

doi:10.3788/gzxb20134201.0034

# 载波频率漂移对相位生成载波解调结果的影响分析

马林, 刘艳, 李阳, 刘志波, 简水生

(北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:**从载波相位调制解调原理出发,理论分析了载波频率漂移对解调结果的影响.通过对解调公式的推导及分析,给出了频率漂移对解调结果影响的公式.结果表明,当混频基频信号的频率与载波频率存在微小频差时,解调结果将出现低频调制,严重影响解调效果;仿真及实验验证结果与理论分析完全吻合.

**关键词:**相位生成载波;频率漂移;干涉仪;光纤传感器

中图分类号:TP212

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)01-0034-4

## Analysis of Frequency Drift Effects in the Phase-generated Carrier Method

MA Lin, LIU Yan, LI Yang, LIU Zhi-bo, JIAN Shui-sheng

(Key Laboratory of All Optic Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A rigorous theoretical derivation on the influence of frequency drift of the carrier has been made in this paper. By analyzing the demodulation formula, the influence formula of frequency drift of the carrier was given. The formula shows that when there is a tiny difference between the frequency of modulation and demodulation signals, the demodulation result will be modulated by a low-frequency signal and the demodulation result will be distorted. Experimental and simulation were carried out on this basis, and the results are completely consistent with the theoretical analysis.

**Key words:** PGC; Frequency drift; Interferometer; Fiber optic sensor

### 0 引言

相位生成载波技术(Phase-Generated Carrier, PGC)是目前干涉型光纤传感领域中非常重要的调制解调技术之一,其灵敏度高,动态范围大,线性度较好,在传感领域有非常明显的优势<sup>[1-2]</sup>.

在 PGC 解调算法的实现过程中还存在较多问题,其中最大的问题来自载波频率漂移.在以往文献中并未发现有对频移影响的理论分析<sup>[3-8]</sup>.为此,本

文针对载波频率漂移对解调结果的影响进行了严格的理论推导,并得出了载波频移对解调结果影响的具体形式.在理论分析基础上得到了仿真结果,并进行了实验验证,实验结果与理论仿真相吻合.

### 1 PGC 解调原理

PGC 解调框图如图 1,经 PGC 调制后,从干涉仪输出的光信号形式为<sup>[9-10]</sup>

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

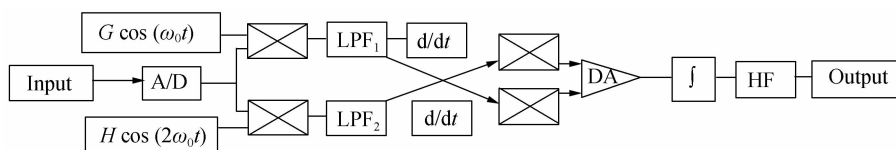


图 1 PGC 解调原理框图

Fig. 1 Block diagram of PGC demodulation

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB328206)和国家自然科学基金重点项目(No. 60837002)资助

第一作者:马林(1987—),男,博士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email:11111027@bjtu.edu.cn

导师:简水生(1929—),男,教授,博导,主要研究方向为光通信、光交换、光传感及光电子器件等. Email:ssjian@center.njtu.edu.cn

收稿日期:2012-07-30;录用日期:2012-10-23

式中,  $C$  为载波信号引起的相位调制幅度,  $\omega_0$  为载波频率,  $\varphi(t) = \varphi_s(t) + \varphi_0(t)$ ,  $\varphi_s(t)$  和  $\varphi_0(t)$  分别为由待测信号和环境噪声引起的相位差. 将式(1)以 Bessel 函数形式展开, 得

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

以  $G \cos(\omega_0 t)$  和  $H \cos(2\omega_0 t)$  进行混频, 经过低通滤波、微分、交叉相乘相减、积分及高通滤波后, 即可得到信号  $\Psi_s(t)$

$$\Psi_s(t) = GHB^2 J_1(C) J_2(C) \varphi_s(t) \quad (3)$$

## 2 载波频率漂移对解调结果的影响

由于载波频率漂移, 使得混频信号的基频频率与载波频率存在  $\Delta\omega$  的频率差, 此时, 混频信号变为:  $G \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t]$  和  $H \cos[2(\omega_0 + \Delta\omega)t]$ , 混频后信号再经低通滤波变为  $f_1(\Delta\omega, t)$  和  $f_2(\Delta\omega, t)$

$$f_1(\Delta\omega, t) = -GBJ_1(C) \cos(\Delta\omega t) \sin \varphi(t) \quad (4)$$

$$f_2(\Delta\omega, t) = -HBJ_2(C) \cos(2\Delta\omega t) \cos \varphi(t) \quad (5)$$

将式(4)、(5)分别微分, 得

$$\frac{\partial f_1(\Delta\omega, t)}{\partial t} = -GBJ_1(C) \left[ (-\Delta\omega) \sin(\Delta\omega t) \cdot \sin \varphi(t) + \cos(\Delta\omega t) \cos \varphi(t) \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial f_2(\Delta\omega, t)}{\partial t} = -HBJ_2(C) \left[ (-2\Delta\omega) \sin(2\Delta\omega t) \cdot \cos \varphi(t) - \cos(2\Delta\omega t) \sin \varphi(t) \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

式(5)  $\times$  (6) - (4)  $\times$  (7), 得

$$f_2 \frac{\partial f_1}{\partial t} - f_1 \frac{\partial f_2}{\partial t} = GHB^2 J_1(C) J_2(C) \cdot \left\{ \Delta\omega \sin(\Delta\omega t) [\cos(2\Delta\omega t) + 2] \sin \varphi(t) \cdot \cos \varphi(t) + \cos(2\Delta\omega t) \cos(\Delta\omega t) \frac{d\varphi(t)}{dt} \right\} \quad (8)$$

因为  $\Delta\omega$  很小, 所以  $\Delta\omega \sin(\Delta\omega t) \approx 0$ , 式(8)简化为

$$f_2 \frac{\partial f_1}{\partial t} - f_1 \frac{\partial f_2}{\partial t} = GHB^2 J_1(C) J_2(C) \cos(2\Delta\omega t) \cdot \cos(\Delta\omega t) \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{2} GHB^2 J_1(C) J_2(C) [\cos(3\Delta\omega t) + \cos(\Delta\omega t)] \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (9)$$

将式(9)积分, 得

$$\int (f_2 \frac{\partial f_1}{\partial t} - f_1 \frac{\partial f_2}{\partial t}) dt = \frac{1}{2} GHB^2 J_1(C) J_2(C) \cdot [\int \cos(3\Delta\omega t) d\varphi(t) + \int \cos(\Delta\omega t) d\varphi(t)] \quad (10)$$

因为

$$\begin{aligned} & \int \cos(3\Delta\omega t) d\varphi(t) = \cos(3\Delta\omega t) \varphi(t) + 3\Delta\omega \cdot \\ & \int \sin(3\Delta\omega t) \varphi(t) dt, \\ & \int \cos(\Delta\omega t) d\varphi(t) = \cos(\Delta\omega t) \varphi(t) + \\ & \Delta\omega \int \sin(3\Delta\omega t) \varphi(t) dt \end{aligned} \quad (11)$$

考虑到  $\Delta\omega$  很小, 式(11)中两积分可简化为

$$\begin{aligned} & \int \cos(3\Delta\omega t) d\varphi(t) \approx \cos(3\Delta\omega t) \varphi(t), \\ & \int \cos(\Delta\omega t) d\varphi(t) \approx \cos(\Delta\omega t) \varphi(t) \end{aligned} \quad (12)$$

将式(12)带入式(10), 整理得解调结果  $\Psi(t)$

$$\begin{aligned} \Psi(t) &= \frac{1}{2} GHB^2 J_1(C) J_2(C) [\cos(3\Delta\omega t) + \\ & \cos(\Delta\omega t)] \varphi(t) = GHB^2 J_1(C) J_2(C) \cdot \\ & \cos(2\Delta\omega t) \cos(\Delta\omega t) \varphi(t) \end{aligned} \quad (13)$$

因为环境干扰  $\varphi_0(t)$  为低频信号, 所以将式(13)经过高通滤波后即得到信号  $\Psi_s(t)$

$$\begin{aligned} \Psi_s(t) &= GHB^2 J_1(C) J_2(C) \cos(2\Delta\omega t) \cdot \\ & \cos(\Delta\omega t) \varphi_s(t) \end{aligned} \quad (14)$$

观察式(14)可知, 载波频率漂移将导致解调结果出现一个低频调制系数  $\cos(2\Delta\omega t) \cos(\Delta\omega t)$ , 解调结果将出现包络.

推导过程进行了近似处理, 即当  $\Delta\omega$  很小时, 含  $\Delta\omega$  的项忽略. 首先, 假设待解调信号为正弦信号, 频率为  $\omega'$ , 即信号形式为  $\varphi(t) = \sin(\omega' t)$ , 则式(11)中, 积分的后半部分变为

$$\begin{aligned} & \Delta\omega \int \sin(3\Delta\omega t) \varphi(t) dt = \Delta\omega \int \sin(3\Delta\omega t) \sin(\omega' t) dt = \\ & \frac{1}{2} \Delta\omega \left[ \frac{\sin(\omega' + 3\Delta\omega)t}{\omega' + 3\Delta\omega} - \frac{\sin(\omega' - 3\Delta\omega)t}{\omega' - 3\Delta\omega} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

因为信号频率  $\omega'$  一般在几十到几百赫兹,  $\Delta\omega$  小于 1 Hz, 所以  $\frac{\Delta\omega}{\omega' + 3\Delta\omega}$  与  $\frac{\Delta\omega}{\omega' - 3\Delta\omega}$  远小于 1, 故含有  $\Delta\omega$  的项可以忽略.

## 3 仿真结果

仿真参量设置: 载波频率为 13 600 Hz, 采样频率为 1 M,  $G = H = 1$ ,  $C = 2.4$ , 信号为 1 KHz 正弦信号, 振幅为 0.5 V(添加随机噪声), 原始信号波形如图 2, 图 3 为原始信号局部放大图.

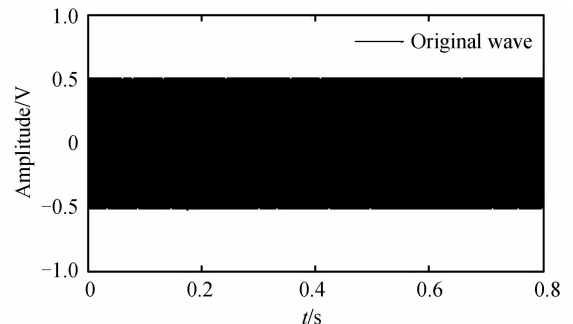


图 2 原始波形  
Fig. 2 Original wave

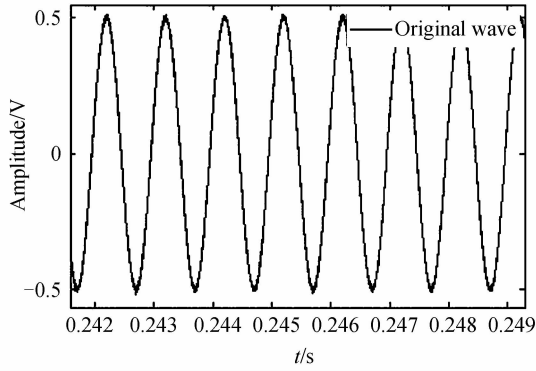


图3 原始信号局部放大图  
Fig. 3 Enlargement of original wave

当混频的基频频率与载波频率完全一致 (13 600 Hz)时,解调波形如图 4,图 5 为解调波形(虚)与原始波形(实)的对比图.通过图 5 可以看出,当解调频率与调制频率完全一致时,解调波形与原始波形非常吻合,计算得相关系数在 0.99 左右.

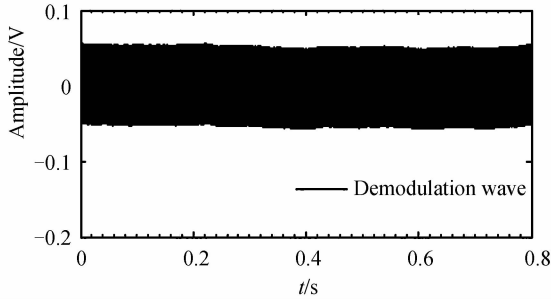


图4 解调波形  
Fig. 4 Demodulation wave

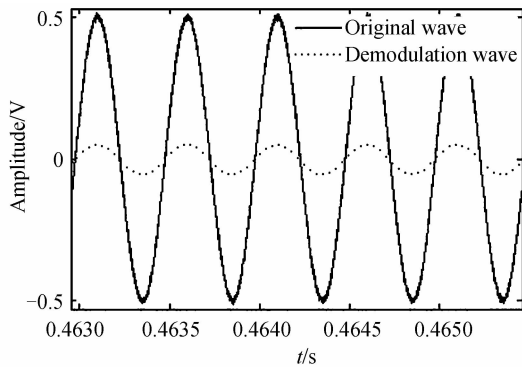


图5 解调波形(虚)与原波形(实)比较  
Fig. 5 Comparison of original and demodulation wave

当基频与载频的频差为 0.1 Hz、0.2 Hz 时,解调波形分别如图 6、图 7.从图中可知,当载波频率存在微小漂移时,解调结果就会失真,出现包络,且频

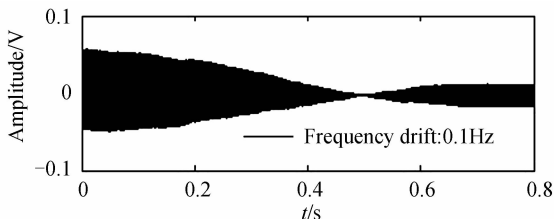


图6 频差为 0.1 Hz,解调结果  
Fig. 6 Frequency drift is 0.1 Hz

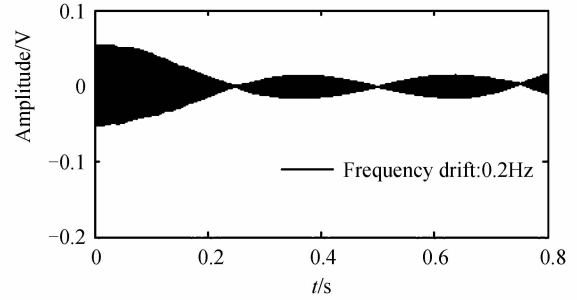


图7 频差为 0.2 Hz,解调结果  
Fig. 7 Frequency drift is 0.2 Hz

差越大,解调波形失真越严重,与理论分析相吻合.

### 4 实验验证

实验采用压电陶瓷 (Piezoelectric ceramic, PZT<sub>1</sub>)生成载波信号,PZT<sub>1</sub>上缠绕光纤长度为 100 m,PZT<sub>1</sub>驱动电压为 100 mV,调制频率为 13 600 Hz.在另一臂上加一个 PZT<sub>2</sub>做信号源,用振幅为 0.5 V 频率为 1 KHz 的正弦信号做驱动,信号源波形如图 8.实验结构如图 9,光从 M-Z 一端输入,在另一端进行探测和解调.图 10 为直接以 13 600 Hz 作为基频频率的解调结果,因载波频率漂移,解调结果出现

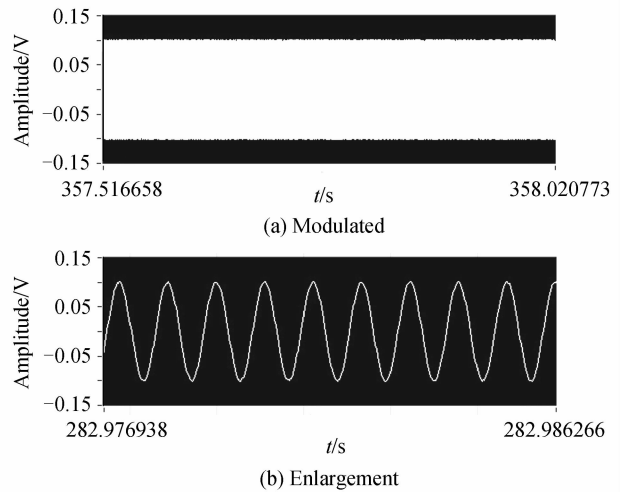


图8 待解调信号波形与其放大图  
Fig. 8 The signal to be modulated and it's enlargement

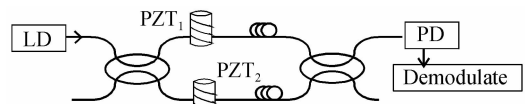


图9 实验结构  
Fig. 9 Experimental diagram

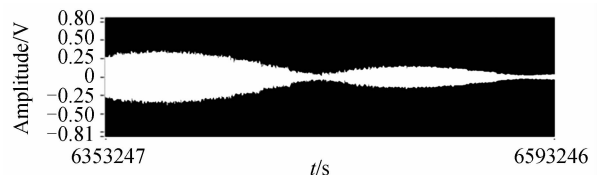
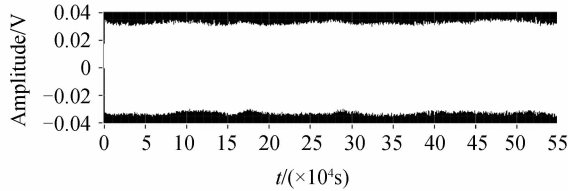


图10 存在频差时的在线解调结果  
Fig. 10 Result with frequency drift

包络,通过采集卡采集 PZT<sub>1</sub> 驱动电源的频率,其波动在 0.1 Hz 以下,但对解调结果已有明显影响。

当利用采集卡直接采集载波信号作为混频信号中的基频信号,二倍频信号是对基频信号倍频得到。



所得解调结果如图 11,图 12 为解调频谱(频率为 1 KHz)。因为直接采集载波信号,不存在频差,解调结果较为理想。

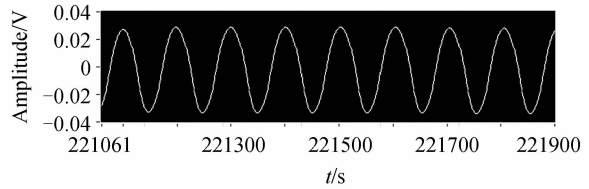


图 11 直接采集载波信号的解调结果及放大图

Fig. 11 Result by waveform acquisition method

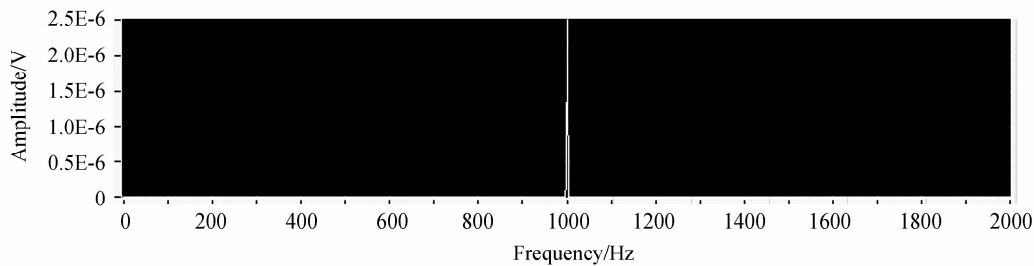


图 12 解调频率(采集载波信号)

Fig. 12 Spectrum of demodulation result (Waveform Acquisition Method)

## 5 结论

在 PGC 解调技术中,载波频率漂移会导致解调结果出现低频调制,本文对频移的影响做了严格的理论推导,并在理论分析的基础上,进行了相应的仿真以及实验验证,实验结果与理论分析完全吻合,实验表明,即使载波频率漂移量只有 0.1 Hz,也将对解调结果造成比较明显的影响。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] WANG Ze-feng, HUANG Lei, LUO Hong, *et al.* Pseudo working-point control detection scheme for interferometric fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 39-41.  
王泽锋,黄磊,罗洪,等.干涉型光纤水听器伪工作点控制检测方法[J].光子学报,2008,**37**(1): 39-41.
- [4] YUAN Da-ling, LI Ping, ZHANG Ren-he. Implementation of PGC demodulation for interferometric optic fiber hydrophone based on DSP[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005,

**24**(8): 57-59.

袁大岭,李平,张仁和.干涉型光纤水听器 PGC 解调的 DSP 实现[J].传感器技术,2005,**24**(8): 57-59.

- [5] GONG Ming-ju, DENG Yue, QIAO Dong-hai, *et al.* A scheme of PGC demodulation based on analog-digital mixed system[J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2008, **30**(5): 538-540.  
宫铭举,邓越,乔东海,等.一种模数混合的 PGC 解调方案[J].压电与声光,2008,**30**(5): 538-540.
- [6] KERSEY A D, BERKOFF T A. Novel passive phase noise cancelling technique for interferometric fiber optic sensors[J]. *Electronics Letters*, 1990, **26**(10): 640-641.
- [7] PENG Bao-jin, ZHANG Min, LIAO Yan-biao, *et al.* The method for resolving phase shifting and frequency doubling of fiber-optic sensors[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(8): 913-917.  
彭保进,张敏,廖延彪,等.光纤传感器相位漂移及倍频问题的解决方法[J].光电子·激光,2005,**16**(8): 913-917.
- [8] LAN Tian, ZHANG Chun-xi, LI Li-jing, *et al.* Carrier phase advance technique for digital PGC demodulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(7): 49-52.  
蓝天,张春熹,李立京,等.全数字 PGC 解调的载波相位超前技术[J].光电工程,2008,**35**(7): 49-52.
- [9] DANDRIDGE A, TVETEN A B, GIALLORENZI T G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE Quantum Electronics*, 1982, **18**(10): 1647-1653.
- [10] NI Ming, XIONG Shui-dong, MENG Zhou, *et al.* Realization of digital demodulation of the phase generated-carrier technique in fiber optic hydrophone systems[J]. *Applied Acoustics*, 2004, **23**(6): 5-11.  
倪明,熊水东,孟洲,等.数字化相位载波解调方案在光纤水听器系统中的实现[J].应用声学,2004,**23**(6): 5-11.