

用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法

王 林 何 俊 李 芳 刘 育 梁

(中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

摘要 提出并实现了一种用于微弱极低频信号探测的干涉式光纤传感器相位生成载波(PGC)解调方法。对 PGC 解调方法中微分交叉相乘(DCM)及反正切(Arctangent)两种相位抽取算法应用于极低频信号解调进行了理论分析和算法仿真,其结果表明,DCM 式 PGC 算法解调极低频信号时,其结果中存在直流漂移,而 Arctangent 式 PGC 算法的解调结果中不存在直流漂移问题。进而基于光纤干涉仪搭建了极低频光纤传感系统,并进行了两种 PGC 解调算法的对比实验,实验结果表明,Arctangent 式 PGC 算法不存在 DCM 式 PGC 算法解调极低频信号时的直流漂移,且能够准确解调极低频信号,与理论分析的结论相符。最后采用 Arctangent 式 PGC 算法实现了极低频干涉式光纤传感系统,该系统达到的最低可探测信号频率为 0.01 Hz,最小可探测信号为 $4 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,动态范围为 110 dB @ 1 Hz,线性相关系数为 99.99 %。

关键词 光纤光学;光纤传感;光纤干涉仪;极低频;相位生成载波

中图分类号 TN253;TP212.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0405001

Ultra Low Frequency Phase Generated Carrier Demodulation Technique for Fiber Sensors

Wang Lin He Jun Li Fang Liu Yuliang

(*Optoelectronics System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract A high resolution ultra low frequency phase generated carrier (PGC) demodulation technique for interferometric fiber sensors is proposed. The differential cross multiplication(DCM) algorithm and the Arctangent algorithm of PGC technique are analyzed theoretically and simulated by computer for ultra low frequency demodulation. And the results show that an unnecessary random direct current (DC) drift is induced in the recovered signal of DCM-PGC, but it doesn't exist in that of Arctangent-PGC. To demonstrate the conclusion, an optical fiber interferometer-based ultra low frequency sensing system is set up, and the comparable experiments of DCM-PGC and Arctangent-PGC are carried out. The experimental results show that only Arctangent-PGC can be used for ultra low frequency demodulation, for it avoids the problem of DC drift as DCM-PGC. At last the ultra low frequency demodulation system is achieved by Arctangent-PGC, and the testing results show that the system has the lowest frequency of 0.01 Hz, a minimum detectable phase shift of $4 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$, a dynamic range of 110 dB @ 1 Hz and a linearity of 99.99 %.

Key words fiber optics; optical fiber sensing; fiber interferometer; ultra low frequency; phase generated carrier

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 100.3175

收稿日期: 2010-09-13; **收到修改稿日期**: 2010-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(61077059,41074128)、国家 863 计划(2009AA11Z212)和中国科学院青年人才领域前沿项目(ISCAS2008T05)资助课题。

作者简介: 王 林(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感信号解调技术、数字信号处理等方面的研究。

E-mail: wlcas@semi.ac.cn

导师简介: 刘育梁(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事光纤传感网络的关键技术及其工业应用和用于智能光网络的集成光学器件等方面的研究。E-mail: ylliu@semi.ac.cn

1 引言

极低频信号(0~20 Hz)广泛存在于自然界和人类生活环境之中。地震、海啸、火山爆发等自然现象,以及核爆炸、轮船航行、高楼和大桥摇晃等人类活动都会产生丰富的极低频信号。利用传感器对极低频信号进行探测,在诸如地震预测、海啸预警、水下低频声纳、次声监测等民用、军用领域都有着广阔的应用前景。相比传统的电学传感器,光纤传感器具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、易于组网等优点。其中干涉式光纤传感器具有极高的灵敏度和良好的动态响应特性,应用于极低频信号解调时可以实现较高分辨率和较大动态范围的探测,因此引起了广泛的研究兴趣。M. Zumberge 等报道了一种基于迈克耳孙干涉仪的光纤地震仪,探测频率范围为 0.0001~15 Hz,位移测试精度达到 5×10^{-13} m^[1]。2007年,N. Beverini 等^[2]利用光纤激光器作为传感元件,利用非平衡马赫-曾德尔干涉仪进行解调,实现了探测频率从 0.05 Hz 到数十赫兹、分辨率达 $150 \text{ p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 的极低频传感系统。同年,Lam 等^[3]采用射频锁模技术降低激光光源噪声,实现了极低频应变信号传感系统,其探测频率从 1 Hz 到数百赫兹,探测分辨率达到 $2 \text{ p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ Hz}$ 。2010年,叶欣等^[4]基于参考干涉仪和相位生成载波(PGC)解调技术实现了最低探测频率为 1 Hz 的低频信号传感系统。从国内外的研究进展可以看出,干涉式光纤传感技术是实现微弱极低频信号探测的一种可行方案。

干涉式光纤传感技术有着多种信号检测方案^[5,6],其中 PGC 解调技术具有结构简单、灵敏度高、动态范围大等优点,广泛应用于干涉式光纤传感器的相位解调。PGC 技术实现相位检测的常用方法包括微分交叉相乘(DCM)相位抽取算法及反正切(Arctangent)相位抽取算法。当 PGC 技术应用于极低频信号解调时,由于环境噪声、温度漂移等外界干扰与待测的极低频信号位于同一频段,无法通过滤波分离,所以 PGC 技术相位抽取算法中不能包含高通滤波过程。因此,对于 DCM 式 PGC 算法,其积分过程所产生的直流项将难以通过高通滤波器滤除,从而在解调结果中引入了直流漂移,而 Arctangent 式 PGC 算法不存在直流漂移问题,因此有望实现对极低频信号的准确解调。目前,对 DCM 式和 Arctangent 式两种 PGC 算法应用于极低频信号解调的相关研究尚未见诸报道。

因此,本文深入研究了用于极低频信号探测的干涉式光纤传感器 PGC 解调方法,对极低频 PGC 解调方法中的 DCM 式和 Arctangent 式两种相位抽取算法进行了详细的理论分析和对比仿真,并在此基础上进行了两种算法解调极低频信号的对比实验。最后利用 Arctangent 式 PGC 算法实现了极低频干涉式光纤传感系统,并对系统性能进行了实验测试。

2 理论分析

当极低频待测信号作用于光纤干涉仪的信号臂时,将引起光纤中传输光波的相位发生变化,而参考臂不受待测信号作用,因此干涉仪两臂的相位差将随待测信号而改变。令 φ_s 为极低频信号引起的干涉仪两臂的相位差,则光纤干涉仪输出的干涉信号可以表示为

$$I = A + B\cos(\varphi_s + \phi_0), \quad (1)$$

式中 $A = I_0$, 为干涉仪入射光强, $B = I_0 k$, k 为干涉条纹可见度,满足 $k < 1$, ϕ_0 表示干涉仪的初始相位差。

在 PGC 解调技术中,通过在干涉仪的一臂上进行相位调制,或者对光源进行频率调制,从而在干涉信号中引入一个远离待测信号频带的高频大幅度相位载波调制,使得干涉仪的相位工作点在一定范围内快速变化,以克服相位工作点衰落^[7,8]。光纤干涉仪输出的 PGC 干涉信号可以表示为

$$I = A + B\cos[\varphi_s + \phi_0 + C\cos(\omega_0 t)], \quad (2)$$

式中 C 为相位调制深度, ω_0 为 PGC 调制载波角频率。PGC 技术通过相位抽取算法来还原待测的极低频信号,常用的相位抽取算法包括 DCM 算法和 Arctangent 算法。当两种算法应用于极低频信号解调时,除待测信号之外,外界环境噪声、温度漂移等物理量同样处于极低频段,同时作用于传感系统,和待测信号混叠,无法通过高通滤波器滤除其干扰,因此用于极低频信号解调的相位抽取算法不能包含对解调结果的高通滤波过程^[9,10]。由以上讨论可知,DCM 式 PGC 算法与 Arctangent 式 PGC 算法应用于极低频信号解调时,其算法流程如图 1 所示。

2.1 DCM 式 PGC 算法解调极低频信号

由于待测信号均可通过傅里叶变换展开为具有不同频率和不同初始相位的余弦函数的叠加,因此在分析用于极低频信号解调的 PGC 算法时,可先假设待测信号为单频余弦信号,其一般表达式为

$$\varphi_s(t) = A_s \cos(\omega_s t + \phi_s), \quad (3)$$

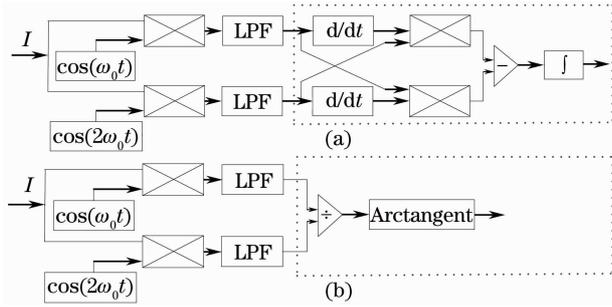


图1 极低频 PGC 解调算法原理示意图。(a)DCM 式 PGC 算法流程,(b)Arctangent 式 PGC 算法流程

Fig.1 Schematic algorithm of ultra low frequency PGC demodulation technique. (a) algorithm of DCM, (b) algorithm of Arctangent

式中 A_s 为信号振幅, ϕ_s 为信号初始相位。

对于 DCM 式 PGC 算法,将(3)式代入(2)式,分别与载波 $\cos(\omega_0 t)$ 及其倍频项 $\cos(2\omega_0 t)$ 混频后再低通滤波,考虑到低通滤波器对输入信号产生相位延迟 ϕ_f ,滤波后两路信号分别为

$$S_{1D} = -BJ_1(C) \sin \varphi_s(t) - BJ_1(C) \sin[A_s \cos(\omega_s t + \phi_s + \phi_f)], \quad (4)$$

$$S_{2D} = -BJ_2(C) \cos \varphi_s(t) - BJ_2(C) \cos[A_s \cos(\omega_s t + \phi_s + \phi_f)], \quad (5)$$

式中 $J_1(C)$, $J_2(C)$ 分别为第一类 1 阶, 2 阶贝塞尔函数。对(4),(5)式进行微分交叉相乘,得到的两路结果相减可有

$$L_D = -B^2 J_1(C) J_2(C) A_s \omega_s \sin(\omega_s t + \phi_s + \phi_f), \quad (6)$$

对(6)式积分可得

$$S_{DCM} = - \int_0^t B^2 J_1(C) J_2(C) A_s \omega_s \sin(\omega_s t + \phi_s + \phi_f) dt = B^2 J_1(C) J_2(C) A_s \cos(\omega_s t + \phi_s + \phi_f) - B^2 J_1(C) J_2(C) A_s \cos(\phi_s + \phi_f), \quad (7)$$

式中第一项为还原的待测信号,相对输入信号有 ϕ_f 的相位延迟,第二项为与待测信号初始相位和滤波器相位延迟相关的直流项。由于算法中积分运算之后不再包含高通滤波过程,直流项将无法消除,因而在解调结果中引入了直流漂移。由(7)式可知,直流项产生于算法中的积分过程,其大小决定于信号初始相位 ϕ_s 值和滤波器产生的相位延迟 ϕ_f 值。

首先考虑待测信号的初始相位对直流项的影响。信号的初始相位是由解调系统开始采集时信号的瞬时相位所决定的,与信号的产生、传输、接收等诸多因素相关,在实际测量过程中是不可控制的,具有一定的随机性,从而引起解调结果中的直流漂移

随机变化。

其次考虑滤波器的相位延迟对直流项的影响。PGC 算法中通常采用具有线性相位的有限长冲激响应(FIR)滤波器,以保证低通滤波不会对输入信号产生相位失真。对于频率为 f_s 的待测信号, FIR 低通滤波器引入的相位延迟为^[11]

$$\phi_f = 2\pi f_s \frac{N-1}{2f}, \quad (8)$$

式中 f 为系统采样频率, N 为低通滤波器的阶数。由(8)式,在系统采样频率不变的情况下, ϕ_f 值将决定于待测信号频率和滤波器阶数。在实际测量过程中,待测信号通常包含有不同的频率分量,在低通滤波后将产生不同的相位延迟,进而经过积分运算后各分量将具有不同大小的直流项,最终导致无法准确地还原待测信号。

综上所述,由于 DCM 式 PGC 算法中存在积分过程,其积分下限值由待测信号的初始相位 ϕ_s 值和滤波器相位延迟 ϕ_f 值决定,从而在解调结果中引入了随机变化的直流漂移,因此利用 DCM 式 PGC 解调算法无法实现对极低频信号的准确解调。

2.2 Arctangent 式 PGC 算法解调极低频信号

对于 Arctangent 式 PGC 算法,待测信号经过混频与低通滤波后可表示为^[12]

$$S_{1A} = -BJ_1(C) \sin[A_s \cos(\omega_s t + \phi_s + \phi_f)], \quad (9)$$

$$S_{2A} = -BJ_2(C) \cos[A_s \cos(\omega_s t + \phi_s + \phi_f)], \quad (10)$$

将(9),(10)式直接相除,可得

$$L_A = \frac{J_1(C)}{J_2(C)} \tan[A_s \cos(\omega_s t + \phi_s + \phi_f)]. \quad (11)$$

然后对(11)式求反正切,选取相位调制深度 $C=2.63$ rad,使 $J_1(C)=J_2(C)$,可得

$$S_{Arc} = \arctan L_A = A_s \cos(\omega_s t + \phi_s + \phi_f). \quad (12)$$

对比(3)式和(12)式可以看出,由于 Arctangent 式 PGC 算法中没有积分运算,其解调结果相对原始待测信号只存在相位延迟而没有直流漂移。因此,利用 Arctangent 式 PGC 算法能够实现对极低频信号的准确解调。

3 PGC 解调算法对比仿真

利用 LabVIEW 虚拟仪器平台,对 DCM 式和 Arctangent 式两种 PGC 算法解调极低频信号进行了仿真。对比仿真了在不同参量下,两种解调算法对同一极低频信号的解调结果。由于待测信号位于 20 Hz 以下的极低频段,因此在仿真中设置 PGC 调制载波频率为 100 Hz,相位调制深度 $C=2.63$ rad,采样速率

为1 ks/s,数据处理帧长为100 ks。

3.1 信号初始相位对解调结果的影响

在仿真中,令待测信号为极低频单频余弦信号 $\varphi_s(t) = A_s \cos(2\pi f_s t + \phi_s)$, 取 $A_s = 0.1$, $f_s = 0.05$ Hz, 分别利用 DCM 式 PGC 算法和 Arc tangent 式 PGC 算法对待测信号进行解调。首

先考虑待测信号的初始相位对两种算法解调结果的影响。在保证滤波性能要求的前提下,选取较低的低通滤波器阶数($N=501$),由(8)式可知其对待测信号引入的相位延迟仅为 $\phi_t = \pi/40$,可以忽略。分别选取待测信号初始相位值 $\phi_s = 0, \pi/6, \pi/3$, 仿真结果如图 2 所示。

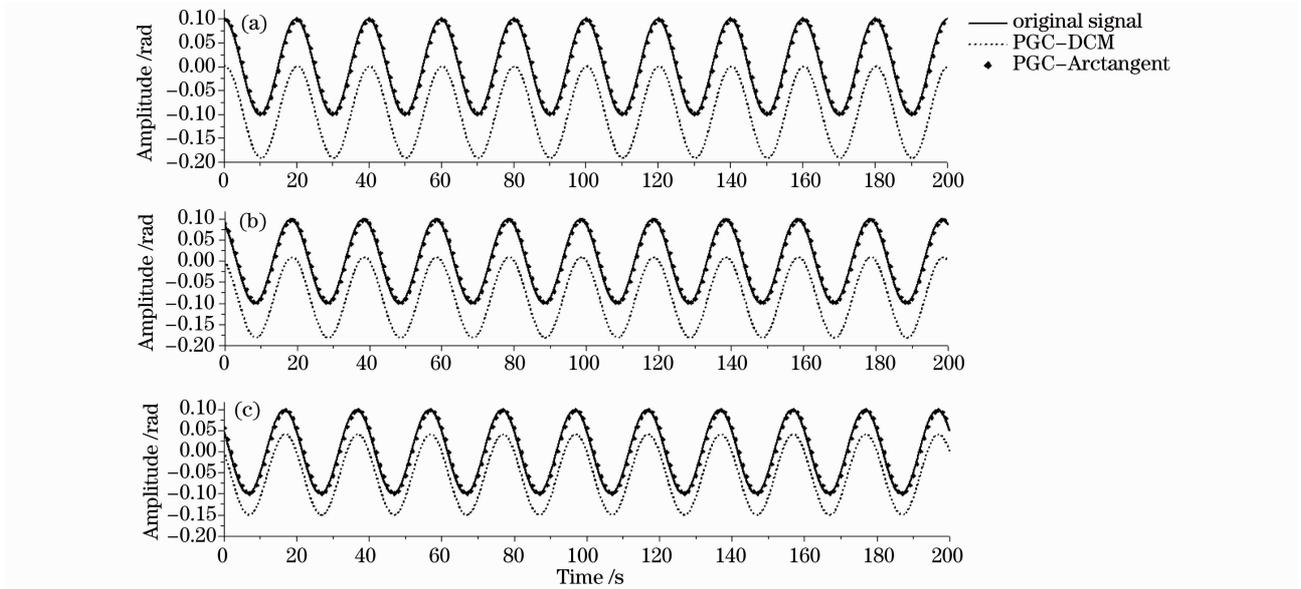


图 2 (a) $\phi_s = 0$, (b) $\phi_s = \pi/6$, (c) $\phi_s = \pi/3$ 时的仿真结果

Fig. 2 Simulation results when (a) $\phi_s = 0$, (b) $\phi_s = \pi/6$, (c) $\phi_s = \pi/3$

将上述仿真参数分别代入(7)和(12)式,通过计算可以得到 DCM 式和 Arc tangent 式两种 PGC 算法解调结果中直流漂移的理论分析结果,其值与仿真结果的对比如表 1 所示。比较理论计算结果和仿真结果,可知仿真中待测信号的初始相位对直流项的影响与理论分析相吻合。

表 1 信号初始相位引起的直流项漂移理论与仿真结果

Table 1 Theoretical and simulation results of drifts induced by initial phases of the signal

Initial phase	DCM-theoretic	DCM-simulation	Arc-theoretic	Arc-simulation
0	-0.1000	-0.099	0	0
$\pi/6$	-0.0866	-0.086	0	0
$\pi/3$	-0.0500	-0.050	0	0

3.2 滤波器相位延迟对解调结果的影响

系统低通滤波器采用具有线性相位的 FIR 滤波器,滤波频率上限为 50 Hz。保持待测信号 $A_s = 0.1$, $f_s = 0.05$ Hz 不变,更改滤波器设置,分别选取不同滤波器阶数 $N = 2001, 3334, 5001$,由(8)式可知,滤波器引入的相位延迟分别为 $\phi_t = \pi/10, \pi/6,$

$\pi/4$, 仿真结果如图 3 所示。

同样将上述仿真参数代入(7),(12)式,理论计算的直流项大小与仿真结果的对比如表 2 所示。比较理论计算结果和仿真结果,可知仿真中滤波器的阶数大小对直流项的影响与理论分析相吻合。

表 2 滤波器引起的直流项漂移理论与仿真结果

Table 2 Theoretical and simulation results of drifts induced by the filters with different N

N	DCM-theoretic	DCM-simulation	Arc-theoretic	Arc-simulation
2001	-0.0950	-0.095	0	0
3334	-0.0866	-0.087	0	0
5001	-0.0707	-0.070	0	0

保持 FIR 滤波器阶数 $N=2001$ 不变,更改输入信号频率,分别选取信号频率 $f_s = 0.05, 0.12, 0.25$ Hz,可得滤波器引入的相位延迟分别为 $\phi_t = \pi/10, 6\pi/25, \pi/2$, 仿真结果如图 4 所示,理论计算的直流项大小与仿真结果对比如表 3 所示。比较理论计算结果和仿真结果,可知仿真中待测信号频率改变对直流项的影响与理论分析相吻合。

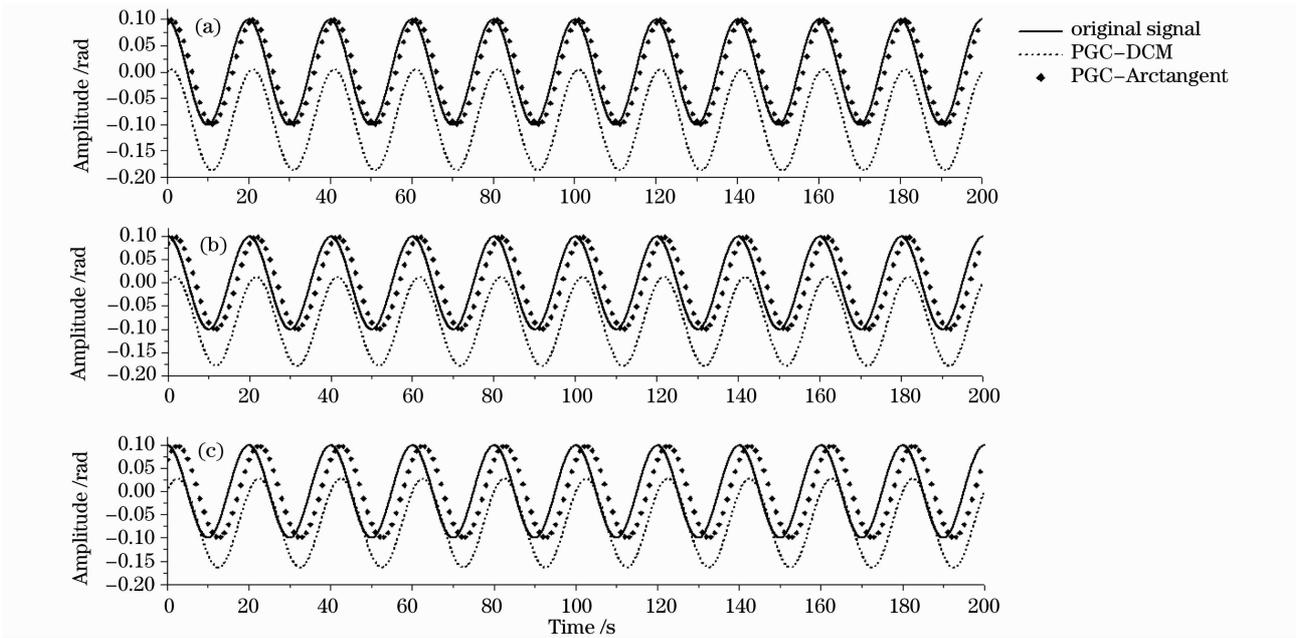


图 3 (a) $N=2001$, (b) $N=3334$, (c) $N=5001$ 时的仿真结果

Fig. 3 Simulation results when (a) $N=2001$, (b) $N=3334$, (c) $N=5001$

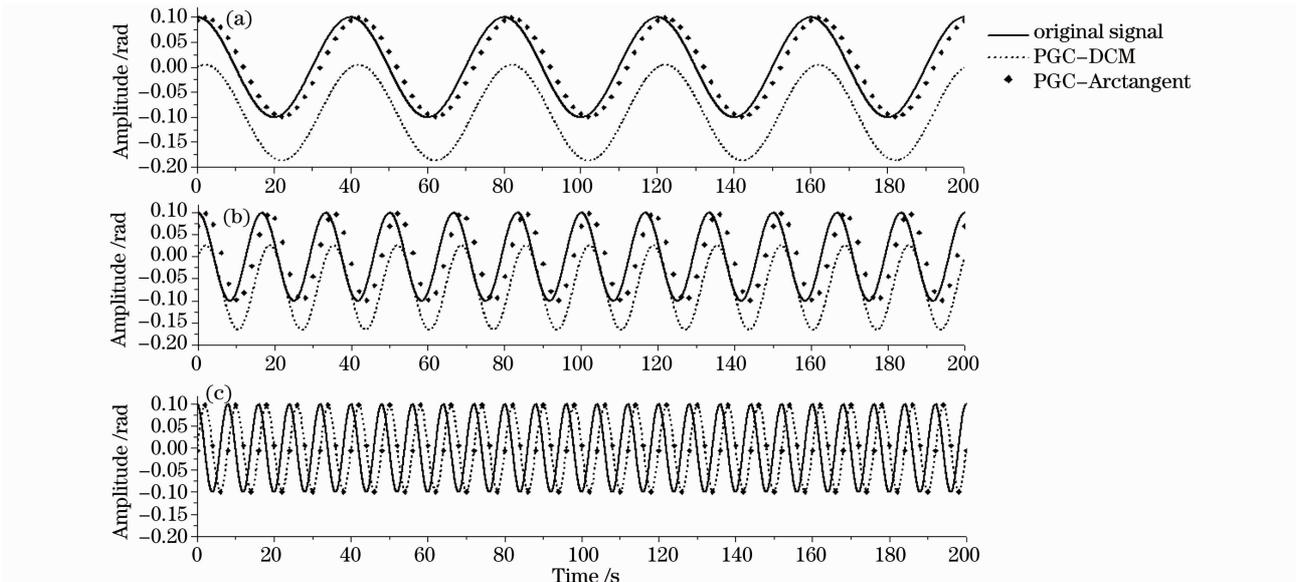


图 4 (a) $f_s=0.05$ Hz, (b) $f_s=0.12$ Hz, (c) $f_s=0.25$ Hz 时的仿真结果

Fig. 4 Simulation results when (a) $f_s=0.05$ Hz, (b) $f_s=0.12$ Hz, (c) $f_s=0.25$ Hz

表 3 滤波器引起的直流项漂移理论与仿真结果

Table 3 Theoretical and simulation results of drifts induced by the filter for different frequencies

Signal frequency /Hz	DCM-theoretic	DCM-simulation	Arc-theoretic	Arc-Simulation
0.05	-0.95	-0.95	0	0
0.12	-0.73	-0.73	0	0
0.25	0	0	0	0

4 实 验

为了实现对极低频信号的探测并验证上述极低

频 PGC 解调算法, 搭建了如图 5 所示的极低频干涉式光纤传感系统。系统采用中心波长为 1550 nm 的分布反馈式光纤激光器(DFB FL)作为光源, 激光经由 3 dB 耦合器进入臂长差为 5 mm 的非平衡迈克耳孙干涉仪(自行研制), 干涉仪经隔声隔振封装以消除环境中极低频噪声对解调结果的干扰。在干涉仪两臂末端使用法拉第旋转反射镜(FRM)以消除由于入射光偏振态变化造成的干涉信号幅度衰落。干涉仪经 PGC 调制后的输出信号由光电探测器(InGaAs ϕ 75 μ m PIN, 重庆航伟光电)转换为电压

信号,再经 16 bit 数据采集卡(9215,美国国家仪器)转换为数字信号后输入计算机完成 PGC 解调算法,最终还原待测信号。该系统的 PGC 调制载波频率为 100 Hz,相位调制深度 $C=2.63$ rad,采样速率为 1 ks/s,数据处理帧长为 100 ks,各项参数与仿真中参数保持一致。

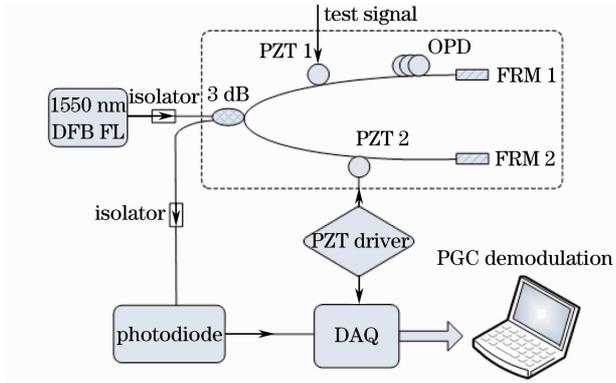


图 5 极低频干涉式光纤传感系统示意图

Fig. 5 Schematic of ultra low frequency interferometric fiber sensing system

为验证上述理论分析及仿真结果的正确性,将干涉仪信号臂光纤缠绕在压电陶瓷(PZT)管上,利用信号发生器产生极低频电压信号驱动压电陶瓷管,从而产生待测的极低频相位信号,信号频率为 0.01 Hz,其初始相位在 $\pi/2$ 与 $\pi/4$ 二值之间跳变。在 PGC 算法中,选取 FIR 低通滤波器阶数为 2001。实验中 DCM 式 PGC 算法和 Arctangent 式 PGC 算法对同一信号的解调结果如图 6 所示。待测信号初始相位为 $\pi/2$ 时,DCM 式 PGC 算法解调结果中的直流项为 0,当信号初始相位跳变到 $\pi/4$ 时,其直流项随之发生了一 0.35 的漂移,表明其直流项大小取决于信号的初始相位,与之前理论分析结果相符。在该实验中,DCM 式 PGC 算法的解调结果未能反

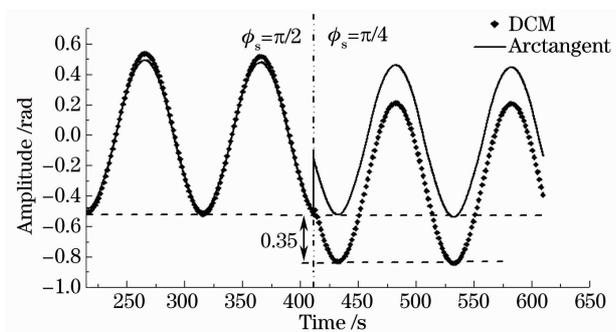


图 6 DCM 式 PGC 算法与 Arctangent 式 PGC 算法实验解调结果

Fig. 6 Experimental results of DCM-PGC algorithm and Arctangent-PGC algorithm

映出相位跳变,且未能准确地解调出待测极低频信号。而对于 Arctangent 式 PGC 算法,在不同的初始相位条件下,解调结果均没有产生直流漂移,波形真实地反映了待测信号的相位跳变,表明其能够实现对极低频信号的准确解调。

为实现对微弱极低频信号的探测,利用 Arctangent 式 PGC 算法实现了极低频干涉式光纤传感系统,并对该系统的性能进行了测试。系统已实现的最低可探测的信号频率为 0.01 Hz,其解调结果如图 6 所示。系统最小可探测信号为 4×10^{-4} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$,其动态范围如图 7 所示,达到 110 dB @ 1 Hz,在 0.1 Hz 时系统的线性相关系数如图 8 所示,达到了 99.99 %。

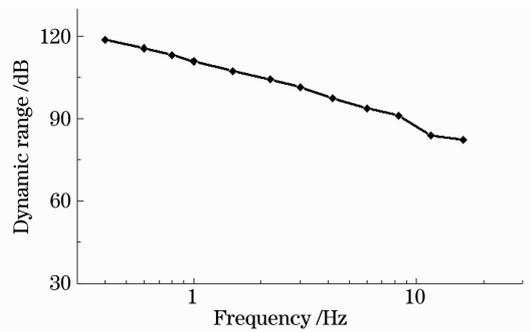


图 7 系统动态范围

Fig. 7 Dynamic range of the system

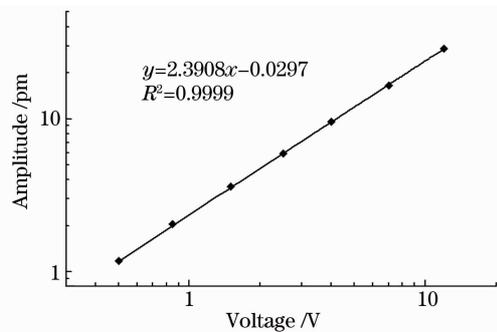


图 8 0.1 Hz 时解调结果的线性拟合

Fig. 8 Linearity at the frequency of 0.1 Hz

5 结 论

提出并实现了一种用于微弱极低频信号探测的干涉式光纤传感 PGC 解调方法。从理论上分析了应用于极低频信号解调的 DCM 式和 Arctangent 式两种 PGC 算法,利用 LabVIEW 软件进行了算法仿真,最后搭建了极低频干涉式光纤传感系统,并进行了两种算法解调极低频信号的对比实验,理论和实验结果表明 Arctangent 式 PGC 算法不存在 DCM 式 PGC 算法所具有的直流漂移问题,能够实现对极低频信号的准确解调。利用 Arctangent 式 PGC 算

法实现了极低频光纤传感系统,并对该系统进行了实验测试,测试结果表明,系统最低可探测信号频率为 0.01 Hz,最小可探测信号为 $4 \times 10^{-4} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,动态范围达到 110 dB @ 1 Hz,线性相关系数达到 99.99 %。这种极低频干涉式光纤传感系统有望在地震预测、水下低频声纳及次声监测等领域发挥重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Liu Yuliang, He Jun, Wang Yongjie *et al.*. Progress of seismic wave detection by fiber-optic sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 21~28
刘育梁, 何 俊, 王永杰 等. 光纤地震波探测的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 21~28
- 2 N. Beverini, E. Maccioni, M. Morganti *et al.*. Fiber laser strain sensor device[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**(10): 958~962
- 3 Timothy T-Y. Lam, Jong H. Chow, Conor M. Mow-Lowry *et al.*. A stabilized fiber laser for high-resolution low-frequency strain sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**(8): 983~986
- 4 Ye Xin, Luo Hong, Hu Yongming. Low-frequency signal detection technique of fiber-optic interferometric sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(5): 845~848
叶 欣, 罗 洪, 胡永明. 干涉型光纤传感器低频信号检测技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(5): 845~848
- 5 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. A J_0 - J_1 method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric fiber sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 105~108
王泽锋, 罗 洪, 熊水东 等. 一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 J_0 - J_1 法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 105~108
- 6 Ni Ming, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Dynamic range of fiber-optic hydrophone using digitized phase generated carrier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(2): 33~37
倪 明, 胡永明, 孟 洲 等. 数字化 PGC 解调光纤水听器的动态范围[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(2): 33~37
- 7 Wang Zefeng, Hu Yongming. A passive method for resolving phase shifting of interferometric fiber-optic sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1417~1421
王泽锋, 胡永明. 干涉型光纤传感器相位漂移的无源解决方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1417~1421
- 8 Zhao Zheming, Wu Pinghui, Sui Chenghua. A novel microfiber sensor based on white light interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2001~2004
赵浙明, 吴平辉, 隋成华. 基于白光干涉的新型微纳光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2001~2004
- 9 Wang Liwei, 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与改进[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 766~769
- 10 Kuang Wu, Zhang Min, Yanbiao Liao. Signal dependence of the phase-generated carrier method [J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(10): 1~5
- 11 Wang Yan, He Jun, Li Fang *et al.*. Research on phase consistency of fiber laser sensor array system based on phase generated carrier demodulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1542~1546
王 延, 何 俊, 李 芳 等. 基于相位载波解调法的多通道光纤激光传感系统相位一致性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1542~1546
- 12 Liwei Wang, Min Zhang, Xianhui Mao *et al.*. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors[C]. *SPIE*, 2006, **6292**: 62921E