

# 光强扰动对干涉型光纤传感器外差解调的影响

蒋 鹏 张 楠 熊水东 倪 明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 阐述了干涉型光纤传感器外差解调的基本原理,研究了光强扰动对外差-微分交叉相乘(DCM)及外差-反正切(Arctangent)解调方法的影响,进行了理论分析和数值模拟。理论分析表明,外差-DCM解调方法与外差-Arctangent方法都可以有效抑制光强扰动。但是对于较大幅度的光强扰动,由于受限于低通滤波器的性能,这两种解调方法并不能完全消除噪声。同时,相比于传统的相位载波(PGC)-Arctangent方法,外差-Arctangent方法不用考虑相位调制深度  $C$  值漂移的影响,在光强扰动抑制方面具有更大的优势。数值模拟验证了理论分析的正确性。搭建了外差实验系统并进行了实验分析,实验结果表明,外差-Arctangent算法与外差-DCM方法均能抑制包括光强扰动在内的系统噪声。

**关键词** 光纤光学;光纤传感;外差;光强扰动

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s106004

## Impact of Optical Intensity Perturbation on Heterodyne Demodulation Scheme

Jiang Peng Zhang Nan Xiong Shuidong Ni Ming

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The basic principle of heterodyne demodulation of fiber interferometer is introduced. The influence of optical intensity perturbation on heterodyne demodulation based on differential cross-multiply (DCM) and arctangent is researched. Theoretical analysis and numerical simulation are adopted. Theoretical analysis demonstrates that both algorithms can restrain the influence of optical intensity perturbation effectively. But the impact of higher perturbation cannot be eliminated totally, which is limited by the design of lowpass filter. Meanwhile, compared with the traditional phase generated carrier (PGC) demodulation based on arctangent, heterodyne demodulation based on arctangent has an extra advantage in eliminating the influence of the modulation depth  $C$ . Numerical simulation matches well with theoretical analysis. Experimental architecture based on heterodyne detection is constructed and demodulation experiment is implemented. The results of experiment demonstrate that both algorithms can eliminate system noise including intensity perturbation.

**Key words** fiber optics; fiber sensing; heterodyne; optical intensity perturbation

**OCIS codes** 060.2310; 120.4630; 280.4788

## 1 引 言

干涉型光纤传感系统以其灵敏度高等优点而得到广泛的应用。双脉冲外差解调方案作为干涉型光纤传感器的检测技术之一,具有动态范围大、适于时分复用等优点<sup>[1]</sup>,符合干涉型光纤传感技术向大规模传感阵列、远距离传感发展的趋势<sup>[2]</sup>。

在实际的工程应用中,激光器的强度噪声及长距离传感光缆的抖动带来的光强扰动,直接影响着信号

的低频检测及系统动态范围下限的拓展<sup>[3]</sup>。本文主要研究了光强扰动对两种不同外差解调方案——外差-微分交叉相乘(DCM)算法和外差-反正切(Arctangent)算法的影响,从理论上分析了光强扰动对解调的影响机理,利用数值模拟验证了理论分析的正确性,并对两种解调方案受光强扰动的影响进行了对比分析。搭建了基于外差检测方法的实验系统,对两种解调方法的解调效果进行了实验研究。

**收稿日期**: 2012-08-03; **收到修改稿日期**: 2012-09-27

**作者简介**: 蒋 鹏(1988—),男,硕士研究生,主要从事水声工程方面的研究。E-mail: jiangpeng.546331@163.com

**导师简介**: 倪 明(1972—),男,博士,教授,主要从事光纤传感器、信号处理及水声学方面的研究。

E-mail: niming\_1@21cn.com

## 2 外差检测方法基本原理

外差法中,干涉仪输出信号<sup>[1]</sup>为

$$I = A + B\cos[2\pi\Delta ft + \phi(t)], \quad (1)$$

式中  $A$  为光强的直流项,  $B$  为光强交流项的振幅, 与干涉仪的输入光强、耦合器的分束比、两束光的偏振态等有关,  $\Delta f$  为外差频率,  $\phi(t)$  中包含被测信号, 也包括初相位及环境扰动等引起的噪声。外差法将频率较低的信号加载于频率较高的外差信号上, 经光电转换后, 可滤除(1)式的直流项, 得

$$y_s = B\cos[2\pi\Delta ft + \phi(t)]. \quad (2)$$

解调过程需要两个参考信号, 参考信号可以通过电学端产生, 也可通过光学方法产生。本文中的分析所使用的参考信号通过光学方法产生, 设两参考信号为

$$y_{r1} = C\cos(2\pi\Delta ft), \quad (3)$$

$$y_{r2} = C\sin(2\pi\Delta ft), \quad (4)$$

式中  $C$  为参考信号的幅度。

传感信号与参考信号混频, 并经低通滤波后, 可以得到一组关于  $\phi(t)$  的正交项:

$$y_s y_{r1} = \frac{1}{2}BC\cos\phi(t), \quad (5)$$

$$y_s y_{r2} = -\frac{1}{2}BC\sin\phi(t). \quad (6)$$

获得正交信号后, 利用 Arctangent 或 DCM 算法, 即可解得  $\phi(t)$ , 进而得到待测信号。

## 3 光强扰动影响的理论分析

### 3.1 光强扰动对外差-DCM 解调影响的理论分析

在获得了(5)、(6)式的正交信号后, 可以通过 DCM 算法获得待测信号。DCM 算法的计算过程如图 1 所示。

光强扰动等效于在电场  $E$  上引入一个振幅调制项, 该噪声直接反映到(1)式中的  $B$  值上, 并会对干涉信号产生比较复杂的影响<sup>[4]</sup>。为了简化分析, 假设光强扰动使  $B$  值受到如下调制

$$B = B_0[1 + \phi_{na}(t)], \quad (7)$$

则(2)式变为

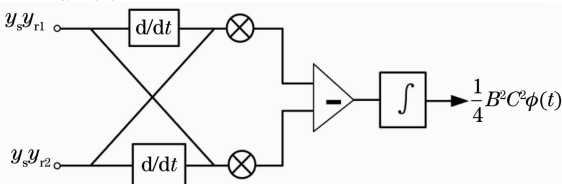


图 1 DCM 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the DCM algorithm

$$y'_s = B_0[1 + \phi_{na}(t)]\cos[2\pi\Delta ft + \phi(t)], \quad (8)$$

式中  $\phi_{na}(t)$  为光强扰动对外差信号的调制。

为了抑制相位噪声, 参考信号由光学端引出, 可以抵消相位噪声, 则(3)、(4)式可写为

$$y'_{r1} = C_0[1 + \phi_{nb}(t)]\cos(2\pi\Delta ft), \quad (9)$$

$$y'_{r2} = C_0[1 + \phi_{nb}(t)]\sin(2\pi\Delta ft), \quad (10)$$

式中  $\phi_{nb}(t)$  为光强扰动对参考信号的调制, 由于可能存在系统其他因素的影响, 故不再用  $\phi_{na}(t)$  表示。

以(8)~(10)式为基础, 分析光强扰动对外差 DCM 解调算法的影响。传感信号分别与参考信号相乘得到

$$y'_s y'_{r1} = \frac{1}{2}B_0 C_0 [1 + \phi_{na}(t)][1 + \phi_{nb}(t)]\cos\phi(t), \quad (11)$$

$$y'_s y'_{r2} = -\frac{1}{2}B_0 C_0 [1 + \phi_{na}(t)][1 + \phi_{nb}(t)]\sin\phi(t). \quad (12)$$

经过图 1 所示的流程, 得到

$$\frac{1}{4}(B_0 C_0)^2 M^2 \dot{\phi}(t), \quad (13)$$

其中  $M = [1 + \phi_{na}(t)][1 + \phi_{nb}(t)]$ , 系数  $\frac{1}{4}(B_0 C_0)^2 M^2$  可由(11)、(12)式的平方和得到, 则由此消去系数的影响, 使最终结果不含光强扰动项。

### 3.2 光强扰动对外差-Arctangent 解调影响的理论分析

在获得正交信号的前提下, 也可以通过 Arctangent 算法实现对相位信息的解调。Arctangent 算法的具体实现过程在文献[5,6]中已有详细介绍, 在此基础上分析光强扰动对外差-Arctangent 解调的影响。

Arctangent 解调方法通过求得正交信号的正切值, 再进行反正切变换获得待测相位信息。其数字化实现有查表法、Taylor 展开法、多项式近似法等, 本文中对反正切的计算是基于 Matlab 软件自带的反正切函数。基本流程如图 2 所示。获得反正切值之后, 由两正交信号  $y'_s y'_{r2}$  和  $y'_s y'_{r1}$  的符号可以将反正切值扩展到区间  $(-\pi, \pi)$  中的某一象限, 对应于图 2 中的 octan 过程。  $\phi(t)$  的值有可能超过  $(-\pi, \pi)$  区间, 因此需要确定增加的 2 个数, 以 fringe 表示。

当存在光源强度噪声时, 正交信号变为(11)、(12)式, 二者相除, 得到

$$\frac{y'_s y'_{r2}}{y'_s y'_{r1}} = \tan\phi(t), \quad (14)$$

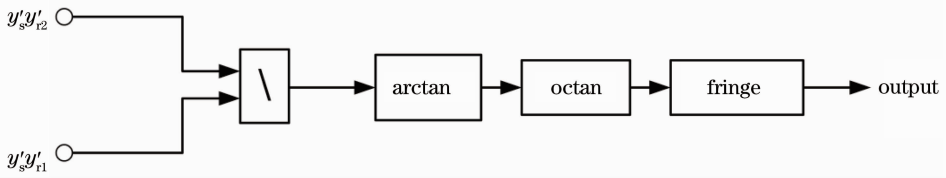


图2 Arctangent 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the arctangent algorithm

或

$$\frac{y'_s y'_{r1}}{y'_s y'_{r2}} = \cot \phi(t). \quad (15)$$

从(14)、(15)式中可以看到,经求取正切或余切值之后,消除了噪声项 $[1 + \phi_{na}(t)][1 + \phi_{nb}(t)]$ 。

需要指出的是,传统的相位载波(PGC)调制解调方法与 Arctangent 算法的结合同样具有抑制光强扰动的效果<sup>[6~8]</sup>,但是其相位正交项求得的正切或余切值含有  $J_1(C)/J_2(C)$  项,解调信号受  $C$  值漂移的影响。而根据本节分析,外差-Arctangent 方法无需考虑这一影响,这是外差-Arctangent 方法相

对于 PGC-Arctangent 方法的优势之一。

### 3.3 数值模拟

在理论分析的基础上,选取具有代表性的光强扰动进行数值模拟,对上述理论进行验证,并进一步分析光强扰动对两种解调方法的影响。

假设  $\phi_n(t)$  为最简单的单频扰动  $k\cos(2\pi f_n t)$ ,选取幅度  $k = 0.02$ , 频率为 200 Hz。分别利用外差-DCM 与外差-Arctangent 方案进行仿真。加载的测试信号为余弦信号,幅值为 5 rad,频率为 500 Hz。当外差频率为 25 kHz 时,得到的解调结果如图 3 所示。

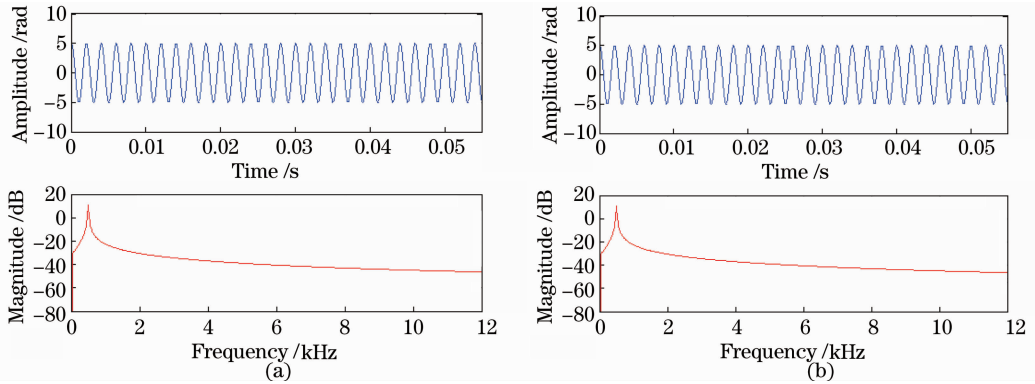


图3 单频扰动幅度为 0.02 rad 下两种解调方法的仿真结果。(a) 外差-Arctangent 方法;(b)外差-DCM 方法

Fig. 3 Output waveforms and spectra of simulation under single frequency perturbation of 0.02 rad amplitude.

(a) Arctangent algorithm; (b) DCM algorithm

从图 3 可以看出,当存在单频光强度扰动时,外差-Arctangent 方法与外差-DCM 方法都能够有效地消除光强度扰动的影响。用解调信号与实际信号之间的相关系数  $R$  来反映波形的失真,另外定义一个失真系数  $D$ ,即解调信号与仿真声信号的幅度差的绝对值与仿真声信号幅度的比值<sup>[9]</sup>。那么利用外差-DCM 解调算法获得的信号与原仿真信号之间的相关系数  $R = 0.9408$ ,失真系数  $D = 0.0007$ 。利用外差-Arctangent 方法获得的相关系数  $R = 0.9877$ ,失真系数  $D = 0.0023$ 。可见,利用这两种方法均能够获得较为理想的解调效果,然而二者的相关系数与失真系数之间存在差异,原因可能为外差-DCM 算法中微分与积分带来的误差。

当单频光强度扰动增大到 2 rad 时,在其他条

件不变的情况下,经两种解调算法得到的结果如图 4 所示,可以看到解调信号失真度较大,说明这两种算法对信号的解调受较大的单频光强扰动的影响。

在外差频率及加载信号不变的条件下,选取  $\phi_n(t)$  为白噪声,幅度为 -30 dB。分别利用外差-DCM 及外差-Arctangent 方法进行解调,解调结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,若光强扰动表现为白噪声,两种解调方法仍能获得较好的解调信号,利用外差-Arctangent 方法得到的相关系数  $R = 0.9877$ ,失真系数  $D = 0.0169$ ;利用外差-DCM 方法得到的相关系数  $R = 0.9407$ ,失真系数  $D = 0.0124$ 。由于外差-DCM 算法中微积分过程带来的误差,外差-DCM 算法所获得的相关系数略低于外差-

Arctangent 算法所获得的结果。

考虑较大强度扰动的情況,取白噪声幅度为一

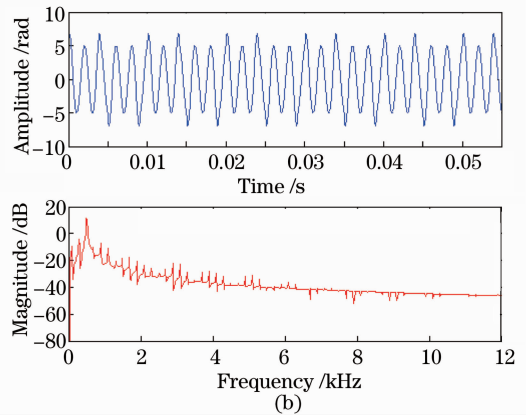
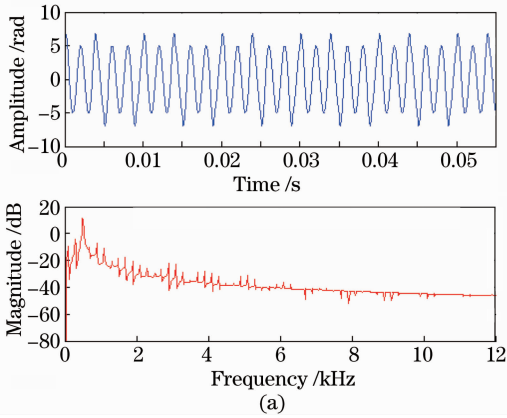


图 4 单频扰动幅度为 2 rad 下两种解调方法的仿真结果。(a) 外差-Arctangent 方法;(b) 外差-DCM 方法  
Fig. 4 Output waveforms and spectra of simulation under single frequency perturbation of 2 rad amplitude.

(a) Arctangent algorithm; (b) DCM algorithm

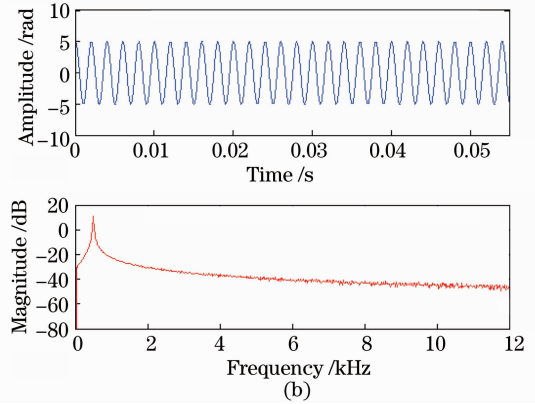
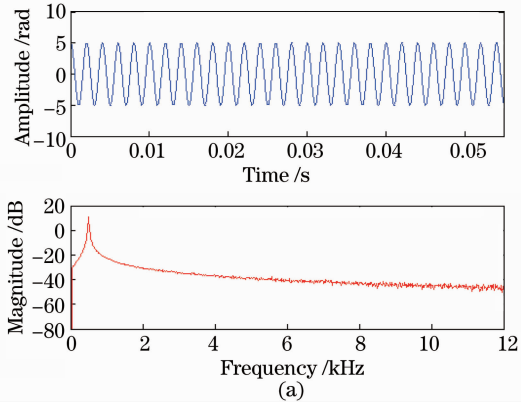


图 5  $-30$  dB 的白噪声下两种解调方法的时域及频域仿真结果。(a) 外差-Arctangent 算法;(b) 外差-DCM 算法  
Fig. 5 Output waveforms and spectra of simulation based on two demodulation approaches under white noise whose amplitude is  $-30$  dB. (a) Arctangent algorithm; (b) DCM algorithm

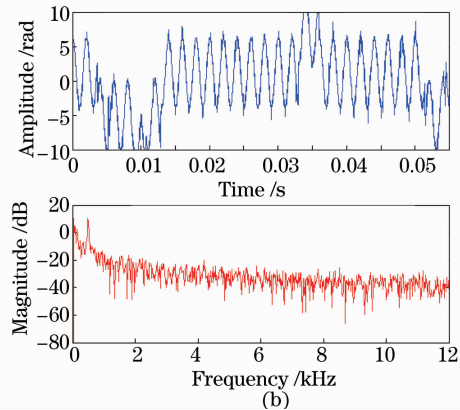
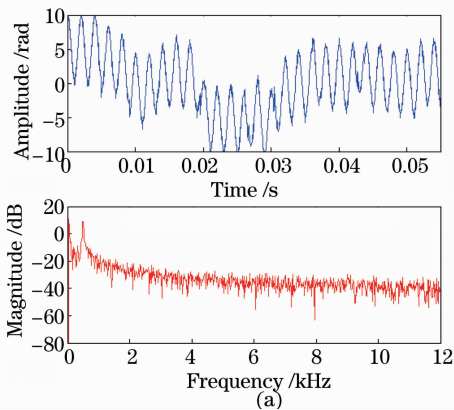


图 6  $-10$  dB 的白噪声下两种解调方法的时域及频域仿真结果。(a) 外差-Arctangent 算法;(b) 外差-DCM 算法  
Fig. 6 Output waveforms and spectra of simulation based on two demodulation approaches under white noise whose amplitude is  $-10$  dB. (a) Arctangent algorithm; (b) DCM algorithm

当白噪声增大时,两种解调方法所得到的解调结果都出现了失真,解调信号的频谱中包含有较大的低频噪声。同时由于白噪声的随机性,不同时间段得到的解调信号随时间的变化情况并不一样,如图7所示,表现为解调波形的变化及相关系数和失真度的漂移。

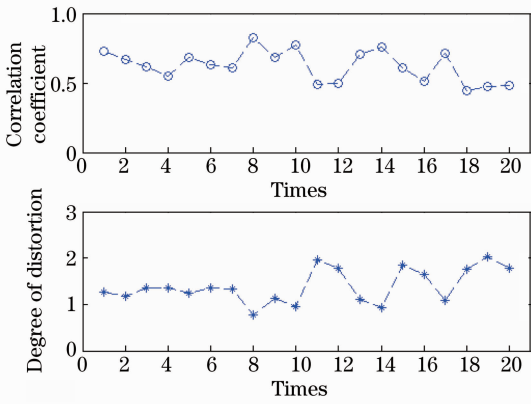


图7 在21次仿真解调下所得到的相关系数及失真度的漂移

Fig. 7 Fluctuation of correlation coefficient and degree of distortion in simulation of 21 times

从数值模拟的结果可以看出,在较小的光强扰动下,仿真结果符合前面的理论分析。在外差解调方法中,外差-Arctangent方法与外差-DCM方法都能够实现对光强扰动的抑制。当系统存在较大的光强噪声时,所得到的解调结果存在明显的失真,而在仿真过程中通过改变低通滤波器的设计,可以降低部分失真,说明要有效地降低较大光强扰动的影 响,还需综合考虑滤波器的设计,以进一步优化算法。

## 4 实验分析

构建了如图8所示的传感器系统<sup>[1,10]</sup>,两个声光调制器(AOM)对两路光进行移频,并调制为脉冲光。输出的信号分别经耦合器 $C_1$ 和 $C_2$ 分束后,其中的一路输入到耦合器 $C_4$ , $C_4$ 的输出信号经光电转换和数据采集后作为解调用的一个参考信号,对此参考信号做希尔伯特变换,得到另一个正交的参考信号; $C_2$ 和 $C_3$ 输出的另外两路光脉冲信号注入传感阵列,其中一路经过长度为 $2L$ 的延迟光纤,将两个脉冲从时域上分开。传感头为一非平衡的迈克耳孙干涉仪,干涉臂臂差为 $L$ 。利用受电压调制的压电陶瓷(PZT)给干涉仪传感臂施加信号。

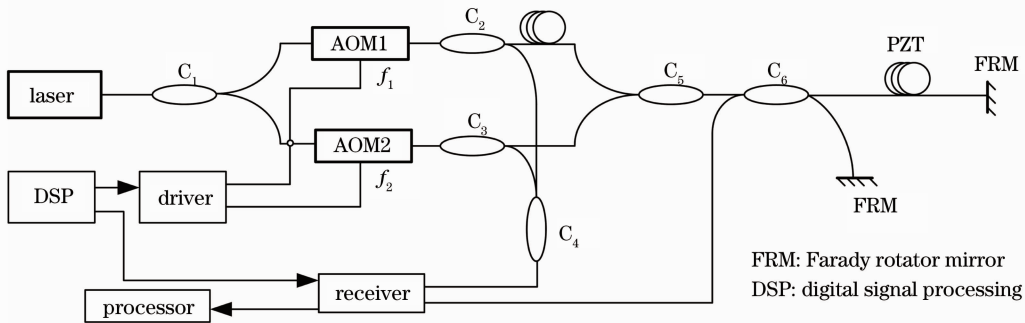


图8 外差检测实验系统示意图

Fig. 8 Experimental architecture based on heterodyne detection

设置外差频率为50 kHz,脉冲宽度为500 ns,发射重复频率为400 kHz,且两不同频率脉冲之间具有500 ns的时间延迟,系统模/数(A/D)采样率为20 MHz。在压电陶瓷上施加正弦调制信号,信号频率为1 kHz。利用两种方法获得的解调结果如图9所示,可见,外差-Arctangent方法与外差-DCM方法获得的解调结果基本一致,解调信号频谱中未出现谐波,1 kHz的信号约为9 dB,噪声在-50 dB左右,信噪比较高,解调效果较好。

根据以上实验结果,从整体上可以看出,外差-Arctangent方法与外差-DCM方法均能够抑制噪声,这其中的噪声也包括光强抖动,同时二者解调效

果基本一致。由于实验室系统下光强扰动相对较小,因此通过算法自身的消噪设计可以实现对噪声的消除。但是由于实际工作中受各种因素的影响,光强扰动较大,因此要实现更有效的抑制作用还需进一步研究验证。

## 5 结论

研究了光强扰动对外差-DCM和外差-Arctangent解调方案的影响。对光强抖动的影 响机理进行了理论分析。分别选取了单频噪声和白噪声进行数值模拟。分析及数值模拟结果表明,外差-DCM方案与外差-Arctangent方案均能够比较好地



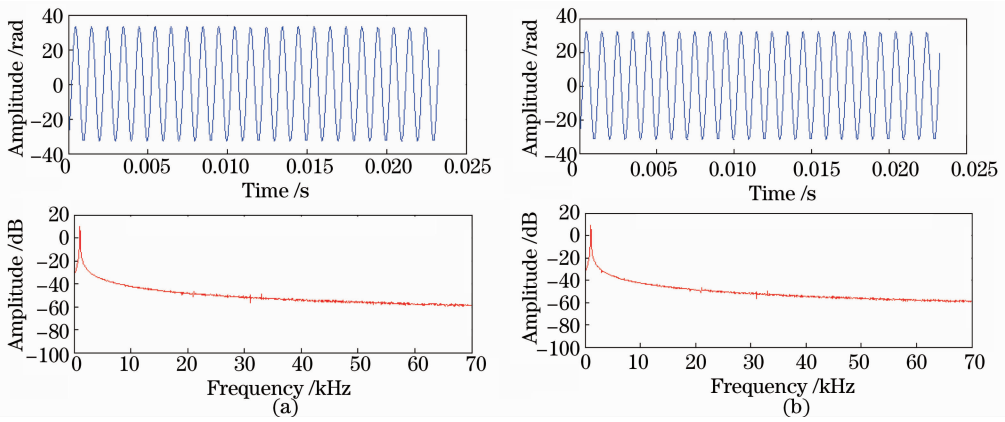


图9 加载1 kHz信号后两种解调方法的解调结果。(a)外差-arctangent方法；(b)外差-DCM方法

Fig. 9 Output waveforms and spectra of signal with frequency of 1 kHz based on two demodulation approaches.

(a) Arctangent algorithm; (b) DCM algorithm

抑制光强扰动的影响,具有同样的噪声抑制效果。而在较大幅度的光强扰动影响下,还需综合考虑算法中滤波器的设计以进一步抑制噪声。外差解调实验结果表明,在实验室系统中,利用外差-DCM与外差-Arctangent方法均能够获得较高的信噪比。此外,外差-Arctangent方案与传统的PGC-Arctangent方案相比,虽然二者抑制噪声的原理相同,但是PGC-Arctangent解调方案受相位调制深度 $C$ 值漂移的影响,而外差-Arctangent方法没有这一影响。

### 参 考 文 献

- Zhang Nan, Meng Zhou, Rao Wei *et al.*. Analysis on upper limit of dynamic range of fiber optic interferometric hydrophone using digital heterodyne detection scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806011  
张楠,孟洲,饶伟等.干涉型光纤水听器数字化外差检测方法动态范围上限研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806011
- Liang Xun, Xiong Shuidong, Hu Yongming *et al.*. Impact on relative intensity noise on fiber optic hydrophone's phase generated carrier scheme[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 716~721  
梁迅,熊水东,胡永明等.激光器强度噪声对光纤水听器相位载波解调的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 716~721
- Song Weiwei. Study on Reducing Interferometric Fiber Optic Sensor Background Noise Scheme [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. 17~24  
宋微微.降低干涉型光纤水听器本底噪声方案的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007. 17~24

- Liang Xun. Investigation of Noise Analysis and Suppression Technologies in Fiber Optic Hydrophone System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 19~43  
梁迅.光纤水听器系统噪声分析及抑制技术研究[D].长沙:国防科学技术大学, 2008. 19~43
- Allen Cektorich. Demodulator for interferometric sensors [C]. *SPIE*, 1999, **3860**: 338~347
- Liwei Wang, Min Zhang, Xianhui Mao *et al.*. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optical interferometric sensors[C]. *SPIE*, 2006, **6292**: 62921E
- Liu Xiaoping, Xu Linfeng, Han Shengchen *et al.*. An arctangent approach for PGC demodulation of optic-fiber hydrophones[J]. *Applied Science and Technology*, 2008, **35**(10): 8~11  
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
- Haitham M. Eissa, Khaled Sharaf, Hani Ragaie. Arctan differentiated digital demodulator for FM/FSK digital receivers [C]. The 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2002, **2**: 200~203
- Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 92~98  
王泽锋,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
- Geoffrey A. Cranch, Philip J. Nash. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5): 687~699

栏目编辑:何卓铭