光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023111502

基于DFB激光器的振动传感系统改进PGC解调算法

江覃晴[1*]，吕桂贤[1]，赵文彬[2]，王　斌[3]，楚鹏浩[3]，赵慧光[3]

（上海电力大学 1. 电子与信息工程学院；2. 电气工程学院，上海 200090；3. 国网新乡供电公司，河南 新乡 453004）

摘　要： 相位生成载波(Phase Generated Carrier，PGC)解调算法是目前光纤干涉传感领域中重要的解调算法。针对目前PGC解调算法中光强扰动和调制深度影响信号解调准确度的问题，提出了一种改进的PGC解调算法(PGC-Ameliorated)，并搭建了基于分布反馈(Distributed Feedback，DFB)激光器的振动传感系统进行实验验证。实验结果表明，当被测振动信号的频率为800 Hz时，该算法信噪比为57 dB，优于微分交叉相乘(Differential and Cross Multiplying，DCM)算法和反正切(Arctan)算法近20 dB。在不同光强下，该算法解调信号幅值波动范围在±0.02 rad；在不同调制深度下，该算法总谐波失真最小为0.61%，信纳比最大为25.9 dB，相比于DCM算法和Arctan算法具有更低的总谐波失真和更高的信纳比。

关键词： 光纤振动传感；DFB激光器；PGC解调；光强扰动；调制深度

中图分类号： TN247　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0319－08

Improved PGC Demodulation Algorithm for Vibration Sensing System Based on DFB Laser

JIANG Qinqing[1]，LV Guixian[1]，ZHAO Wenbin[2]，WANG Bin[3]，CHU Penghao[3]，ZHAO Huiguang[3]

（1. College of Electronics and Information Engineering；2. College of Electrical Engineering，Shanghai University of Electric Power，Shanghai 200090，CHN；3. State Grid Xinxiang Power Supply Company，Xinxiang 453004，CHN）

Abstract： The Phase Generated Carrier (PGC) demodulation algorithm is currently an important demodulation algorithm in the field of fiber optic interferometric sensing. To overcome the problem of light intensity perturbation and modulation depth affecting the accuracy of signal demodulation in the current PGC demodulation algorithm，an improved PGC demodulation algorithm (PGC-Ameliorated) is proposed，and a vibration sensing system based on Distributed Feedback (DFB) lasers is built for experimental verification. The experimental results show that when the frequency of the measured vibration signal is 800 Hz，the signal-to-noise ratio of the algorithm is 57 dB；this is better than those of the Differential and Cross Multiplying (DCM) and Arctan algorithms. At different values of light intensity，the amplitude of the demodulated signal fluctuates in the range of ±0.02 rad. At different values of modulation depth，the algorithm exhibits a minimum total harmonic distortion of 0.61% and a maximum signal-to-noise ratio of 25.9 dB that provides lower total harmonic distortion and higher signal-to-noise ratio than the DCM and Arctan algorithms.

Key words： optical fiber vibration sensing；DFB laser；PGC demodulation；optical intensity perturbation；modulation depth

收稿日期：2023－11－15.

* **通信作者：**江覃晴

0 引言

振动作为安全检测的重要指标之一，在轨道交通、工程建设、健康医疗等日常安全评估方面，以及地震和海啸等自然灾害的监测中发挥着至关重要的作用[1-4]。分布反馈(DFB)激光器具有灵敏度高、抗电磁干扰、动态监测范围大等优点，在传感领域有着显著优势[5-6]。DFB 激光器作为传感基元，可以将振动的变化转换为 DFB 激光器波长的变化，利用干涉仪可将波长变化转换为相位变化，最终通过解调算法获取振动信息[7-8]。传统的相位解调算法主要有外差解调算法、3×3 耦合器解调算法和相位生成载波(PGC)解调算法[9-13]。其中，PGC 解调算法具有动态范围宽、灵敏度高、线性度好等优点，是目前应用最广泛的解调算法[14-15]。

根据解调方法类型，PGC 解调算法主要分为 DCM 算法和反正切(Arctan)算法[16-17]。PGC-DCM 算法具有良好的线性度，但易受光强扰动的影响[18-19]；而对于 PGC-Arctan 算法，当调制深度(C)偏离 2.63 时，会出现严重的谐波失真[20]。另外，PGC-Arctan 算法解调相位的范围有限，只能测量幅度较小的信号[21]。针对传统解调算法的上述问题，Chang 等[22]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的 PGC-DCM 解调算法，利用迭代对光强进行估计，从而降低光强扰动对解调结果的影响；Qu 等[23]提出了自校准 PGC-Arctan 解调算法，通过椭圆拟合算法和 C 值的相关分量联合估计 C 值；Gui 等[24]提出了一种基于参考干涉仪的改进 PGC 解调算法，降低了 C 值波动引起的谐波失真；Li 等[25]提出了一种融合自适应滤波和归一化 PGC-Arctan 的解调方法，可以准确识别载波相位延迟和 C 值。

以上研究中的改进方案是通过滤波、设置参考干涉仪等方式寻找最优值来减少光强扰动和 C 值对系统解调性能的影响，涉及大量运算，优化过程较慢，很难满足振动实时监测的需求。因此，本文提出了一种基于 DFB 激光器振动传感系统 PGC-Ameliorated 解调算法，该算法有效避免了光强扰动和 C 值变化对解调结果的影响，并且运算简单，可以实现对振动信号的实时监测。

1 算法原理

基于 DFB 激光器的振动传感系统原理如图 1 所示，振动信号作用在 DFB 激光器上，引起 DFB 激光器的波长发生变化，携带振动信息的后向散射激光经过波分复用器进入干涉仪。将高频载波信号加载到干涉仪的一臂上，干涉仪输出信号 $I(t)$ 为：

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

式中，A 和 B 是常数，与输入光强成正比[26]；C 为调制深度，ω_0 为调制角频率，$\varphi(t)$ 为干涉信号的相位变化，表示为 $\varphi(t)=\varphi_s(t)+\varphi_0(t)$，$\varphi_s=D\cos\omega_s t$ 为待测信号，D 为待测信号的幅度，ω_s 为待测信号的角频率，$\varphi_0(t)$ 为低频环境噪声引起的相位变化。

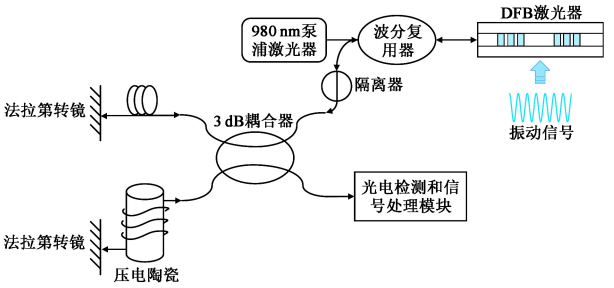


图 1 基于 DFB 激光器的振动传感系统原理图

利用 PGC-Ameliorated 解调算法对振动信号进行解调，算法原理框图如图 2 所示。首先对干涉信号 $I(t)$ 进行直流滤波，滤波后表示为 $S(t)$：

$$S(t)=B\cos[C\cos\omega_0 t+\varphi(t)] \tag{2}$$

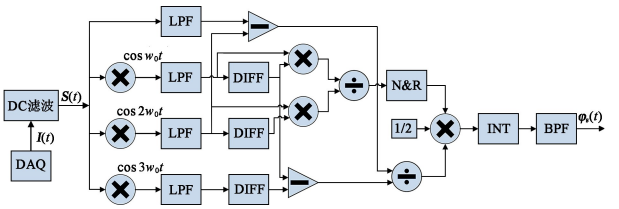


图 2 PGC 解调改进算法原理框图

$S(t)$ 分别乘以基频载波、二倍频载波以及三倍频载波，然后将 $S(t)$ 以及上述三路信号通过低通滤波器(LPF)，得到四路信号，分别表示为：

$$S_0(t)=BJ_0(C)\cos\varphi(t) \tag{3}$$

$$S_1(t)=-BJ_1(C)\sin\varphi(t) \tag{4}$$

$$S_2(t)=-BJ_2(C)\cos\varphi(t) \tag{5}$$

$$S_3(t)=BJ_3(C)\sin\varphi(t) \tag{6}$$

式中，$J_n(C)(n=0,1,2,3)$ 为 n 阶贝塞尔函数。将上述四路信号进行微分，可以得到：

$$S'_0(t)=-BJ_0(C)\sin\varphi(t)\varphi'(t) \tag{7}$$

$$S'_1(t)=-BJ_1(C)\cos\varphi(t)\varphi'(t) \tag{8}$$

$$S'_2(t)=BJ_2(C)\sin\varphi(t)\varphi'(t) \tag{9}$$

$$S'_3(t)=BJ_3(C)\cos\varphi(t)\varphi'(t) \tag{10}$$

由 $S_0(t)-S_2(t)$ 以及 $S'_3(t)-S'_1(t)$ 得到：

$$X_1(t)=S_0(t)-S_2(t)=B(J_0(C)+$$

$$J_2(C))\cos\varphi(t) \tag{11}$$

$$X_2(t)=S'_3(t)-S'_1(t)=B(J_1(C)+J_3(C))\cos\varphi(t)\varphi'(t) \tag{12}$$

公式(12)除以公式(11)得到：

$$Y(t)=\frac{X_2(t)}{X_1(t)}=\frac{J_1(C)+J_3(C)}{J_0(C)+J_2(C)}\varphi'(t) \tag{13}$$

由贝塞尔函数的递推公式 $J_{n-1}(x)+J_{n+1}(x)=\frac{2n}{x}J_n(x)$ 可以得到：

$$Y(t)=\frac{2J_2(C)}{J_1(C)}\varphi'(t) \tag{14}$$

将 $S_1(t)$ 与 $S'_1(t)$ 相乘以及 $S_2(t)$ 与 $S'_2(t)$ 相乘得到：

$$L_1(t)=S_1(t)\cdot S'_1(t)=B^2J_1^2(C)\sin\varphi(t)\cdot\cos\varphi(t)\varphi'(t) \tag{15}$$

$$L_2(t)=S_2(t)\cdot S'_2(t)=-B^2J_2^2(C)\sin\varphi(t)\cdot\cos\varphi(t)\varphi'(t) \tag{16}$$

$L_1(t)$ 和 $L_2(t)$ 相除得到：

$$L(C)=\frac{J_1^2(C)}{J_2^2(C)} \tag{17}$$

对 $L(C)$ 做负的求根运算得：

$$K=\frac{J_1(C)}{J_2(C)} \tag{18}$$

$Y(t)$ 乘以 $\frac{1}{2}K$，然后积分，得到：

$$Z(t)=\int\frac{1}{2}\cdot\frac{J_1(C)}{J_2(C)}\cdot\frac{2J_2(C)}{J_1(C)}\varphi'(t)dt=\varphi(t) \tag{19}$$

最后，用带通滤波器(BPF)去除低频环境噪声 $\varphi_0(t)$ 的影响，恢复待测信号 $\varphi_s(t)$。

可以看出，经过 PGC-Ameliorated 算法解调的振动信号中没有 B 和 C，只与 D 及 ω_s 有关。

2　仿真分析

仿真 PGC-Ameliorated 算法、PGC-DCM 算法以及 PGC-Arctan 算法在光强扰动存在和 C 值不稳定情况下的相位解调性能。仿真参数设定如下：待测信号为正弦信号，其幅值为 1 rad，频率为 800 Hz，载波频率为 10 kHz。

2.1　光强扰动对解调结果的影响

当光强扰动存在时，系统输出的干涉信号为：

$$S(t)=A(1+m\cos\omega_c t)+B(1+m\cos\omega_c t)\cdot\cos[C\cos\omega_0 t+\varphi(t)] \tag{20}$$

式中，m 为光强扰动幅度，ω_c 为光强扰动角频率。

当 $C=2.63$ rad，$m=0.3$，$f_c=200$ Hz 时，三种算法解调结果如图 3 所示。当光强扰动存在时，PGC-DCM 算法会产生严重的失真，相比之下，PGC-Ameliorated 解调算法和 PGC-Arctan 算法的结果没有失真，解调信号幅值为 1 rad，与原始信号一致。

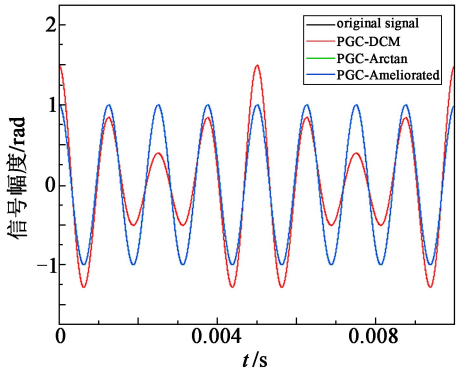
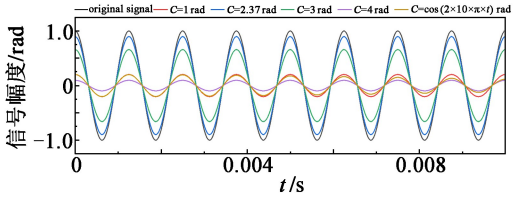


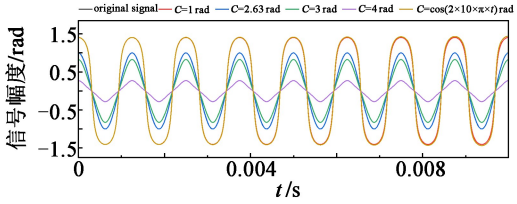
图 3　存在光强扰动时三种算法的解调结果

2.2　C 值变化对解调结果的影响

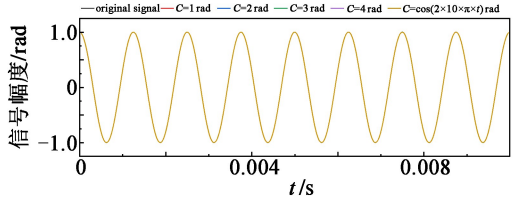
理论上，PGC-DCM 算法和 PGC-Arctan 算法的最优 C 值分别为 2.37 和 2.63 rad[27]。仿真设置不同 C 值，比较在不同 C 值时 PGC-Ameliorated 算法和 PGC-DCM、PGC-Arctan 两种算法的解调效果。仿真结果如图 4 所示，对于 PGC-DCM 算法，改变 C 值会造成解调信号幅度失真，当 C 值偏离 2.37 rad时，幅度失真逐渐增大；对于PGC-Arctan



(a) PGC-DCM 算法



(b) PGC-Arctan 算法



(c) PGC-Ameliorated 算法

图 4　三种算法在不同 C 值下的解调结果

算法，当 C 值偏离 2.63 rad 时，解调信号幅度失真且波形存在畸变；对于 PGC-Ameliorated 算法，C 在任意取值或动态变化取值时，解调信号幅值和频率均与给定待测信号一致，C 值对振动信号的解调结果没有影响。

采用幅度误差（Error）和总谐波失真（Total Harmonic Distortion，THD）两个参数来评价解调结果的线性失真和非线性失真，计算公式分别为：

$$Error = \frac{|a_t - a_0|}{a_0} \times 100\% \tag{21}$$

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_i G_i^2}{G_1^2}} \times 100\% \tag{22}$$

式中，a_t 为解调信号幅值，a_0 为原始信号幅值，G_1 为基波分量幅值，$G_i(i=2,3,\cdots)$ 为谐波分量幅值。

对比三种算法在不同 C 值下解调结果的 Error 和 THD，如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以看出，对于 PGC-DCM 算法，由于信号幅值受到 $J_1(C)\cdot J_2(C)$ 影响，$J_1(C)\cdot J_2(C)$ 在 C 取 2.37 rad 时取得最大值，此时信号幅值最大，Error 为最小值 0.16%；对于 PGC-Arctan 算法，由于信号幅值受到 $J_1(C)/J_2(C)$ 的影响，$J_1(C)/J_2(C)$ 在 C 取 2.63 rad 时取值为 1，此时信号幅值与原始信号基本一致，Error 最小值为 0.03%。在 C 值偏离理想值时，PGC-DCM 算法和 PGC-Arctan 算法解调结果的 Error 明显增大，而 PGC-Ameliorated 解调算法解调信号幅值不受 C 值的影响，Error 大约为 0.03%。

从图 6 可以看出，对于 PGC-Arctan 算法，在 C 值偏离 2.63 rad 时，$J_1(C)/J_2(C) \neq 1$，对 $J_1(C)/J_2(C)\tan\varphi(t)$ 进行反正切运算会引入谐波失真，当 C 值从 1～4 rad 变化时，解调结果 THD 值最高可达 6.75%；而 PGC-DCM 算法和 PGC-Ameliorated 算法都具有较低的 THD，分别为 0.16% 和 0.11%。

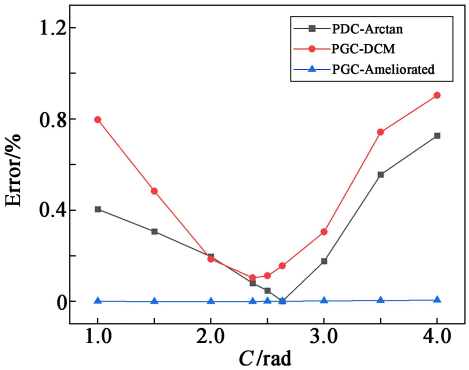


图 5 三种算法在不同 C 值下解调结果的 Error

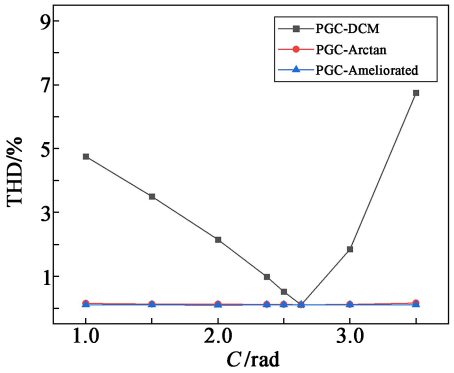


图 6 三种算法在不同 C 值下解调结果的 THD

3 实验验证

3.1 振动传感系统搭建

搭建基于 DFB 激光器的振动传感系统，如图 7 所示。980 nm 半导体激光器作为 DFB 激光器的泵浦源，通过波分复用器（Wavelength Division Multiplexing，WDM）耦合到 DFB 激光器中。振动信号通过三角形悬臂梁作用在 DFB 激光器上，导致 DFB 激光器的波长发生变化，携带振动信息的激光经 WDM 的 1 550 nm 端进入迈克尔逊干涉仪，将波长变化转化为相位变化。干涉信号经光电探测器进行光电转换，经数据采集卡采集并传输到上位机进行解调。

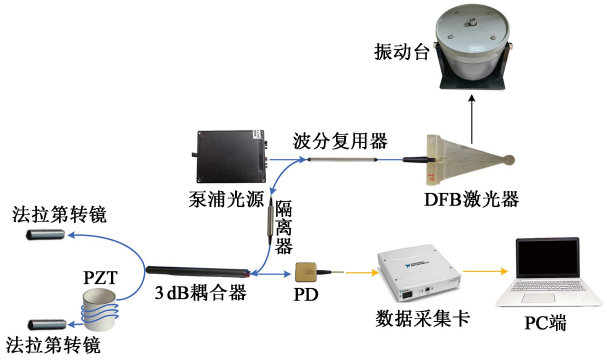


图 7 基于 DFB 激光器的振动传感系统结构

信号发生器产生一个幅度为 1 V、频率为 800 Hz 的正弦信号作用在振动台上，在图 8 所示的系统上研究三种算法对待测振动信号解调的效果，三种算法的时域和频域解调结果分别如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 可以看出，由于光强和 C 的影响，PGC-DCM 算法和 PGC-Arctan 算法解调结果出现了一定的幅度失真和谐波失真；而 PGC-Ameliorated 解调算法不受光强和 C 的影响，能够实现对振动信号的准确解调，解调结果的信噪比为 57 dB，比 PGC-DCM 算法解调结果高 19 dB，比

PGC-Arctan 算法解调结果高 17 dB。

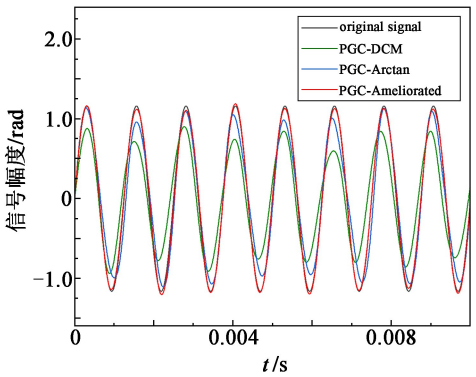
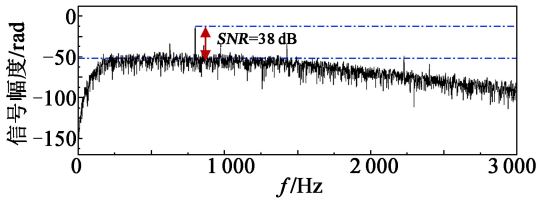
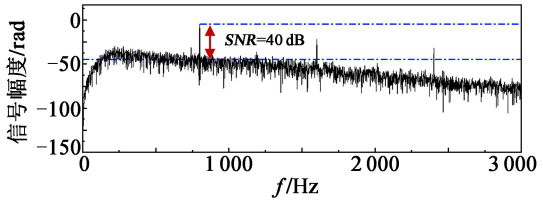


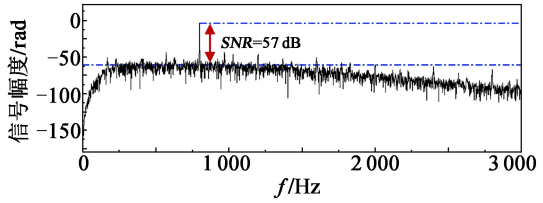
图 8　三种算法时域解调结果



(a) PGC-DCM 算法



(b) PGC-Arctan 算法



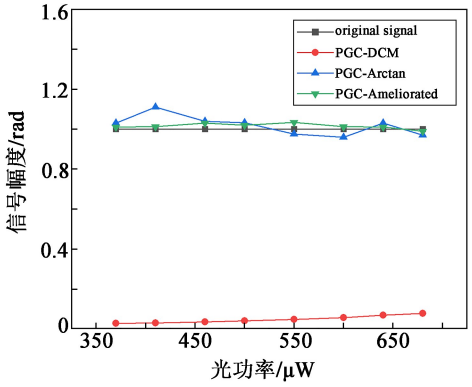
(c) PGC-Ameliorated

图 9　三种算法的频域解调结果

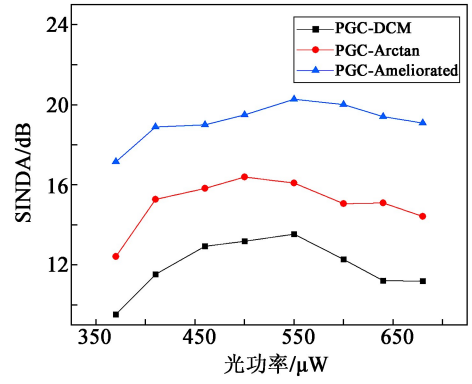
3.2　不同光强下解调结果比较

DFB 激光器的输出光功率容易受温度等影响，导致输出光功率不稳定，因此研究 DFB 激光器输出光强稳定性对振动信号解调效果的影响，具有重要的意义。实验通过调节 DFB 激光器的驱动电流，改变其输出光功率，研究三种解调算法在光强变化时解调信号的幅值与信纳比(Signal to Noise and Distortion，SINAD)。图 10(a)显示了不同光功率下三种解调算法的幅度，由于不受光强的影响，PGC-Ameliorated 算法和 PGC-Arctan 算法解调信号幅值在真实值 1 rad 附近波动，波动范围分别为 ±0.02 rad 和 ±0.1 rad；而 PGC-DCM 算法由于受到光强的影响，信号幅值偏离真实值 1 rad，且随着光强的增加而增大。

图 10(b)显示了三种算法解调结果的 SINAD，当 DFB 激光器光功率在 450～550 μW 时，PGC-Ameliorated 算法解调结果的 SINAD 为 20.2 dB，相比于 PGC-Arctan 算法提高了约 4 dB，相比于 PGC-DCM 算法提高了约 7 dB；当光功率小于 450 μW 或者大于 550 μW 时，三种算法解调结果的 SINAD 均有下降趋势，这是由于此时信号强度超出系统检测范围。光功率为 450 和 550 μW 时干涉信号波形如图 11 所示，可以看出干涉信号存在畸变，导致部分有用信息丢失，降低了振动信号解调的准确性。

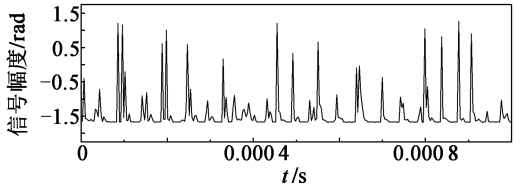


(a) 解调结果的幅度

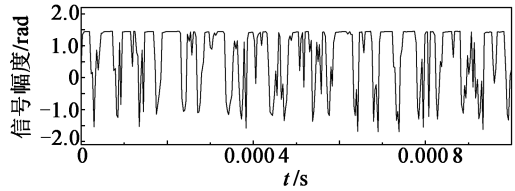


(b) 解调结果的 SINAD

图 10　不同光功率下三种算法的解调结果



(a) 光功率为 450 μW



(b) 光功率为 550 μW

图 11　不同光功率下的干涉信号波形

综上分析，PGC-Ameliorated 算法解调结果不受光强改变的影响，能够实现信号准确解调。

3.3 不同 C 值下解调结果比较

为了验证 C 值变化对 PGC-Ameliorated 算法解调结果的影响，通过调节加载在 PZT 上的驱动电压改变 C 值。

PZT 加载驱动信号后，由于电致伸缩效应使得缠绕在其上的光纤受到周期性径向应力的作用，干涉仪臂长差将发生周期性变化。假设驱动信号为 $U_0\cos(\omega_0 t)$，则干涉仪臂长差的变化 Δl 可表示为：

$$\Delta l = kN\pi d_{33}U_0\cos(\omega_0 t) \tag{23}$$

式中，k 为系统放大倍数，N 为 PZT 上缠绕光纤圈数，d_{33} 压电应变常数，U_0 为驱动电压。对调制信号而言，引起干涉仪两臂的相位差可表示为：

$$\Delta\varphi = C\cos(\omega_0 t) \tag{24}$$

同时，

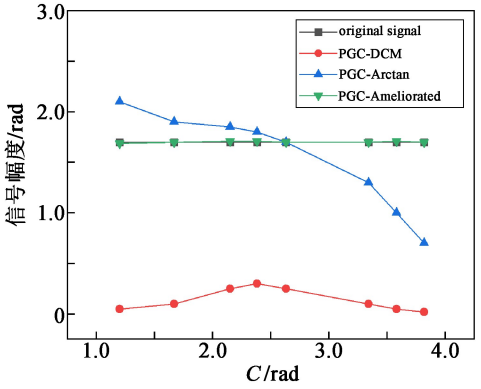
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}n\Delta l \tag{25}$$

联立上述三式可得：

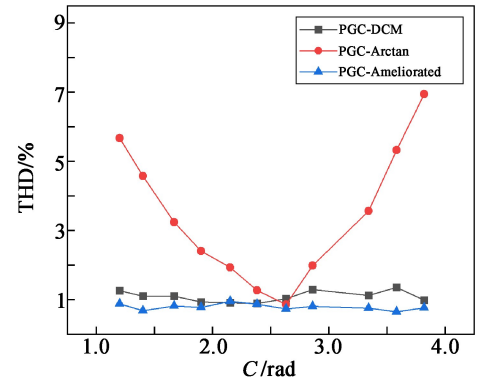
$$C = \frac{2\pi^2}{\lambda}knNd_{33}U_0 \tag{26}$$

式(26)中 $k=65$，$N=100$，$d_{33}=400\times10^{-12}$ m/V，当取 $C=2.37$ rad 时，$U_0=0.09$ V，$C=2.63$ rad 时，$U_0=0.1$ V。

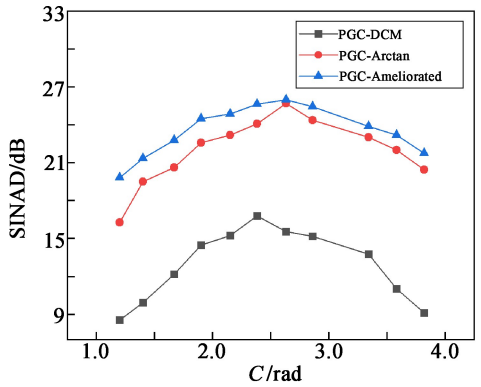
图 12(a)显示了不同 C 值下三种算法解调结果的幅度，解调信号的真实值为 1.7 rad，PGC-Ameliorated 算法解调信号幅值波动小于 0.01 rad，幅值大小基本不受 C 值的影响；由于 $J_1(C)/J_2(C)$ 的影响，PGC-Arctan 算法解调信号幅度随着 C 值的增大逐渐降低，在 C 取 2.63 rad 时与原始信号幅度一致；由于 $J_1(C)\cdot J_2(C)$ 的影响，PGC-DCM 算法解调信号幅度偏离真实值，在 C 取 2.37 rad 时达到最大值 0.3 rad；图 12(b)显示了不同算法解调结果的 THD，可以看出 PGC-Arctan 算法解调结果依赖于 C，C 值偏离理想值 2.63 时会产生严重的谐波失真，当 C 值在 1～4 rad 变化时，谐波失真最高可达 6.94%；而 PGC-DCM 算法和 PGC-Ameliorated 算法具有较低的 THD，PGC-Ameliorated 算法 THD 值最小值为 0.65%；图 12(c)显示了不同算法解调结果的 SINAD，PGC-DCM 算法和 PGC-Arctan 算法在 C 取 2.37 和 2.63 rad 时，解调结果的 SINAD 取得最大值 16.7 和 25.7 dB，当偏离理想值时，两种算法解调结果的 SINAD 明显下降。相比于 PGC-DCM 算法和 PGC-Arctan 算法，当 C 值在 1～4 rad 变化时，PGC-Ameliorated 算法的解调结果具有更高的 SINAD。实验与仿真结果一致，PGC-Ameliorated 算法解调结果不受 C 值影响，各项指标均优于 PGC-DCM 算法和 PGC-Arctan 算法。



(a) 解调结果的幅度



(b) 解调结果的 THD



(c) 解调结果的 SINAD

图 12 不同 C 值下三种算法的解调结果

4 结论

本文针对光强和 C 值变化对基于 DFB 激光器的振动传感系统进行相位解调时产生的影响，提出了一种 PGC-Ameliorated 解调算法。仿真和实验结果表明，采用 PGC-Ameliorated 解调算法后，有效避免了光强不稳定和 C 取值变化对振动信号解

调产生的影响，具有更低的幅度误差和谐波失真，提高了振动传感系统的检测精度。

参考文献：

[1] 刘正勇，Lin Htein，刘　繄，等. 特种微结构光纤振动传感器及其铁路监测应用[J]. 机械工程学报，2022，58(8)：63-70.
Liu Zhengyong，Lin Htein，Liu Yi，et al. Special microstructured optical fiber based vibration sensor and its application in railway monitoring [J]. J. of Mechanical Engineering，2022，58(8)：63-70.

[2] 王智超，赵志刚，柴雪松，等. 基于分布式光纤传感的轨道板上拱监测技术研究[J]. 铁道建筑，2020，60(4)：42-45.
Wang Zhichao，Zhao Zhigang，Chai Xuesong，et al. Research on the monitoring technology of the upper arch of track plate based on distributed fiber optic sensing [J]. Railway Engineering，2020，60(4)：42-45.

[3] 苑方丞. 基于分布式光纤传感技术智能监测系统在高铁接触网中的应用[J]. 电气化铁道，2019，30(S1)：58-60.
Yuan Fangcheng. Application of intelligent monitoring system based on distributed fiber optic sensing technology in high-speed railway contact networks[J]. Electric Railway，2019，30(S1)：58-60.

[4] 何武超，李劭晖，江　震，等. 基于光纤传感技术的桥梁拉索健康监测技术试验研究[J]. 城市道桥与防洪，2019(6)：140-142.
He Wuchao，Li Shaohui，Jiang Zhen，et al. Experimental study of bridge cable health monitoring technology based on fiber optic sensing technology [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control，2019(6)：140-142.

[5] Cranch G A，Nash P J，Kirkendall C K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. IEEE Sens. J.，2003，3(1)：19-30.

[6] 黄俊斌，宋文章，顾宏灿，等. 分布反馈式光纤激光水听器探头封装及应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(1)：27-40.
Huang Junbin，Song Wenzhang，Gu Hongcan，et al. Research progress on packaging and application of distributed feedback fiber laser hydrophone probe [J]. Laser & Optoelectronics Progress，2023，60(1)：27-40.

[7] Foster S B，Cranch G A，Harrison J，et al. Distributed feedback fiber laser strain sensor technology[J]. J. Lightwave Technol.，2017，35(16)：3514-3530.

[8] 李　鹏，柏　楠，陆　星. 干涉型光纤传感器相位解调技术研究[J]. 导航定位与授时，2020，7(3)：9-14.
Li Peng，Bo Nan，Lu Xing. Research on phase demodulation technology of interferometric fiber sensor [J]. Navigation Positioning and Timing，2020，7(3)：9-14.

[9] Zhang N，Rao W，Meng Z，et al. Investigation on the maximum signal handling capability of fiber optic interferometric sensor based on the digital heterodyne demodulation scheme[J]. Optik，2014，125(19)：5771-5775.

[10] 梁育雄，黄毓华，王　升，等. 基于非对称 3×3 耦合器的光纤相位解调研究[J]. 激光技术，2021，45(1)：144-152.
Liang Yuxiong，Huang Yuhua，Wang Sheng，et al. Fiber optical sensor demodulation research based on a symmetric 3×3 coupler[J]. Laser Technology，2021，45(1)：144-152.

[11] 汪云云，黄俊斌，顾宏灿. 基于 3×3 耦合器的信号幅值系数调整研究[J]. 舰船电子工程，2021，41(7)：193-196.
Wang Yunyun，Huang Junbin，Gu Hongcan. Study on signal amplitude coefficients adjustment based on 3×3 coupler[J]. Ship Electronic Engineering，2021，41(7)：193-196.

[12] Zhang J X，Huang W Z，Zhang W T，et al. Improved DFB-FL sensor interrogation with low harmonic distortion based on extended Kalman filter [J]. J. Lightwave Technol.，2021，39(15)：5183-5190.

[13] Yu Z H，Zhang Q，Zhang M Y，et al. Distributed optical fiber vibration sensing using phase-generated carrier demodulation algorithm[J]. Appl. Phys. B：Lasers Opt.，2018，124(5)：84.

[14] 刘腾飞，赵海增. 用于干涉型光纤传感器的相位生成载波解调技术研究进展[J]. 河南科技，2018(20)：45-47.
Liu Tengfei，Zhao Haizeng. Research progress of phase generated carrier demodulation technology for interferometric optical fiber sensor[J]. Henan Science and Technology，2018(20)：45-47.

[15] Ma T，Zhao L G，Gao H，et al. An improved PGC demodulation algorithm for optical fiber interferometers with insensitive to carrier phase delay and modulation depth[J]. Opt. Fiber Technol.，2022，74：103121.

[16] 孙　韦，于　淼，常天英，等. 相位生成载波解调方法的研究[J]. 光子学报，2018，47(8)：227-234.
Sun Wei，Yu Miao，Chang Tianying，et al. Research and improvement based on PGC demodulation method [J]. Acta Photonica Sinica，2018，47(8)：227-234.

[17] 王　梦，孔　勇，吴　虎，等. 基于高稳定性的 PGC 解调算法研究[J]. 激光技术，2022，46(4)：545-550.
Wang Meng，Kong Yong，Wu Hu，et al. Research on PGC demodulation algorithm based on high stability [J]. Laser Technology，2022，46(4)：545-550.

[18] Zhang Z R，Cheng J，Kong Y，et al. An improved phase generated carrier demodulation algorithm with high stability and low harmonic distortion [J]. Optics Communications，2022，524：128800.

[19] Li Y，Gao H，Zhao L，et al. Improved PGC demodulation algorithm to eliminate modulation depth and intensity disturbance[J]. Appl. Opt.，2022，61(19)：5722-5727.

[20] Sun K，He M Y，Han Y，et al. High noise immunity phase generated carrier demodulation technology for the modulation depth influence elimination[J]. Opt. Lasers Eng.，2022，157：107115.

[21] 刘小平，徐林峰，韩晟晨，等. 光纤水听器 PGC 技术的反正

切函数法研究[J]. 应用科技，2008，35(10)：8-11.
Liu Xiaoping，Xu Linfeng，Han Shengchen，et al. An arctangent approach for PGC demodulation of optic-fiber hydrophones[J]. Appl. Science and Technol.，2008，35(10)：8-11.

[22] 畅楠琪，黄晓砥，王海斌. 光纤水听器相位生成载波解调非线性因素的抑制方法[J]. 应用声学，2023，42(4)：804-813.
Chang Nanqi，Huang Xiaodi，Wang Haibin. Nonlinear factors suppression method of phase generated carrier demodulation of optical fiber hydrophone[J]. J. of Appl. Acoustics，2023，42(4)：804-813.

[23] Qu Z，Guo S，Hou C，et al. Real-time self-calibration PGC-Arctan demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors[J]. Opt. Express，2019，27(16)：23593-23609.

[24] Gui L，Wu X，Yu B，et al. High-stability PGC demodulation algorithm based on a reference fiber-optic interferometer with insensitivity to phase modulation depth[J]. J. Lightwave Technol.，2021，39(21)：6968-6975.

[25] 李昕聪，刘俊岩，张启元，等. 融合自适应滤波和归一化PGC-Arctan的激光干涉测振信号解调算法研究[J]. 电子测量技术，2022，45(13)：115-122.
Li Xincong，Liu Junyan，Zhang Qiyuan，et al. Research on laser interferometric signal demodulation algorithm integrating adaptive filtering and normalized PGC-Arctan[J]. Electronic Measurement Technol.，2022，45(13)：115-122.

[26] 胡雨润，王目光，孙春然，等. 光纤干涉传感器相位生成载波解调算法研究[J]. 激光技术，2022，46(2)：213-219.
Hu Yurun，Wang Muguang，Sun Chunran，et al. Research on improvement of phase generated carrier demodulation algorithm for fiber optic interferometric sensor[J]. Laser Technol.，2022，46(2)：213-219.

[27] 冉艳丽，倪晶利，傅润秋，等. 一种基于光纤激光水听器的PGC改进解调算法[J]. 应用光学，2020，41(2)：421-427.
Ran Yanli，Ni Jingli，Fu Runqiu，et al. Improved PGC demodulation algorithm based on optical fiber laser hydrophone[J]. J. of Appl. Optics，2020，41(2)：421-427.

作者简介：

江覃晴(1997—)，女，湖北省宜昌市人，硕士研究生，主要从事光纤传感技术方面的研究；

吕桂贤(2000—)，女，山西省运城市人，硕士研究生，主要从事光纤传感技术方面的研究；

赵文彬(1977—)，男，内蒙古呼和浩特市人，高级工程师，主要从事高电压与绝缘方面的研究。