

doi:10.3788/gzxb20184708.0806004

相位生成载波解调方法的研究

孙韦,于淼,常天英,陈建冬,崔洪亮,庞铄

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院,长春 130012)

摘 要:为了获得更高的线性度和更强的抗干扰能力,提出一种改进的相位生成载波解调算法.利用滤去直流量的干涉信号及其与基频相混频的信号来进行运算,将两路信号倍频后的差分结果与其相乘后的微分结果相除来实现对被测信号的解调.该方法可有效消除光源扰动和直流分量对解调结果的影响.仿真结果验证了改进解调算法的可行性及优势,与传统算法相比获得了更高的线性度和更强的抗干扰能力,并打破了基频混频只适用于小信号的局限性.搭建实验系统进行验证,结果表明改进算法的频率解调准确率较高,且强度响应一致性较好.

关键词:光纤传感;相位解调;相位生成载波;直流分量;光源扰动

中图分类号:TP212

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0806004-8

Research and Improvement Based on PGC Demodulation Method

SUN Wei, YU Miao, CHANG Tian-ying, CHEN Jian-dong, CUI Hong-liang, PANG Shuo
(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to obtain higher linearity and stronger anti-interference ability, an improved phase generation carrier demodulation algorithm was proposed. By using the interference signal and the base frequency mixing signal to perform the operation, the difference between the two signal times and the two signals is differentiated and the demodulation of the detected signal is realized. The simulation results verify the feasibility and advantages of the improved demodulation algorithm, the stronger anti-interference ability and higher linearity are obtained comparing with the conventional demodulation method, and the limitations that the fundamental frequency mixer applies only to the limitations of small signal is eliminated; The experimental system is built to verify the high accuracy of frequency demodulation and the consistency of the intensity response.

Key words: Optical fiber sensing; Phase demodulation; Phase generation carrier; DC component; Light intensity disturbance

OCIS Codes: 060.2370; 150.1135; 120.7280; 060.2300; 200.3760

0 引言

光纤传感器技术始于 20 世纪 70 年代,它以其独特的优点如灵敏度高、测量动态范围大、物理尺寸小、耐腐蚀、抗电磁干扰等在石油化工、航空航天、地质勘探、海洋环境监测等领域得到广泛的应用.

在众多光纤干涉型传感器中,相位生成载波(Phase Generated Carrier,PGC)解调方法是最常见,应用最广泛的无源解调技术之一,PGC 解调方法通过在被测低频信号带宽之外的高频带上引入一个相位载波信号,将被测信号调制到载波信号的边带上,并使被测信号与低频扰动的频带分隔开,进一步解调出被测信号.

基金项目:海洋公益性行业科研专项(No.201405026-01)资助

第一作者:孙韦(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术及其应用.Email:sunwei1994live@163.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、太赫兹科学与技术、纳米光学和纳米电子学等. Email:hcu@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、太赫兹科学与技术等.Email:tchang@jlu.edu.cn

收稿日期:2018-02-26;录用日期:2018-04-28

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

PGC解调算法主要分为两种:微分交叉相乘法(Differential Cross Multiplication, DCM)和反正切法(Arctangent, Arctan).PGC解调方法由于其自身特点,在实际应用的过程中存在很多问题:解调结果受到环境的干扰带来解调相位的漂移,引入测量误差;伴生调幅造成解调结果的失真^[4];解调结果对调制深度的依赖度高.针对这些问题,各种改进的解调算法被学者们相继提出.张爱玲等提出了基频混频解调算法,通过引入直流滤波器滤除直流成分影响,但解调结果依旧受干涉信号幅度及调制深度影响^[9];中科院、清华大学等提出了多种有关PGC的改进的解调算法,对干涉式光纤传感器的实际应用具有推进意义^[11-12].本文提出了一种改进式相位生成载波解调算法,引入直流滤波器在对干涉信号的直流分量进行滤除的基础上,利用干涉信号及其与基频相混频所产生两路信号的倍频后的差分结果与两者相乘后的微分结果做比,以实现对被测信号的准确解调.对算法进行仿真分析与传统算法的PGC解调结果对比,并搭建了干涉型光纤振动系统,利用改进的算法对系统进行实验和测试.

1 PGC-DCM 调制解调方法

1.1 PGC 调制

PGC调制技术主要分内调制和外调制.内调制就是对光源进行直接调制并生成相位载波信号,光源一般选用半导体激光器,通过调制其驱动电流达到调制激光器辐射光波场频率的目的.外调制是利用干涉仪的一臂缠绕在压电陶瓷(PZT)上通过施加周期性的电压对光程差进行调制并生成相位载波信号.图1为Mach-Zehnder 光纤干涉型传感器结构.

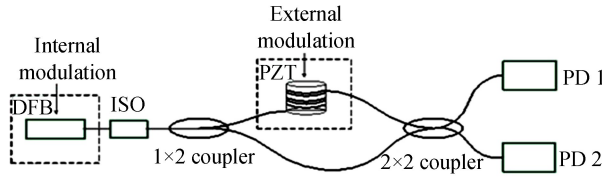


图1 Mach-Zehnder 光纤干涉型传感器结构

Fig.1 Structure of Mach Zehnder interferometric fiber optic sensor

1.2 DCM 解调

典型的DCM解调原理如图2所示.图中,⊗表示乘法器,LPF1、LPF2表示低通滤波器,d/dt表示微分器,INTEG表示积分器,HPF表示高通滤波器.

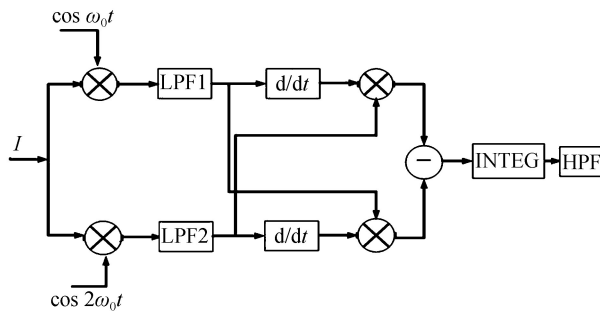


图2 典型DCM解调算法原理框图

Fig.2 Typical DCM demodulation flowchart

干涉信号经过光电检测后可表示为

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

式中, C 表示相位调制深度; A 表示直流分量、 B 表示干涉信号幅度, A 、 B 均为常量,与光源输出功率成正比关系, B 也与干涉仪的条纹对比度有关; $\cos (\omega_0 t)$ 表示高频载波信号; $\varphi(t)$ 表示待测信号,含有交流分量和直流分量信息可表示为

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

式中, ω_s 表示待测信号源的频率, D 表示幅值, $\varphi(t)$ 表示相位漂移量.利用三角函数形式对式(1)展开表示为

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

由于有如下关系

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

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

利用 Bessel 函数形式对式(1)展开表示为

$$I = A + [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos \varphi(t) - 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi(t) \quad (6)$$

式中, $J_k(C)$ 为 C 的 k 阶 Bessel 函数。

令角频率为 ω_0 、 $2\omega_0$ 的信号与干涉信号混频分别通过低通滤波器 LPF1、LPF2 表示为

$$I_1 = -BJ_1(C) \sin \varphi(t) \quad (7)$$

$$I_2 = -BJ_2(C) \cos \varphi(t) \quad (8)$$

将两路信号分别进行微分后表示为

$$\frac{dI_1}{dt} = -BJ_1(C) \varphi'(t) \cos \varphi(t) \quad (9)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = BJ_2(C) \varphi'(t) \sin \varphi(t) \quad (10)$$

对微分后的信号进行交叉相乘表示为

$$I_1 \times \frac{dI_2}{dt} = -B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) \sin^2[\varphi(t)] \quad (11)$$

$$I_2 \times \frac{dI_1}{dt} = B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi'(t) \cos^2[\varphi(t)] \quad (12)$$

将两路信号差分进行积分处理后表示为

$$I = B^2 J_1(C) J_2(C) \varphi(t) \quad (13)$$

由式(2)、(13)得到

$$I = B^2 J_1(C) J_2(C) [D \cos(\omega_s t) + \varphi(t)] \quad (14)$$

式(14)中包含了待测信号 $\cos(\omega_s t)$ 以及环境噪音等造成的相位漂移 $\varphi(t)$, 一般情况下 $\varphi(t)$ 是缓变信号, 通过高通滤波器 HPF 后输出信号表示为

$$I = B^2 J_1(C) J_2(C) \cos(\omega_s t) \quad (15)$$

最后的解调输出信号与待测信号成线性关系, 实现待测信号的解调。可看出结果中含有干涉信号幅度 B 和相位调制深度 C , B 与光源输出功率成正比关系, B 也与干涉仪的条纹对比度有关。因此, 针对已有解调算法得出来的解调结果含有干涉信号幅度 B 和相位调制深度 C , 极易受到光源扰动和由于相位调制深度 C 值的变化使解调结果产生非线性失真以及谐波失真等缺陷, 提出了改进的算法。

2 算法的研究与改进

改进的解调算法首先利用直流滤波器将干涉信号的直流分量滤除, 分成两路信号, 一路直接采用干涉信号, 一路与基频载波信号混频, 分别经过低通滤波器, 对两路信号经过倍频后差分结果与两路信号相乘后微分结果做比的计算方法来进行解调。一般利用干涉信号和基频混频信号来进行微分交叉相乘运算解调只适用于小信号的解调, 因为按照基频混频算法^[9]得到的输出信号表示为

$$S_{\text{out}} = ABJ_1(C) \sin \varphi(t) + B^2 J_0(C) J_1(C) \varphi(t) \quad (16)$$

从解调结果式(16)中来看, 直流分量 A 项上含有正弦项 $\sin \varphi(t)$, 只有当检测小信号时 $\sin \varphi(t) \approx \varphi(t)$, 才能实现对被测信号的解调。为了打破基频混频只适用于小信号检测的局限性, 在进行解调前加入直流滤波器, 把直流分量项滤除, 解调结果就可以不受直流量的影响。

图 3 为改进的解调算法流程图, 令干涉信号 I 通过直流滤波器(DC filter)滤除直流项后一路直接通过

低通滤波器 LPF1 的信号表示为

$$BJ_0(C)\cos\varphi(t) \tag{17}$$

另一路干涉信号 I 与 $\cos(\omega_0 t)$ 信号进行混频后通过低通滤波器 LPF2 后的信号表示为

$$-BJ_1(C)\sin\varphi(t) \tag{18}$$

将两路信号式(17)、(18)在①处相乘得

$$-\frac{1}{2}B^2J_0(C)J_1(C)\sin[2\varphi(t)] \tag{19}$$

对相乘后的干涉信号式(19)在②处进行微分处理后得

$$-B^2J_0(C)J_1(C)\cos[2\varphi(t)]\varphi'(t) \tag{20}$$

将式(17)信号在③处倍频得

$$\left(\frac{1}{2}\right)B^2J_0^2(C)\{1+\cos[2\varphi(t)]\} \tag{21}$$

将式(18)信号在④处倍频得

$$\left(\frac{1}{2}\right)B^2J_1^2(C)\{1-\cos[2\varphi(t)]\} \tag{22}$$

对两路倍频的信号式(22)和(23)进行差分处理后,在⑤处的干涉信号表示为

$$\frac{1}{2}B^2[J_1^2(C)-J_0^2(C)]+\frac{1}{2}B^2[J_1^2(C)+J_0^2(C)]\cos[2\varphi(t)] \tag{23}$$

图 4 是调制深度 C 约等于 1.44 时, $J_1(C)$ 与 $J_0(C)$ 的值相等($J_1(C)=J_0(C)$). 则式(23)可表示为

$$B^2J_1^2(C)\cos[2\varphi(t)] \tag{24}$$

将微分后的信号式(20)与差分后的信号式(23)在⑥处作除后积分可得

$$I=-\varphi(t) \tag{25}$$

另外, 调制深度 C 值如果和 1.44 偏离较大, 输出信号表示形式就变为

$$I'=-\frac{2J_0(C)J_1(C)\cos[2\varphi(t)]}{[J_1^2(C)-J_0^2(C)]+\{[J_1^2(C)+J_0^2(C)]\cos[2\varphi(t)]\}}\varphi'(t) \tag{26}$$

此时, 由于调制深度 C 的偏差使解调结果带有 $J_0(C)$, $J_1(C)$, $\cos[2\varphi(t)]$, $J_0(C)$, $J_1(C)$ 值波动较大, 且 $J_0(C)\neq J_1(C)$, 解调信号幅值就会产生变化, 解调结果产生非线性失真, 因此需要合理控制调制深度 C 值在 1.44 得到待测信号.

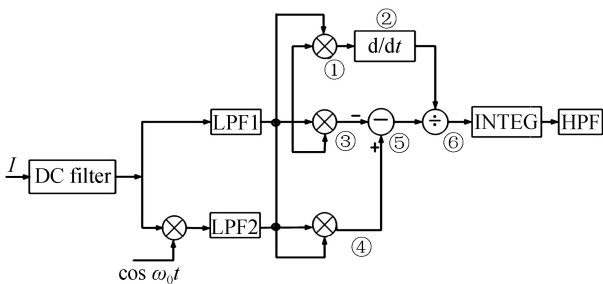


图 3 改进的解调算法

Fig.3 Improved demodulation algorithm

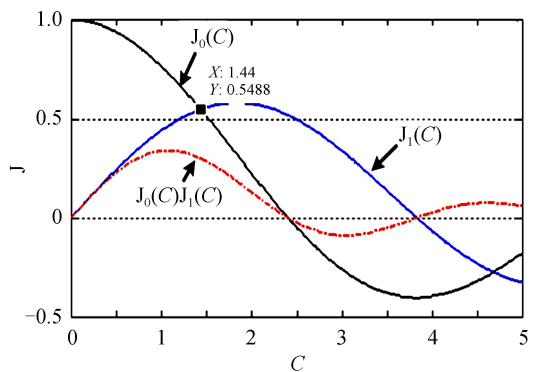


图 4 $J_0(C)$ 、 $J_1(C)$ 及其函数图象

Fig.4 $J_0(C)$ 、 $J_1(C)$ and its function graph

这种改进的解调算法, 首先引入直流滤波器(DC filter)将干涉信号的直流分量滤除, 然后利用干涉信号和基频混频信号两路信号进行运算: 对两路信号倍频后差分结果与两路信号相乘后微分结果进行相除来实现对待测信号的解调, 解调输出信号与待测信号成线性关系. 从这种改进算法得到的解调结果上来看, 与传统的 PGC-DCM 解调算法和已有的解调算法相比, 该算法去除了系数 B , 已知 B 受光源输出的干扰, 也与干涉仪的条纹对比度有关, 这样就消除了光源信号强度和不确定性对解调结果的影响, 获得了更高的线性度, 同时结果中不含与调制深度 C 有关的贝塞尔函数项, 在一定程度上, 减少了由于调制深度带来解调结果的

不稳定性.最后,还消除了直流分量对解调结果的影响,打破了基频混频只适用于小信号检测的局限性.

3 仿真分析与结果对比

利用 Matlab 软件进行仿真分析并进行结果对比,令待测信号的频率为 100 Hz,振幅 D 分别为 0.25(小信号),2.5(大信号),采样频率为 1 000 Hz;引入调制深度 A 为 1,频率为 2 Hz 的低频干扰信号;载波信号幅值为 1,频率为 400 Hz.图 5(a)、(b)为原始信号受到低频扰动信号波形,(c)为低频扰动信号波形.

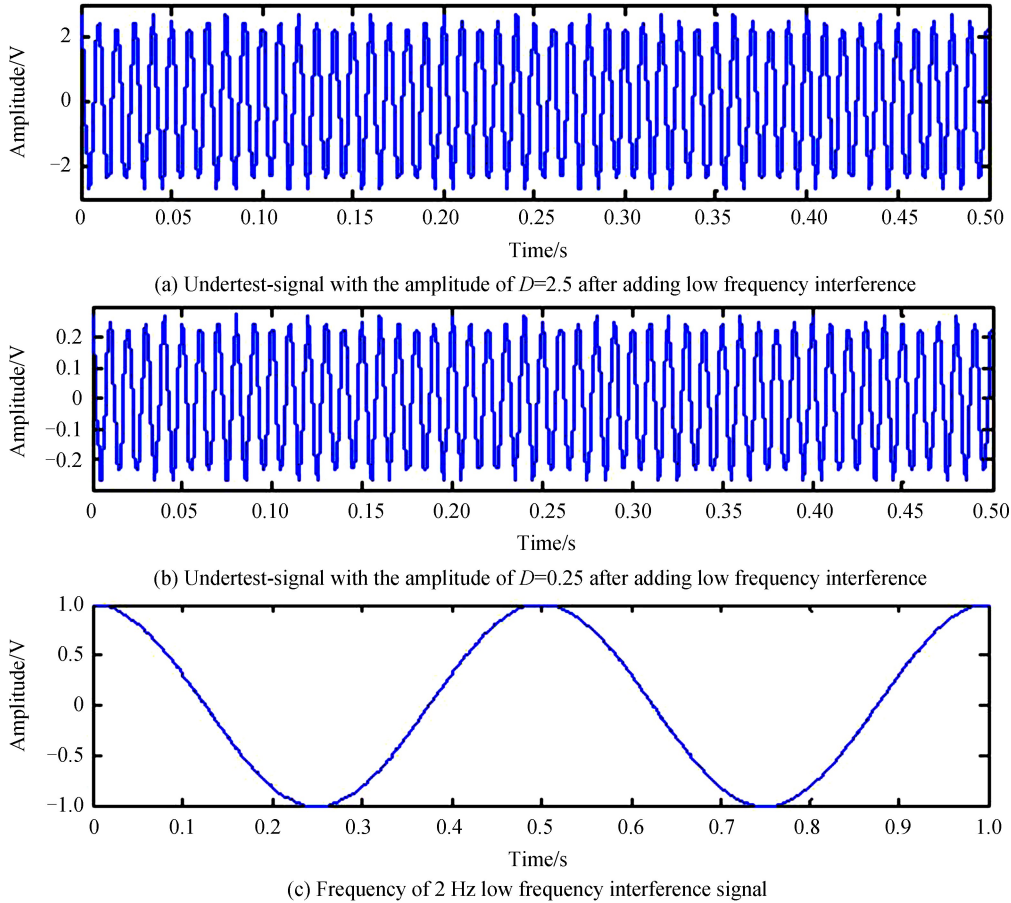
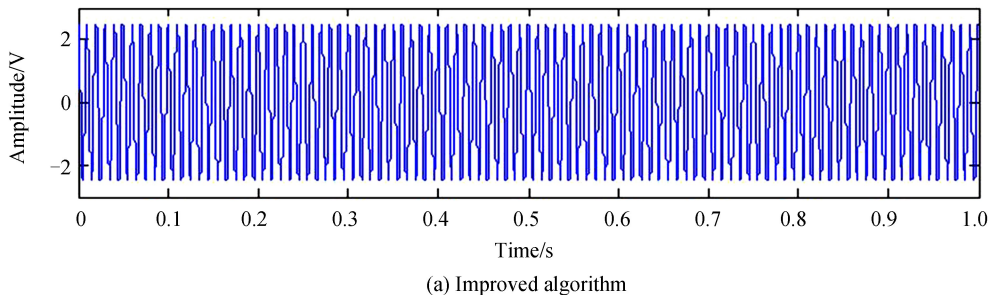
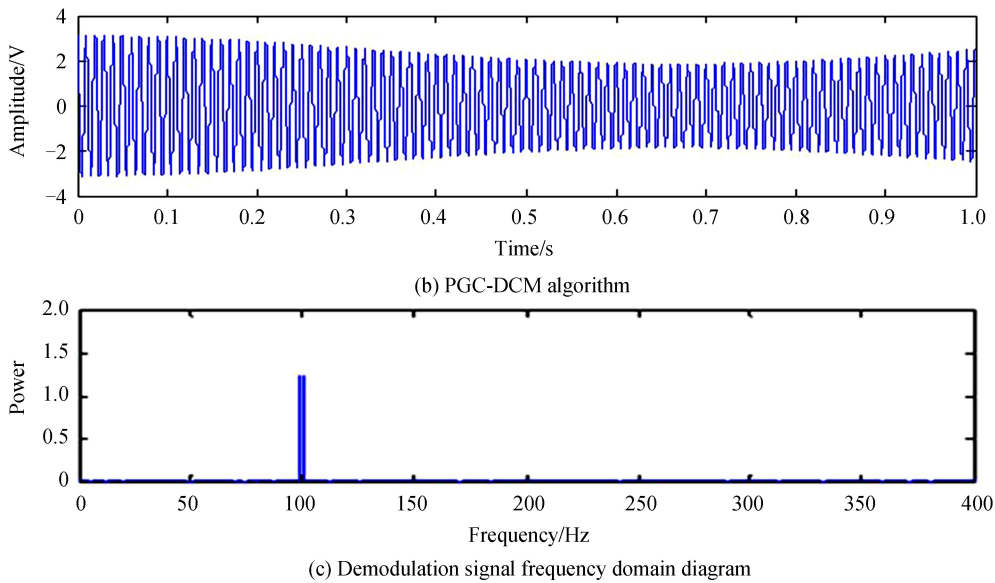
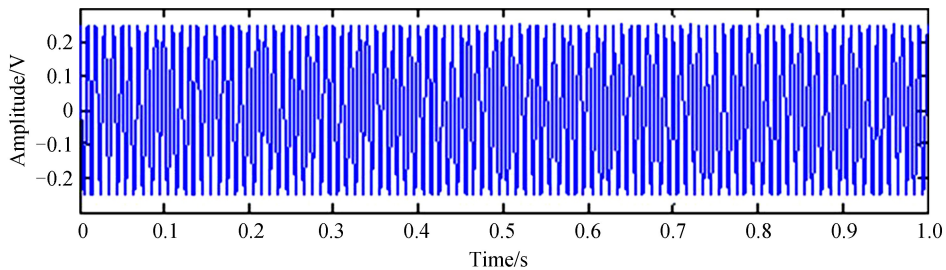


图 5 仿真所得待测信号波形图
Fig.5 Undertest-signal waveform diagram after simulated

图 6(a)和(b)分别为当待测信号为振幅 $D=2.5$ (大信号)时,改进的解调算法与传统的 PGC-DCM 解调算法的解调结果.通过两图的对比可知,传统的 PGC-DCM 解调结果由于受到外界的扰动等因素解调结果失真比较严重,而改进的解调算法获得的解调结果仅有较小程度的失真,强度响应一致性较好,获得了更强的抗干扰能力,验证了改进算法的可行性,实现了对待测大信号的准确解调.图 7 为采用改进的解调算法对待测小信号的解调结果,同样可以达到理想的解调结果.



图 6 $D=2.5$ 时的解调结果Fig.6 Demodulation results using different algorithms when $D=2.5$ 图 7 改进算法对幅值 $D=0.25$ 的待测信号的解调结果Fig.7 Demodulation results of the improved algorithm when $D=0.25$

4 实验

实验过程中,通过搭建干涉型光纤振动系统来验证改进的算法,完成对振动信号的测量.实验中所采用的基于 Mach-Zehnder 的振动调制解调系统如图 1 所示结构,选用窄线宽半导体激光器(DFB),具有较窄的线宽(1 MHz),较低的频率漂移(<1 MHz/min)在 1~100 kHz 的频率变化范围内相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN) <-140 dB/Hz,光源的线宽越窄、相干程度越长,干涉型光纤传感器的干涉效果越好,为系统获得较高的灵敏度和稳定的信号强度提供了保证.输出功率为 13 dBm,中心波长为 1 550 nm.半导体激光器发出的光经过光隔离器(ISO)后被 1:1 的 1×2 光纤耦合器(1×2 coupler)分成两束功率相等的干涉光进入传感光纤和参考光纤,构成了 Mach-Zehnder 干涉结构的两个干涉臂,两束干涉光进入 2×2 耦合器(2×2 coupler)发生干涉后分成两束,产生干涉信号经过光电转换后进入上位机解调系统.其中,光电探测器带宽为 50 MHz,波长响应范围为 1 310~1 650 nm,并且由分辨率为 16 bit、最大采样速率为 20 MS/s 的数据采集卡进行模数转换和数据采集,通过对数字信号的处理来获得振动信号相关信息.实验采用外调制方式,将信号臂缠绕在压电陶瓷(PZT)上,利用加载电压信号驱动压电陶瓷(PZT),为系统提供需要解调的待测信号.所采用的压电陶瓷(PZT)波长适用范围为 600~1 625 nm,光程偏移为 $0.2 \mu\text{m}/\text{Volt}$.通过利用改进的算法结构来探测振动信号(信号频率分别为 20 Hz, 100 Hz 获得的解调结果如图 8 所示),能够很好地解调出待测信号,频率解调准确率较高,相对误差分别为 0.23%、0.31%,强度响应一致性较好,正弦波拟合系数分别为 0.980 3、0.976 4.

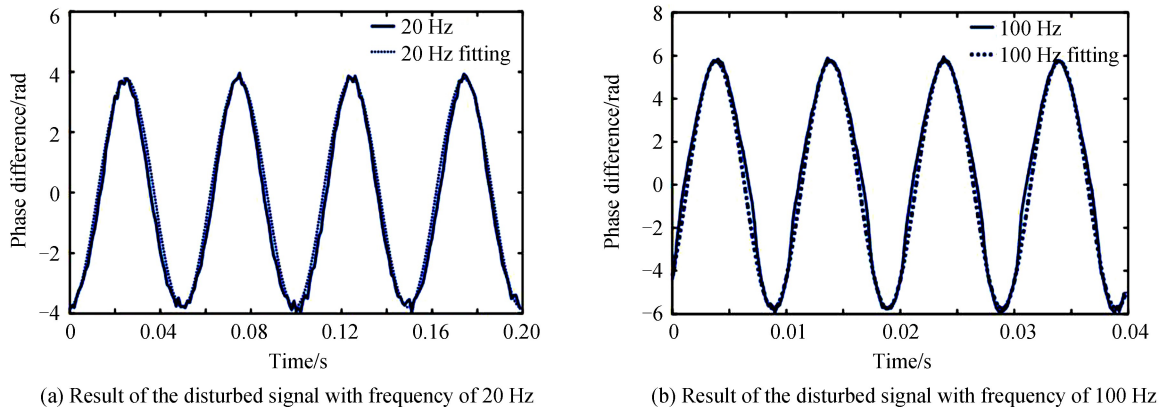


图8 改进算法实验解调及拟合结果

Fig.8 Experimental and simulated results of the improved algorithm

5 结论

本文提出了一种新的算法结构并进行推导分析得到解调结果.该算法首先利用滤除直流分量的干涉信号及其与基频相混频的信号通过低通滤波器进行运算,将两路信号分别倍频后的差分结果与其相乘后的微分结果做比来实现对待测信号的解调.从解调结果来看不含有系数 B ,消除了光源信号强度和不稳定性对解调结果的影响,同时不含有关于调制深度 C 有关的贝塞尔函数项,在一定程度上,减少了由于调制深度带来解调结果的不稳定性;避免了二倍混频信号的产生,在相同条件下,当待测信号为大信号时,通过两种算法的解调过程及其结果进行仿真对比分析并搭建干涉型光纤振动系统进行实验测试,利用改进的算法探测振动信号,结果验证了改进算法的可行性,可以很好地解调出待测信号,频率解调准确率较高,强度响应一致性较好.该改进算法消除了直流分量及光源扰动对解调结果的影响,获得了更强的抗干扰能力,与原有解调方法相比具有更高的线性度,打破了基频混频只适用于小信号检测的局限性.

参考文献

- [1] PETROVIC M, MIHAJLOVIC 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.
- [2] WANG Li-wei, LIU Yang, ZHANG Min, *et al.* Analysis and improvement of the phase generator carrier method in fiber interferometer sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 766-769.
王利威,刘阳,张敏,等.干涉型光纤传感器相位生成载波技术研究及改进[J].光子学报,2009, **38**(4): 766-769.
- [3] WANG Lin, HE Jun, LI Fang, *et al.* Ultra low frequency phase generated carrier demodulation technique for fiber sensors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(4): 1-7.
王林,何俊,李芳,等.用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调力法[J].中国激光,2011, **38**(4): 1-7.
- [4] SHI Qin-ping, WANG Li-wei, ZHANG Min, *et al.* Frequency-modulated phase generated carrier demodulation for eliminatin companion amplitude modulation[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(2): 180-184.
施清平,王利威,张敏,等.一种消除伴生调幅的光源调频型相位生成载波解调方法[J].光电子·激光,2011, **22**(2): 180-184.
- [5] LEE B H, KIM Y H, PARK K S, *et al.* Interferometric fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, **12**(3): 2467-2486.
- [6] LI Yang, SU Xiao-xing, LIU Yan, *et al.* A PGC demodulation method based on the fundamental frequency mixing [J]. *Journal of Optoelectronic • Laser*, 2012, **23**(5): 933-936.
李阳,苏晓星,刘艳,等.基于基频混频的相位生成载波调制解调方法研究[J].光电子·激光,2012, **23**(5): 933-936.
- [7] BO Lin-hou, LIAO Yan-biao, ZHANG Min, *et al.* The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1324-1327.
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.
- [8] HE Jun, XIAO Hao, FENG Lei, *et al.* Analysis of phase characteristics of fiber michelson interferometer based on a 3×3 coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1867-1873 .
何俊,肖浩,冯磊,等.基于 3×3 耦合器的迈克耳逊干涉仪相位特性分析[J].光学学报,2008, **28**(10): 1867-1873.
- [9] ZHANG Ai-ling, WANG Yan, GONG Ming-jv, *et al.* An improved algorithm of PGC demodulation method based on fundamental frequency mixing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0206003.
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.
- [10] 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.
- [11] KUANG Wu, ZHANG Min, LIAO Yan-biao, *et al.* Data acquisition method for digital phase generated carrier demodulation system of optical fiber interferometers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(8): 1086-1090.
匡武, 张敏, 廖延彪, 等. 光纤干涉仪数字相位生成载波解调系统数据采集单元设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1086-1090.
- [12] LI Shu-wang, SHAO Shi-yong, MEI Hai-ping, *et al.* Interference phase generated carrier demodulation algorithm based on synchronous carrier restoration method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(12): 1204004.
李树旺, 邵士勇, 梅海平, 等. 基于同步载波复原的干涉相位生成载波解调算法[J]. *中国激光*, 2016, **43**(12): 1204004.
- [13] ZENG Zhou-mo, LIU Fang, FENG Hao, *et al.* Digitalized demodulation based on 3×3 coupler for dual Mach-Zehnder fiber interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(6): 1410-1417.
增周末, 刘芳, 封皓, 等. 基于 3×3 耦合器的双马赫-曾德尔干涉仪数字化相位解调[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(6): 1410-1417.
- [14] LI Min, XIE Fang, CHEN Zhi-min. High stability fiber 3×3 fiber Coupler interferometric displacement measurement system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(2): 235-239.
李敏, 谢芳, 陈志敏. 高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉位移测量系统[J]. *光电子 · 激光*, 2010, **21**(2): 235-239.
- [15] MA Lin, LIU Yan, LI Yang, *et al.* Analysis of frequency drift effects in the phase-generated carrier method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 34-37.
马林, 刘艳, 李阳, 等. 载波频率漂移对相位生成载波解调结果的影响分析[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1): 34-37.

Foundation item: State Administration of Ocean Graphy of China(No.201405026-01)

引用格式: SUN Wei, YU Miao, CHANG Tian-ying, *et al.* Research and Improvement Based on PGC Demodulation Method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0806004

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): 0806004