

DOI: 10.13382/j.jemi.B2103903

# 一种光纤振动传感器的改进型相位解调方法研究\*

郑来芳 张俊生 梁海坚 吕玉良

(太原工业学院 太原 030008)

**摘要:**为消除干涉幅值对分布光纤振动传感系统在相位解调时的影响,提出了一种基于改进型相位生成载波(PGC)调制解调技术的 Michelson 干涉仪型光纤振动传感解调系统。其首先对 Michelson 干涉仪光纤振动传感系统的参考光纤上施加一定幅值和频率的高频载波信号,完成对待测振动信号的高频调制。而后通过零次谐波、一次谐波载频信号和低通滤波器还原出含有待测振动信号的正弦项和余弦项。最后通过对正弦项和余弦项的适当变换并相除解调出不含有干涉幅值的待测信号项。通过仿真与实验分析,提出的改进型 PGC 解调方案可以有效消除干涉幅值对解调输出信号产生的失真影响。

**关键词:** 光纤振动; Michelson 干涉仪; 相位解调; 相位生成载波

**中图分类号:** TN911.3; TP212.1      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460

## Improved phase demodulation method for fiber optic vibration sensor

Zheng Laifang Zhang Junsheng Liang Haijian Lv Yuliang

(Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

**Abstract:** In this work, a Michelson interferometer based sensing demodulation scheme using an improved phase generated carrier (PGC) technique is proposed to eliminate the influence of interference amplitude on the phase demodulation of the distributed optical fiber vibration sensing system. Firstly, a high frequency carrier signal is applied to the reference fiber of the Michelson interferometer based fiber vibration sensing system to modulate the vibration signal which is acts on the sensing fiber link of the sensing system. Second, the sinusoidal and cosine terms of the applied signal can be acquired by the zero order harmonic, the first order harmonic carrier signal and the low-pass filter. Finally, the demodulated signal without the interference amplitude is demodulated by a proper transformation and the division of sine term and cosine term. The simulation results and experimental results show that the improved PGC demodulation technique can effectively eliminate the influence of interference amplitude on the final demodulation output signal.

**Keywords:** fiber optic vibration; Michelson interferometer; phase demodulation; phase generated carrier

## 0 引言

分布式光纤振动传感技术作为近年来一种新型的传感技术,利用单一的光纤即可实现沿线连续多点的振动传感检测<sup>[1]</sup>。因其具有结构简单、响应速度快、测量精度高等诸多优点目前已经广泛应用于各个振动传感检测领域诸如海缆监测、周界安防、传输管道泄漏检测等<sup>[2-5]</sup>。传统的分布式光纤振动传感系统解调方法主要基于干涉

强度解调<sup>[6-7]</sup>,即通过解调干涉信号的强度值进行振动传感的检测。然而,随着分布式光纤振动传感技术的在各个领域的应用深入,单一的强度解调无法准确获取待测振动信号的幅值和频率信息。为此,近年来相关学者提出了采用相位解调方法<sup>[8-10]</sup>,即通过解调出待测振动信号引入传感系统的相位变化信息来准确解调出待测振动信号的幅值和频率信息。

相位生成载波(phase generated carrier, PGC)相位解调技术因其具有高灵敏度、大动态范围、解调线性度好等

收稿日期:2021-01-17      Received Date: 2021-01-17

\* 基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2019L0929)、山西省重点研发计划(201803D121069)、教育部产学研合作协同育人项目(201902045052)、太原工业学院应用型专业建设项目(2018YJ07Z)、太原工业学院教学改革研究项目(2017YJ12)资助

优点,目前广泛应用于分布式光纤振动传感系统。PGC 解调方法首先通过人为引入一个高频相位载波信号到光纤传感系统中,使得待测的振动信号可以被调制在高频相位载波的边带上。而后在解调端通过一次谐波和二次谐波的载波信号还原出待测振动信号。目前 PGC 解调方法主要分为 PGC 微分交叉乘法法 (PGC-differential cross multiplication, PGC-DCM) 和 PGC 反正切方法 (PGC-arctangent, PGC-arctan) 两种。相比于 PGC-Arctan 方法, PGC-DCM 方法具有高次谐波小、便于模拟电路处理和实现等优点。因此本文选用 PGC-DCM 方法进行振动传感信号的相位解调。传统的 PGC-DCM 方法由于解调输出受干涉幅值的影响,使得解调结果产生了严重的幅值失真<sup>[11-14]</sup>,严重制约了其在精确振动测量方面的应用。近年来,相关学者提出了基频混频的解调方法<sup>[15-16]</sup>,通过抑制直流成分等方法来提升解调方法的性能。但干涉幅值仍严重影响解调的输出从而产生严重的失真。鉴于传统的 DCM 解调方案消除干涉光强影响需要复杂的基本单元运算<sup>[17]</sup>从而使得解调方法变得复杂;传统的 Arctan 方案需要同时需要除法和反正切运算从而使得整个解调过程变得非常不稳定。结合文献<sup>[18-19]</sup>,本文提出了一种改进型的 PGC 解调方法,其首先对解调结果的直流成分进行去除,而后通过对零次谐波和一次谐波的载波信号和低通滤波器还原出的携带有振动信息的正弦项和余弦项,最后对二者进行变换和比值处理以消除干涉幅值对解调结果的影响。通过一系列仿真实验分析,提出的改进型方案可以准确的还原出待测振动信号的幅值和频率信息。

### 1 Michelson 干涉型光纤振动传感原理及相位解调

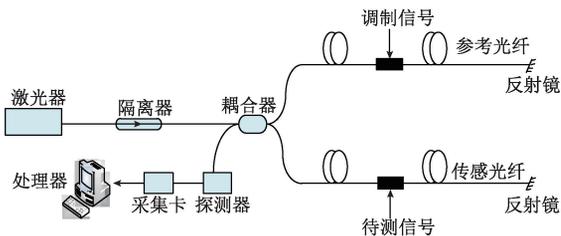


图 1 迈克尔逊干涉仪分布式光纤振动传感系统结构

Fig. 1 Diagram of Michelson interferometer based distributed optical fiber vibration sensing system

为实现 PGC 解调,高频相位载波信号被调制在了参考光纤链路上,而待测振动信号可以直接施加在传感光纤链路上。当待测振动信号与高频相位载波信号共同作

用在光纤链路上时,两路传感光信号经光纤链路反射镜的反射和传输在 3 dB 耦合器处发生干涉<sup>[20-21]</sup>。干涉输出信号的光强如下:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[C \cos w_c t + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中: $I_1$ 、 $I_2$  为传感光纤臂和参考光纤臂的传输光强; $\cos w_c t$  为施加的相位载波信号; $C$  为施加相位载波信号的调制深度; $\varphi(t)$  为待测振动信号; $\varphi_0(t)$  为初始相位。对(1)干涉信号进行探测器探测后期输出的电信号表达式可简化为:

$$I(t) = A + B \cos[cc \cos w_c t + \varphi(t)] \quad (2)$$

式中: $A$  为直流项; $B$  为干涉幅值。

对式(2)进行贝塞尔函数展开可得:

$$I(t) = A + B \{ J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k w_c t \} \cos[\varphi(t)] - 2 \left[ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1) w_c t \right] \sin[\varphi(t)] \quad (3)$$

由文献<sup>[22-23]</sup>可知,传统 PGC-DCM 方案首先对  $I(t)$  分别乘以载波信号的一次谐波  $\cos w_c t$  和二次谐波  $\cos 2w_c t$  而后通过分别通过低通滤波器滤除相应的高次谐波成分,即得到:

$$\begin{cases} X_1(t) = -BJ_1(C) \sin[\varphi(t)] \\ X_2(t) = -BJ_2(C) \cos[\varphi(t)] \end{cases} \quad (4)$$

其中  $J_1(C)$  和  $J_2(C)$  分别为贝塞尔函数的一次项和二次项。对式(4)分别进行微分交叉相乘后可得:

$$\begin{cases} X_{11}(t) = X_2(t) \times X'_1(t) = \\ \quad -B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) \sin^2[\varphi(t)] \\ X_{22}(t) = X_1(t) \times X'_2(t) = \\ \quad B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) \cos^2[\varphi(t)] \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)进行差值运算后可得:

$$\begin{aligned} X(t) &= X_{22}(t) - X_{11}(t) = \\ &= B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) \cos^2[\varphi(t)] + B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) \sin^2[\varphi(t)] = \\ &= B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) \{ \cos^2[\varphi(t)] + \sin^2[\varphi(t)] \} = \\ &= B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) \end{aligned} \quad (6)$$

对式(6)进行积分和高通滤波后可得传统 PGC-DCM 解调方案的输出  $Y(t)$  为:

$$Y(t) = \int B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) dt = B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi(t) \quad (7)$$

通过式(7)可知,传统 PGC-DCM 的解调输出可以直接线性解调出待测振动信号引入的相位变化。由于待测振动信号引入的相位变化可表示为  $\varphi(t) = D \cos w_s t$ ,从而传统 PGC-DCM 解调算法可以直接实现对待测振动信号幅值和频率的解调。但由于干涉幅值  $B$  与光源输出光功率和干涉仪的条纹对比度有关,因此最终的解调输出会产生严重失真。对于贝塞尔函数的一阶和二阶项,由于调制深度一定时,其可视为常数。因此消除干涉幅值对

解调输出的影响,可以有效抑制 PGC 解调方法产生的幅值失真。

## 2 改进型 PGC 解调方案

为消除干涉幅值  $B$  对解调输出幅值产生的影响,提出的改进型 PGC 解调方案如图 2 所示。其首先滤除干涉信号中的直流成分  $A$ ,将其不含有直流成分的信号分为两路,其中一路直接经低通滤波器滤除其含有的高阶贝塞尔函数项,而另一路则通过与一次谐波载波信号进行乘积后再通过低通滤波器滤除其对应的高阶贝塞尔函数项。而后通过不含有高阶项的微分自相乘和直接相乘求取二者的比值,以消除干涉幅值  $B$  的影响。

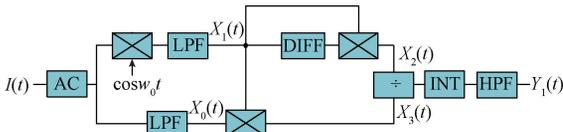


图 2 改进型 PGC 解调方案结构示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of improved PGC demodulation scheme

将滤除直流成分的  $I(t)$  直接通过低通滤波器后  
可得:

$$X_0(t) = BJ_0(C) \cos\varphi(t) \quad (8)$$

直接将  $X_0(t)$  和干涉信号与一次谐波载波信号相乘并低滤波后获取的  $X_1(t)$  进行相乘积可得:

$$X_3(t) = X_1(t) \times X_0(t) = B^2 J_0(C) J_1(C) \sin\varphi(t) \cos\varphi(t) \quad (9)$$

同时计算  $X_1(t)$  与其导数项乘积可得:

$$X_2(t) = X_1(t) \times X_1'(t) = B^2 J_1^2(C) \varphi'(t) \sin\varphi(t) \cos\varphi(t) \quad (10)$$

将  $X_2(t)$  与  $X_3(t)$  相除并积分可得最终的解调输出  $Y_1(t)$  为:

$$Y_1(t) = \int \frac{X_2(t)}{X_3(t)} dt = \int \frac{B^2 J_1^2(C) \varphi'(t) \sin\varphi(t) \cos\varphi(t)}{B^2 J_0(C) J_1(C) \sin\varphi(t) \cos\varphi(t)} dt = \frac{J_1(C)}{J_0(C)} \varphi(t) \quad (11)$$

由式(11)可知,改进型 PGC 解调方案的解调输出可以完全消除干涉幅值  $B$  对最终解调输出的影响。并且改进型 PGC 解调方案在解调时无需二次谐波载波参与解调,降低了系统对解调载波频率的要求。另一方面,从解调结果可知,其只与贝塞尔函数项的零阶和一阶项相关,而根据两项的贝塞尔函数曲线随调制深度  $C$  的变化关系,可以得到当调制深度  $C$  取值为 1.435 时,二者相等如图 3 所示。从而此时的式(11)只含有  $\varphi(t)$ 。因而,通过在改进型解调方案中选择合适的调制深度值可以进一步

消除调制深度对解调输出的影响。

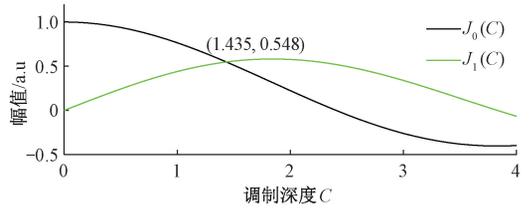


图 3  $J_0(C)$  与  $J_1(C)$  的贝塞尔曲线  
Fig. 3 Bessel curve of  $J_0(C)$  and  $J_1(C)$

## 3 仿真分析

为验证提出改进型 PGC 解调方案的有效性,本节在 MATLAB 实验平台上对基于 Michelson 分布式光纤振动传感系统的传统 PGC-DCM 方案和改进型 PGC 解调方案分别进行了对比实验分析。

考虑到实际应用中待测振动信号一般是具有一定频带的宽带信号,因此首先采用带宽为 550 Hz 的变频啁啾信号进行验证分析,其中待测变频信号的最低频率为 50 Hz,最高信号为 600 Hz,待测信号的幅值为 1.2 V。采样速率设定为  $F_s = 100$  kHz,载波频率设定为  $F_c = 10$  kHz。对待测变频振动信号分别进行传统 PGC-DCM 和改进型 PGC 解调后得到的解调结果如图 4 所示。从图 4 可知,受干涉光强以及零阶和一阶贝塞尔函数项的影响,传统 PGC-DCM 解调方案解调出的信号在幅值上远小于施加信号的幅值即 1.2 V。而采用改进型 PGC 的解调方案由于可以完全消除干涉幅值  $B$  的影响,又通过设置合适的调制深度  $C$  值,因此零阶和一阶贝塞尔函数项的影响也可以完全消除。因此,从图 4 可以看出,采用改进型的 PGC 解调方案可以较好的恢复出待测振动信号的幅值使其不产生失真。为验证改进型 PGC 解调方案对待测信号频率信息恢复情况,对其直接进行短时傅里叶变换观察其频谱信息如图 5 所示。从图 5 可以看出,采用改进型 PGC 解调方案可以较好的解调还原出待测信号的频谱信息。

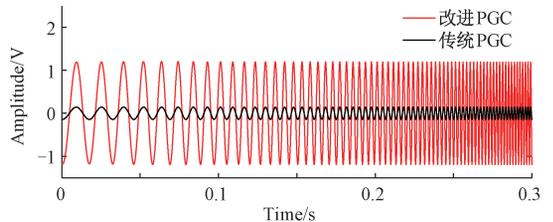


图 4 传统 PGC-DCM 与改进型 PGC 解调方案对变频信号的解调结果  
Fig. 4 The demodulation results of the traditional PGC-DCM and the improved PGC demodulation scheme on the frequency conversion signal

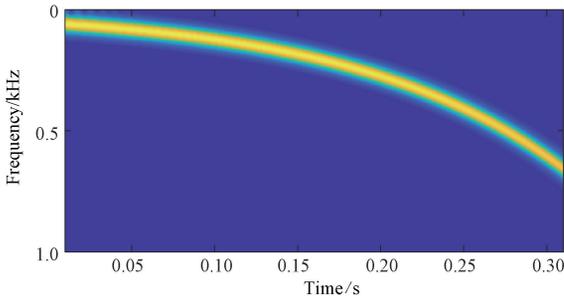


图 5 改进型 PGC 解调方案对变频信号的频谱解析  
Fig. 5 Spectrum analysis of variable frequency signal with the improved PGC demodulation scheme

由于偏振衰落和光源波动等因素的影响, Michelson 干涉仪型分布式光纤振动传感系统在实际应用中不可避免的会产生干涉条纹对比度变化, 即干涉幅值  $B$  会发生变化。而干涉幅值的变化从式 (7) 可知其会导致传统 PGC-DCM 解调输出产生严重的幅值失真。假设干涉输出  $I(t)$  被信号  $m(t) = 0.1 + 0.02 \times \cos[2\pi(10/F_s)t]$  进行调制, 使其干涉输出产生周期性衰落的变化。待测振动信号的幅值为  $1.2\text{ V}$ , 频率为  $500\text{ Hz}$ 。对其直接采用传统 PGC-DCM 进行解调, 解调结果如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出, 首先解调获取的待测振动信号在幅值因受到  $B^2$  和贝塞尔函数的影响产生了严重的幅值失真, 另一方面受低频调制信号的影响, 其解调待测振动信号的也会在幅值上受到对应的调制。直接对解调获取的待测振动信号进行快速傅里叶变换 (fast fourier transform, FFT) 求取其对应的频谱响应。从图 6(b) 可以看出, 虽然传统 PGC-DCM 可以解调出其待测振动信号的频率即频率峰值为  $500\text{ Hz}$ , 但受调制信号等因素的影响, 其在对应的频谱中也出现了其他的频谱干扰。

而采用改进型 PGC 解调方案对幅值为  $1.2\text{ V}$ , 频率为  $500\text{ Hz}$  的待测振动信号进行解调, 解调结果如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出, 采用改进型的 PGC 解调方案由于完全消除了调制深度和干涉幅值  $B$  的影响, 其可以较好的还原出待测振动信号并且不受外加调制项的影响。而其对应的频谱如图 7(b) 所示, 其也可以建立与时域波形相对应的幅频特性关系, 即对应的频谱峰值为  $1.2\text{ V}$ , 频率为  $500\text{ Hz}$ 。另一方面, 从图 6(b) 与 7(b) 对比两种解调方法的解调频谱可以看出, 采用改进型 PGC 解调方案相比于传统 PGC-DCM 解调方案其信噪比得到了较大提升。

### 4 实验结果

为进一步验证提出的改进型 PGC 解调方法的有效

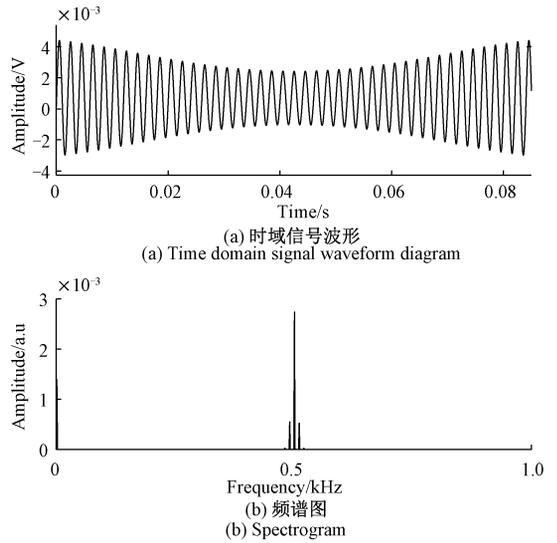


图 6 传统 PGC-DCM 方案进行调制信号解调  
Fig. 6 Demodulation results of the traditional PGC-DCM demodulation algorithm

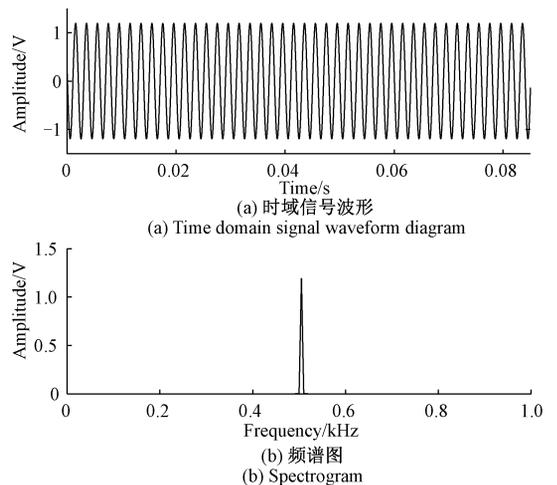
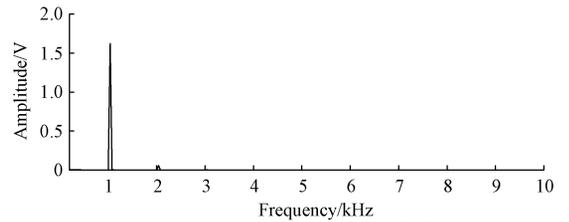


图 7 改进型 PGC-DCM 解调算法解调结果  
Fig. 7 Demodulation results of the improved PGC-DCM demodulation algorithm

性, 搭建了中图 1 所示的基于迈克尔逊干涉仪型的分布式光纤振动传感系统进行实际测试。其中激光器选用是线宽小于  $100\text{ kHz}$  的分布反馈式激光器 (DFB), 其中心波长为  $1550\text{ nm}$ 。DFB 激光器发出的连续激光信号经光隔离器后被分光比为  $50:50$  的  $1 \times 2$  光纤耦合器分成两束功率相等的干涉光信号分别进入传感光纤和参考光纤, 其与两个中心波长也为  $1550\text{ nm}$  的反射镜共同构成了迈克尔逊光纤干涉仪型振动传感器。在传感光纤与参考光纤传输的两束光经光纤反射镜反射后再次返回到  $1 \times 2$  光纤耦合器并产生干涉。携带有振动传感信息的干涉信号经过光电探测器进行光电转换后, 由分辨率为

14 bit, 采样速率为 400 KS/s 的数据采集卡进行模数转换和数据采集。最后数据采集卡获取的传感信号送至计算机进行处理分析, 解调得到最终的振动传感信息。如图 1 所示, 实验采用的是外调制方式, 将一个压电陶瓷伸缩器 (PZT) 接至参考光纤上用于施加调制信号其幅值为 3 V, 频率为 50 kHz, 将另一个 PZT 接至传感光纤上用于施加待测振动信号其幅值为 1.1 V, 频率为 1 kHz。采用改进型 PGC 解调算法对实验数据解调处理后得到的解调结果如图 8 所示。图 8(a) 采集获取得到的原始干涉信号, 由于高频调制信号和 1 kHz 的待测振动信号同时作用在参考光纤和传感光纤上, 因此干涉信号的幅值和变化频率将会非常密集。图 8(b) 为 (a) 的局部放大信号, 可以看出原始干涉信号为周期性的高频调制信号。图 8(c) 为采用提出的改进型 PGC 解调算法解调输出的施加正弦信号时域波形。由图 8(c) 可知, 解调输出信号可以较好的还原出待测信号的周期性。由于  $J_1(3)/J_0(3)$  为大于 1 的常数, 因此解调输出信号的幅值较施加信号有所增大。图 8(d) 为解调输出信号的频谱图, 可以看出其频谱峰值准确的位于 1 kHz 处。因此, 采用改进型解调方案可以准确的解调出待测振动幅频信号信息。



(d) 1 kHz 解调输出信号的频谱图

(d) Frequency spectrum of the demodulated 1 kHz vibration signal

图 8 改进型 PGC-DCM 解调方案对 1 kHz 振动信号的解调输出结果

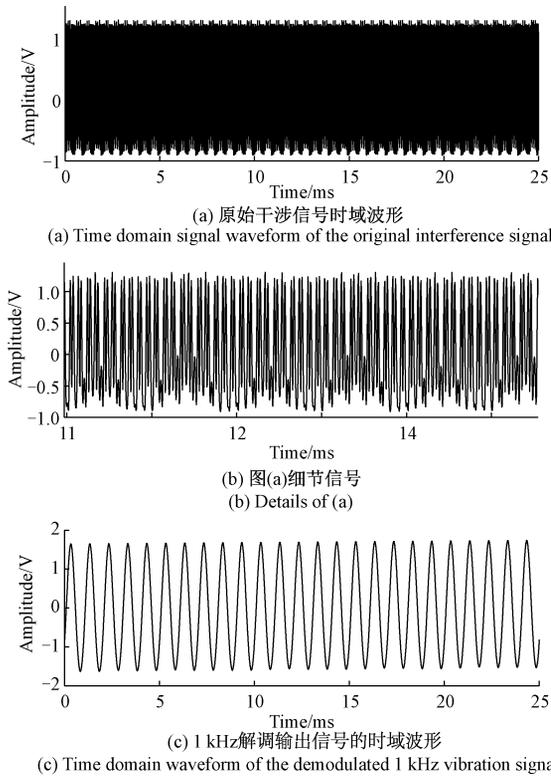
Fig. 8 Demodulation results of the improved PGC-DCM demodulation algorithm when a 1 kHz vibration signal is applied on the sensing fiber

### 5 结论

本文针对干涉幅值对分布式光纤振动传感系统进行相位解调时产生的影响, 提出了一种基于 Michelson 干涉仪光纤传感的改进型相位产生载波解调方案。其首先通过滤除干涉信号中的直流成分, 而后分为两路。其中一路直接通过低通滤波器获取含有待测信号的余弦项, 而另一路则首先通过与一次谐波载波信号进行乘积而后再进行低通滤波获取含有待测信号的正弦项。然后通过对正弦项和余弦项采取微分自相乘和直接交叉相乘并取比值处理, 从而消除干涉幅值对解调结果影响。为准确还原出待测信号幅值信息, 通过选取合适的调制深度消除贝塞尔函数项的影响。通过一系列仿真与实验分析, 提出的改进型相位载波解调方案能够准确的解调出待测振动信号并且干涉光强的影响可以有效的得到抑制。

### 参考文献

[ 1 ] 李林强, 张保存, 袁洪军. 基于光纤振动传感技术的清管器定位研究 [J]. 天然气与石油, 2020, 38 ( 6 ) : 104-108.  
 LI L Q, ZHANG B C, YUAN H J. Research on pig positioning based on optical fiber vibration sensing technology [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 ( 6 ) : 104-108.  
 [ 2 ] 汪洋, 周波达, 林晓波, 等. 基于分布式光纤振动传感的海缆锚害故障检测 [J]. 光通信研究, 2018 ( 2 ) : 40-43.  
 WANG Y, ZHOU B D, LIN X B, et al. Anchor damage detection of submarine power cable based on distributed optical fiber vibration sensing technology [J]. Study on Optical Communications, 2018 ( 2 ) : 40-43.



(a) 原始干涉信号时域波形

(a) Time domain signal waveform of the original interference signal

(b) 图(a)细节信号

(b) Details of (a)

(c) 1 kHz 解调输出信号的时域波形

(c) Time domain waveform of the demodulated 1 kHz vibration signal

- [ 3 ] 董向华. 基于  $\varphi$ -OTDR 技术的海缆扰动监测系统的研究[J]. 光纤与光缆及其应用技术, 2016, 3(3): 32-34.  
DONG X H. Research on the submarine optical cable disturbance monitoring system based on  $\varphi$ -OTDR technology [J]. Optical Fiber & Electrical cable and Their Applications, 2016, 3(3): 32-34.
- [ 4 ] 杜海龙. 分布式光纤传感周界安防系统的入侵信号处理研究[J]. 枣庄学院学报, 2020, 37(5): 52-59.  
DU H L. Research on intrusion signal analysis of distributed optical fiber perimeter security system [J]. Journal of Zaozhuang University, 2020, 37(5): 52-59.
- [ 5 ] 张智望, 王强, 谷小红, 等. 基于分布式光纤的埋地自来水管多点泄漏定位方法分析[J]. 应用光学, 2020, 41(1): 228-234.  
ZHANG ZH W, WANG Q, GU X H, et al. Analysis on underground water pipes multi-point leakage location method based on distributed optical fiber [J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(1): 228-234.
- [ 6 ] 朗金鹏, 李韶光, 王建国, 等. 分布式光纤振动检测方案及应用[J]. 红外, 2020, 41(10): 32-36.  
LANG J P, LI SH G, WANG J G, et al. The scheme and application of distributed optical fiber vibration sensing system [J]. Infrared, 2020, 41(10): 32-36.
- [ 7 ] 王贺, 孙琪真, 李晓磊, 等. 干涉型分布式光纤振动传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50: 020004-1-020004-12.  
Wang H, SUN Q ZH, LI X L, et al. Progress in optical fiber interferometer based distributed vibration sensing technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50: 020004-1-020004-12.
- [ 8 ] QIN Z G, ZHU T, CHEN L, et al. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configuration of phase-OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 2011, 23 ( 15 ): 1091-1093.
- [ 9 ] WANG C, SHANG Y, LIU X H, et al. Distributed OTDR-interferometer sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg grating [J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [ 10 ] WANG Z N, ZHANG L, WANG S, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [J]. Optics Express, 2016, 24(2): 853-858.
- [ 11 ] 柏林厚, 廖延彪, 张敏, 等. 干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1324-1327.  
BO L H, MIAO Y B, ZHANG M, et al. Improvement and Research on inteferometer fiber sensor based phase generated carrier demodulation method [J]. Acta Photonic Sinica, 2005, 34(9): 1324-1327.
- [ 12 ] 夏东明, 姜淑琴, 温晓栋, 等. 干涉型光纤传感器相位载波解调技术研究[J]. 光电技术应用, 2011, 26(5): 47-50.  
XIA D M, LOU SH Q, WEN X D, et al. PGC method using in fiber-optic interference sensors [J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(5): 47-50.
- [ 13 ] 王泽峰, 胡永明, 孟洲, 等. 干涉型光纤水听器相位载波调制-解调中信号混叠产生的机理及解决方案[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 92-98.  
WANG Z F, HU Y M, MENG ZH, et al. Physical Mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone [J]. Acta Photonic Sinica, 2008 28(1): 92-98.
- [ 14 ] 张毅, 贾波, 许海燕, 等. 基于同步载波提取的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. 光子学报, 2011, 40(10): 1531-1535.  
ZHANG Y, JIA B, XU H Y, et al. Synchronous carrier extracting method based demodulation scheme for fiber optic sensor using phase generated carrier [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(10): 1531-1535
- [ 15 ] 李阳, 苏晓星, 刘艳, 等. 基于基频混频的相位生成载波调制解决方法研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(5): 933-938.  
LI Y, SU X X, LIU Y, et al. A PGC demodulation method based on the fundamental frequency mixing [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2012, 23 ( 5 ): 933-938.
- [ 16 ] 张爱玲, 王燕, 宫铭举, 等. 基于基频混频的相位生成载波解调方法研究与改进[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0206003-1-0206003-6.  
ZHANG A L, WANG Y, GONG M J, et al. An improved algorithm of PGC demodulation method based on fundamental frequency mixing [J]. Acta Photonic Sinica, 2014, 43(2): 0206003-1-0206003-6.
- [ 17 ] TONG Y W, ZENG H L, LI L Y, 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.
- [ 18 ] MUANENDA Y, FARALLI S, OTON C J, et al. Dynamic phase extraction in a modulated double-pulse  $\phi$ -OTDR sensor using a stable homodyne demodulation in

direct detection [J]. *Optic Express*, 2018, 26 ( 2 ): 687-701.

[19] FANG G S, XU T W, FENG S W, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015,33(13): 2811-2816.

[20] 原安娟,柴常. 基于迈克尔逊干涉原理的光纤传感器研究[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2008, 24(1):29-31.

YUAN AN J, CHAI CH. A study of optical fiber sensor based on the Michelson interference principle [J]. *Journal of Shanxi Datong University (Natural Science)*, 2008, 24(1): 29-31.

[21] 张媛. 光纤传感器信息处理系统的研究与设计[J]. *激光杂志*, 2017, 38(6):85-88.

ZHANG Y. Research and design of optical fiber sensor information processing system [J]. *Laser Journal*, 2017, 38(6): 85-88.

[22] ZHANG A, ZHANG S. High stability fiber-optic sensors with an improved PGC demodulation algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(21): 7681-7684.

[23] LI Y, LIU Z B, LIU Y, et al. Interferometric vibration sensor using phase-generated carrier method[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(25): 6359-6363.

作者简介



郑来芳, 2015 年于湖南大学获得硕士学位, 现为太原工业学院讲师, 主要研究方向为模式识别。

E-mail: syj\_zheng@126.com

**Zheng Laifang** received her M. Sc. degree in 2015 from Hunan University. Now she is lecturer at Taiyuan institute of technology. Her main research interest includes pattern recognition.



张俊生, 2012 年于中北大学获得硕士学位, 现为太原工业学院副教授, 主要研究方向为模式识别、图像处理。

E-mail: 45993095@qq.com

**Zhang Junsheng** received his M. Sc. degree in 2012 from North University of China. Now he is an associate professor at Taiyuan institute of technology. His main research interests include pattern recognition and image processing.