] \quad (15)$$

按流程图差分后可得

$$I = B^2GHJ_1(C)J_2(C) \varphi'(t) \quad (16)$$

将差分所得信号进行积分处理后得

$$I = B^2GHJ_1(C)J_2(C) \varphi(t) \quad (17)$$

将式(2)代入式(17)可得

$$I = B^2GHJ_1(C)J_2(C) [D\cos(\omega_s t) + \Phi(t)] \quad (18)$$

经过高通滤波器滤除直流噪声分量后输出为

$$I = B^2GHJ_1(C)J_2(C) D\cos(\omega_s t) \quad (19)$$

由式(19)可以看出,解调结果受  $B$  值的影响,而由于  $B$  值与  $A$  值均与入射光强有关,当入射光光强发生扰动时会对解调结果产生影响,同时,为保证最后处理的信号受调制深度  $C$  值的影响较少,在选择  $C$  值的时候不仅要求  $C$  值尽可能小,还要保证它们的导数尽可能趋近于 0.根据式(6)可得图 3,由图 3 可知当  $C$  值约等于 2.37 时  $J_1(C)J_2(C)$  的导数接近于 0,  $J_1(C)J_2(C)$  的值较为稳定,解调信号  $I$  的输出值不易受  $C$  值的影响.

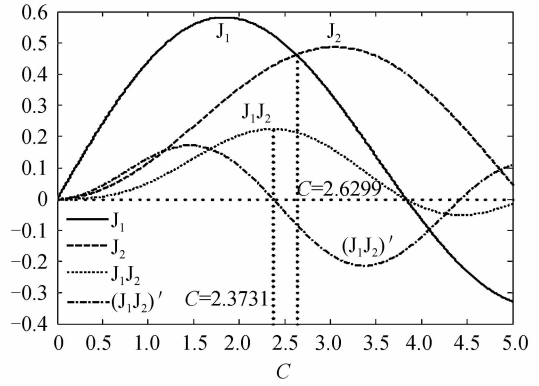


图 3  $J$  值及导数图像

Fig. 3  $J$  and derivative

## 2 改进的解调方案

由 DCM 解调算法可知,在①处经过低通滤波后的光强形式如式(10)、式(11).改进的解调流程如图 4,低通滤波后的信号在②、③处进行自相乘,在④处进行互乘可得

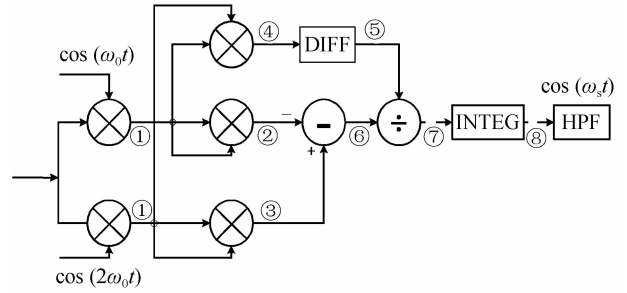


图 4 改进的解调流程图

Fig. 4 An improved demodulation flowchart

$$L_1^2(t) = (1/2)B^2J_1^2(C) \{1 - \cos[2\varphi(t)]\} \quad (20)$$

$$L_2^2(t) = (1/2)B^2J_2^2(C) \{1 + \cos[2\varphi(t)]\} \quad (21)$$

$$L_2(t) \cdot L_1(t) = B^2J_1(C)J_2(C) \sin[2\varphi(t)] \quad (22)$$

对两路自相乘的信号进行差分处理后,在⑥处的干涉信号表示为

$$L_2^2(t) - L_1^2(t) = (1/2)B^2[J_2^2(C) - J_1^2(C)] + (1/2)B^2[J_2^2(C) + J_1^2(C)] \cos[2\varphi(t)] \quad (23)$$

由图 3 可知,当调制深度约等于 2.63 时,  $J_1(C)$  与  $J_2(C)$  的值近似相等,则式(23)可近似表示为

$$L_2^2(t) - L_1^2(t) = B^2J_1^2(C) \cos[2\varphi(t)] \quad (24)$$

对式(22)中互乘的两路干涉信号进行微分处理后可得

$$[L_2(t) \cdot L_1(t)]' = 2B^2J_1(C)J_2(C) \cdot \cos[2\varphi(t)] \varphi'(t) \quad (25)$$

将微分后的信号与差分后的信号作比可得

$$I = 2\varphi'(t) \quad (26)$$

虽然引入除法增加了结果的不稳定性,但由式(26)可以看出受光源扰动影响的量已经从解调结果中去除,将求得的信号进行积分及高通滤波即可实现对待测信号的解调.

$$I = \cos(\omega_s t) \quad (27)$$

由式(27)可以看出解调结果中不在具有  $B$  或  $A$  项,即解调结果不再受光源扰动的影响。

### 3 仿真分析与结果对比

在进行仿真操作时,设采样频率  $f_s$  为 10 000 Hz,采样点数为 10 000. 分别以频率为 20 Hz 和 200 Hz, 振幅为 0.5 的余弦信号为信号源, 采用幅值为 1, 频率为 600 Hz 的余弦信号为载波信号, 并使光源即式(1)中的  $A$  值为一个深度即 1, 频率为 1 Hz 的低频扰动信号, 仿真生成的信号源和低频扰动的光强信号波形如图 5.

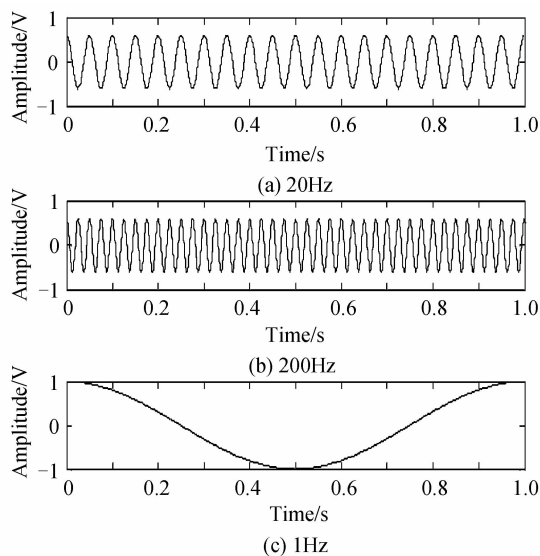


图 5 仿真信号

Fig. 5 Simulation signal

图 6 和图 7 分别为待测信号为 20 Hz 和 200 Hz, 且幅值较小的情况下, 改进的解调算法和标准 DCM 解调算法解调结果的对比图, 对比图 6 与图 7 可知, DCM 解调结果受光源扰动已经出现了严重的失真, 但

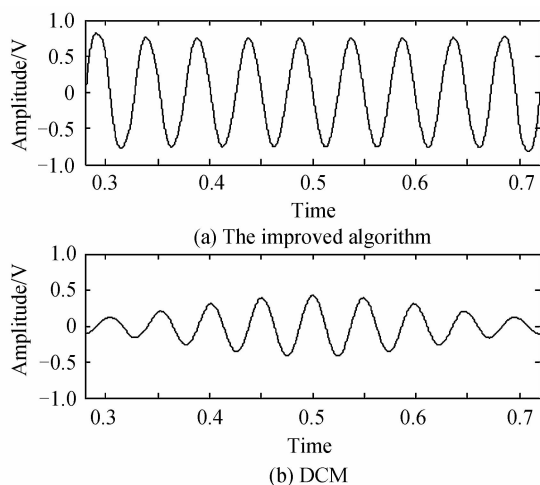


图 6 信号源为 20 Hz 时的解调结果对比

Fig. 6 Demodulation results using different algorithms when the signal frequency is 20 Hz

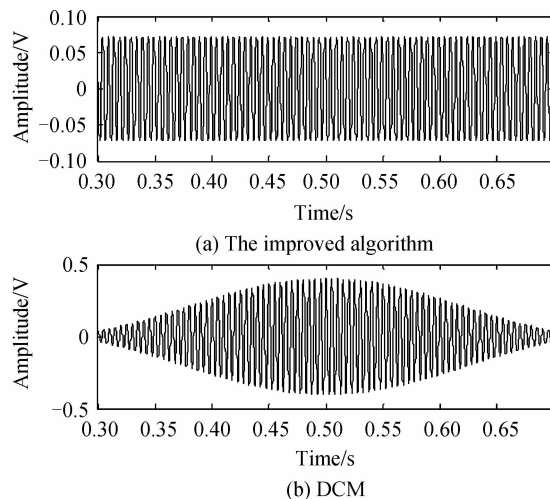


图 7 信号源为 200 Hz 时的解调结果对比

Fig. 7 Demodulation results using different algorithms when the signal frequency is 20 Hz

改进的解调算法仅有较小的失真, 基本实现了对待测信号的还原。

### 4 结论

随着光纤干涉型传感器的发展, 干涉信号解调结果的可靠性要求越来越高. 本文提出一种改进的相位生成载波解调方案, 推导了微分交叉相乘解调算法和改进的解调算法; 在给光源一个 1 Hz 低频扰动的条件下, 分别在信号源为 20 Hz 和 200 Hz 的情况下, 将两种算法的解调过程和结果进行仿真, 改进算法的解调结果的线性度明显高于微分交叉相乘解调算法. 改进的解调算法在一定条件下具有明显的抗光源扰动干扰的性能, 采用该方法能够提高光纤干涉型传感器的抗光源低频干扰的能力以及提高解调结果的线性度, 有利于光纤干涉型传感器的推广应用, 具有一定的指导意义。

#### 参考文献

- [1] LEE B H, KIM Y H, PARK K S, *et al.* Interferometric fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, **12**(3): 2467-2486.
- [2] CUI Hong-liang, LIU Ye, YU Miao, *et al.* Application of wavelet denoising in distributed optical fiber interferometric vibration detection and location system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(10z): 71-76.  
崔洪亮, 刘野, 于淼, 等. 小波降噪在分布式光纤干涉振动检测及定位系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(10z): 71-76
- [3] YIN Jin-de, LIU Tie-gen, JIANG Jun-feng, *et al.* Assembly-free-based fiber-optic micro-michelson interferometer for high temperature sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(6): 625-628.
- [4] PETROVIC M, MIHAILOVIC P, BRAJOVIC L, *et al.* Intensity fiber-optic sensor for structural health monitoring calibrated by impact tester[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, **16**(9): 3047-3053.
- [5] DANDRIDGE A, TVETWN A B, GIALLORENZI T G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using

- phase generated carrier[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, **30**(10): 1635-1641.
- [6] FANG Gao-sheng, XU Tuan-wei, FENG Sheng-wen, *et al.* Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. *Journal of Lightwave Technol*, 2015, **33**(13): 2811-2816.
- [7] ZHANG Shuai, ZHANG Ai-ling, PAN Hong-gang. Eliminating light intensity disturbance with reference compensation in interferometers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(17): 1888-1891.
- [8] GONG Ming-ju, DENG Yue, QIAO Dong-hai, *et al.* A scheme of PGC demodulation based on analog-digital mixed system[J]. *Piezoelectrics & Coustopics*, 2008, **30**(5): 538-540.  
宫铭举, 邓越, 乔东海, 等. 一种模数混合的 PGC 解调方案 [J]. *压电与声光*, 2008, **30**(5): 538-540.
- [9] HE Jun, WANG Lin, LI Fang, *et al.* An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(22): 3258-3265.
- [10] TONG You-wan, ZENG Hua-lin, LI Li-yan, *et al.* Improved phase generated carrier demodulation algorithm for eliminating light intensity disturbance and phase modulation amplitude variation [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(29): 6962-6967.
- [11] KERSEY A D, DANDRIDGE A, TVETEN A B. Time-division multiplexing of interferometric fiber sensors using passive phase-generated carrier interrogation [J]. *Optics Letters*, 1987, **12**(10): 775-777.
- [12] JIANG Qin. Research of demodulation method for interferometric fiber optic sensors[J]. *Journal of Changsha University*, 2014, **28**(5): 15-16.  
江琴. 干涉型光纤传感器解调技术的研究[J]. *长沙大学学报*, 2014, **28**(5): 15-16.
- [13] WANG Yan, WANG Kai-han, HAO Bin, *et al.* Phase generated carrier demodulation algorithm for eliminating companion amplitude modulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(1): 76-80.  
王燕, 王恺晗, 郝彬, 等. 一种消除伴生调幅影响的 PGC 解调方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, **51**(1): 76-80.
- [14] CHEN De-sheng, WANG Hai-bin, JIANG Lei. PGC modulation based on PZT for fiber interferometric sensor [C]. *Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA)*, 2012: 148-150.
- [15] SHI Qing-ping, TIAN Qian, WANG Li-wei, *et al.* Performance improvement of phase-generated carrier method by eliminating laser-intensity modulation for optical seismometer [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(2): 024402-6.
- [16] BIHAN J L, YABRE G. Bessel function and perturbation analyses of the FM and IM behavior of a directly modulated semiconductor laser[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1994: 248-258.