

文章编号:1004-4213(2011)10-1531-5

基于同步载波提取的光纤传感器相位 生成载波解调方法

张毅, 贾波, 许海燕, 吴红艳, 肖倩

(复旦大学 光纤研究中心, 上海 200433)

摘 要:利用 3×3 耦合器和法拉第旋转镜等光学元件, 构造了一个基于迈克尔逊干涉系统的光纤振动传感器. 使用外调制的方法对传输光进行相位生成载波调制, 并将该光纤振动传感器应用于长距离的安全监测中. 通过对该传感器的干涉输出信号进行贝塞尔展开分析, 发现干涉输出信号中含有与外调制所使用的载波频率相同的信号成分. 因此, 使用一个中心频率为载波频率且通带很窄的带通滤波器, 可以同步地提取载波信号. 同步提取的载波信号用于干涉输出信号的相位生成载波被动零差解调, 可以得到作用于光纤振动传感器上的外界振动信号. 本文提出了从输出信号中同步提取载波的方法, 通过理论推导得出了该方法的可行性, 并且通过软件仿真和实验验证了该理论的正确性. 文中还对提取的载波受低频信号干扰, 造成其幅度不稳定的现象进行分析并提出了解决方法. 研究表明, 同步载波提取法适用于相位调制器与干涉信号输出端距离较远, 相位生成载波解调需要的同源载波获取较困难的情况.

关键词: 光纤光学; 分布式光纤传感器; 同步载波提取; 相位生成载波解调

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20114010. 1531

0 引言

随着人们对光纤传感技术研究的深入, 基于迈克尔逊干涉光路的各种光纤振动传感器取得了很大的进展^[1-2]. 基于光纤弹光效应^[3]的干涉型光纤传感器的原理是: 当外界扰动作用于光纤时, 引起光纤的长度和折射率变化, 使得光纤中传输光的相位发生变化, 通过构造干涉光路可以将相位变化检测出来. 基于光纤干涉技术的分布式光纤振动传感器被广泛应用于长距离区域安全监测领域, 有效监测距离约为 40 km. 在监测距离加长时, 激光损耗增加, 导致回光中干涉信号强度减弱, 而低频干扰部分加大. 为了解决这一问题, 本文引入了相位生成载波技术 (Phase Generated Carrier, PGC), 能够有效地解决相位衰落的问题, 在干涉型光纤传感器中应用广泛^[4-8]. 该技术在被测扰动信号的频带外引入一个高频载波, 使被测信号出现在该载波的边带上, 并与低频的干扰噪音分离^[6], 有效地降低了低频噪音, 提高定位准确度到 50 m 以内, 提高有效监测距离到 60 km 以上.

PGC 调制包括内调制和外调制, 内调制即在光路上加载相位载波, 外调制一般采用压电陶瓷管 (Piezoelectric Tube, PZT) 调制干涉仪的光程差. PGC 解调包括零差解调和外差解调等, 零差解调法中的被动零差解调算法容易实现, 被广泛的应用. 在被动零差解调算法中, 要将输出信号与载波信号相乘, 再经过合适的低通滤波器滤除高频部分, 获得含有被测信号的边带信号, 将边带信号经过微分交叉相乘 (Differential Cross Multiply, DCM) 法在经过积分后可以解调出外界振动信号^[9]. 解调所用的载波信号与相位调制器上加的载波必须同源, 即同频率, 同相位. 在某些情况下, 需要在光纤传感器的末端加相位调制器进行外调制, 对噪音进行抑制, 当光纤传感器的监测范围达到几十公里时, 由于加载相位调制的位置与干涉信号输出端的位置距离很远, 而 PGC 解调在干涉信号输出端进行, 因此造成解调算法需要的同源载波获取困难. 为了解决这一问题, 本文用 3×3 耦合器构造了一个基于迈克尔逊干涉系统的光纤振动传感器, 通过分析该光路的输出信号, 发现可以从输出信号中直接提取出同源载波, 应

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB327805) 和科技部创新方法工作专项 (No. 2009IM032900) 资助

第一作者: 张毅 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与信号处理等. Email: 082030028@fudan. edu. cn

通讯作者: 肖倩 (1973-), 女, 讲师, 主要研究方向为光纤传感与光纤通信等. Email: ychunww@163. com

导 师: 贾波 (1970-), 男, 教授, 主要研究方向为光纤传感与光纤通信等. Email: jiabo@fudan. edu. cn

收稿日期: 2011-01-22; **修回日期:** 2011-04-17

用提取出的载波可以实现对输出信号的 PGC 解调。

1 同步载波提取的原理

采用 PGC 调制技术的光纤传感器结构如图 1。

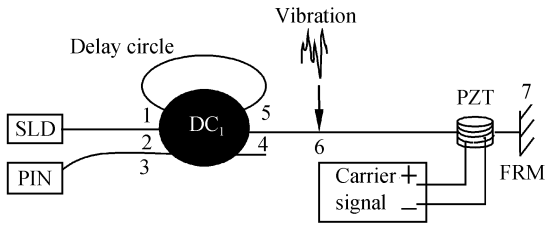


图 1 PGC 调制的光纤传感器
Fig. 1 Optic fiber sensor using PGC

图中 DC_1 是 3×3 光纤耦合器, 输入端 2 为光源输入端, 输入端 3 为干涉光探测端, 输入端 1 和输出端 5 用数公里的延时线圈相连, 在输出端 4 和法拉第旋转镜(7 位置处)之间为数十公里外界振动信号检测光纤, 在法拉第旋转镜前加相位调制器, 进行 PGC 调制. 该系统的两路相干光所走的路径分别为: Path1, 2-4-6-7-6-4-1-5-3; Path2, 2-5-1-4-6-7-6-4-3.

假设在传感臂上施加的外界扰动信号为余弦调制, 且假设 PZT 上加载的调制信号亦为余弦调制, 则这两束光干涉得到的光强输出可表示为^[4,10]

$I = A + B \cos [\varphi_c \cos(\omega_c t) + \varphi_s \cos(\omega_s t) + \varphi_0]$ (1)
式中, A 与 B 正比于输入的光强, ω_c 为加载在相位调制器上的电信号角频率, φ_c 为电信号产生光纤相位变化的幅度, 与所加电压的幅度成正比, ω_s 和 φ_s 分别为外界振动信号的角频率和产生相位变化的幅值, φ_0 为无外界扰动时, 两束相干光到达 3 位置时的固定相位差, 对于 3×3 耦合器 $\varphi_0 = \frac{2}{3}\pi$.

将式(1)按贝塞尔函数展开得到^[4]

$$I = A + B [J_0(\varphi_c) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\varphi_c) \cos 2k\omega_c t] \cdot \cos [\varphi_s \cos(\omega_s t) + \varphi_0] - 2B \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\varphi_c) \cdot \cos(2k+1)\omega_c t \right] \sin [\varphi_s \cos(\omega_s t) + \varphi_0] \quad (2)$$

将式(2)中的 $\cos [\varphi_s \cos(\omega_s t) + \varphi_0]$ 项按贝塞尔函数展开得到

$$\cos [\varphi_s \cos(\omega_s t) + \varphi_0] = [J_0(\varphi_s) + 2 \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^j J_{2j}(\varphi_s) \cos 2j\omega_s t] \cos \varphi_0 - 2 \left[\sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j J_{2j+1}(\varphi_s) \cdot \cos(2j+1)\omega_s t \right] \sin \varphi_0 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)的第二项得到

$$BJ_0(\varphi_c) \{ [J_0(\varphi_s) + 2 \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^j J_{2j}(\varphi_s) \cos 2j\omega_s t] \cdot \cos \varphi_0 - 2 \left[\sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j J_{2j+1}(\varphi_s) \cos(2j+1)\omega_s t \right] \cdot \sin \varphi_0 \} + 2B \sum_{k=1}^{\infty} [(-1)^k J_{2k}(\varphi_c) \cos 2k\omega_c t] \cdot$$

$$\{ [J_0(\varphi_s) + 2 \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^j J_{2j}(\varphi_s) \cos 2j\omega_s t] \cos \varphi_0 - 2 \left[\sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j J_{2j+1}(\varphi_s) \cos(2j+1)\omega_s t \right] \sin \varphi_0 \} \quad (4)$$

式中的信号成分为: 直流项 $BJ_0(\varphi_c)J_0(\varphi_s)\cos\varphi_0$, 角频率为 $j\omega_s$ ($j=1, 2, 3, \dots$) 的交流信号 ($j\omega_s$ 相对于 ω_c 为低频) 和角频率为 $2k\omega_c \pm 2j\omega_s$ 及 $2k\omega_c \pm (2j+1)\omega_s$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 的交流信号, 在频谱中该交流信号出现在 ω_c 偶次倍频的旁瓣上, 因此, 当式(4)表示的信号经过一个中心角频率在 ω_c 处的窄带带通滤波器时, 该式将被滤除, 亦即式(2)的第一和第二项将被滤除。

将式(2)中的 $\sin [\varphi_s \cos(\omega_s t) + \varphi_0]$ 项按贝塞尔函数展开得到

$$\sin [\varphi_s \cos(\omega_s t) + \varphi_0] = 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\varphi_s) \cdot \cos(2k+1)\omega_s t \right] \cos \varphi_0 + [J_0(\varphi_s) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\varphi_s) \cos 2k\omega_s t] \sin \varphi_0 \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)的第三项得到

$$-4B \cos \varphi_0 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\varphi_c) \cos(2k+1)\omega_c t \right] \cdot \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\varphi_s) \cos(2k+1)\omega_s t \right] - 2BJ_0(\varphi_s) \sin \varphi_0 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\varphi_c) \cos(2k+1)\omega_c t \right] - 4B \sin \varphi_0 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\varphi_c) \cos(2k+1)\omega_c t \right] \left[\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\varphi_s) \cos 2k\omega_s t \right] \quad (6)$$

式(6)的第二项经过中心频率为 ω_c 的窄带带通滤波器, 得到

$$-2BJ_0(\varphi_s) \sin \varphi_0 J_1(\varphi_c) \cos \omega_c t \quad (7)$$

式(7)即为从输出信号中提取的载波, 其中 φ_c 和 φ_s 分别为载波和外界信号的幅度. 对于图 1 所示的光路, $\varphi_0 = \frac{2}{3}\pi$, $\sin \varphi_0 = \sqrt{3}/2 \neq 0$, 可见, 使用 3×3 耦合器时^[11], 输出信号 I 中具有角频率为 ω_c 的信号. 而传统的使用 2×2 耦合器的光路, $\varphi_0 = 0$, $\sin \varphi_0 = 0$, 所以输出信号 I 中没有角频率为 ω_c 的信号成分, 故无法提取出载波。

式(6)的第一和第三项经过中心频率为 ω_c 的窄带带通滤波器, 得到

$$-4P(\omega) B \cos \varphi_0 J_1(\varphi_c) \cos \omega_c t \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\varphi_s) \cos(2k+1)\omega_s t \quad (8)$$

$$-4P(\omega) B \sin \varphi_0 J_1(\varphi_c) \cos \omega_c t \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(\varphi_s) \cos 2k\omega_s t \quad (9)$$

式(8)与式(9)之和为实际获得的载波与真实载波之间的误差项, $P(\omega)$ 为窄带带通滤波器的衰减系

数.其中,只有角频率 $(2k+1)\omega_s, k=[0, \infty)$ 和 $2k\omega_s, k=[1, \infty)$ 在窄带带通滤波器的通带范围内的低频信号才能通过该滤波器.由于使用数字窄带带通滤波器,很方便将滤波器的通带设计的很小,所以只有角频率 ω_s 很小的信号会对提取的载波产生影响.图 1 所示的光纤传感器对频率为几 Hz 的振动信号不敏感,即角频率 ω_s 很小的外界振动信号,引起的相位变化幅度 φ_s 很小^[3],所以,从该系统的输出信号中利用窄带带通滤波器获得的载波受低频信号的影响很小.以下将通过计算机仿真研究低频信号对提取载波幅度的影响.

2 仿真

使用图形化编程语言 LabVIEW 生成式(1)所示的信号来模拟传感器的输出信号 I ,取 $A=0, B=1, \varphi_c=1.84, f_c=20$ kHz, $\varphi_0=\pi/3$, 信号采样率 $f=400$ kHz.取信号频率 $f_s=1$ Hz,幅度 $\varphi_s=0.1$ 时,输出信号 I (如图 2(a))通过一个通带为 19 999 Hz 到 20 001 Hz 的 5 阶 FIR 数字带通滤波器后,获得的载波如图 2(b).由于误差项式(8)和(9)的存在,提取的载波与真实载波存在误差,提取载波的峰值有低频的波动,图 2(b)中载波峰值的最大变化量为

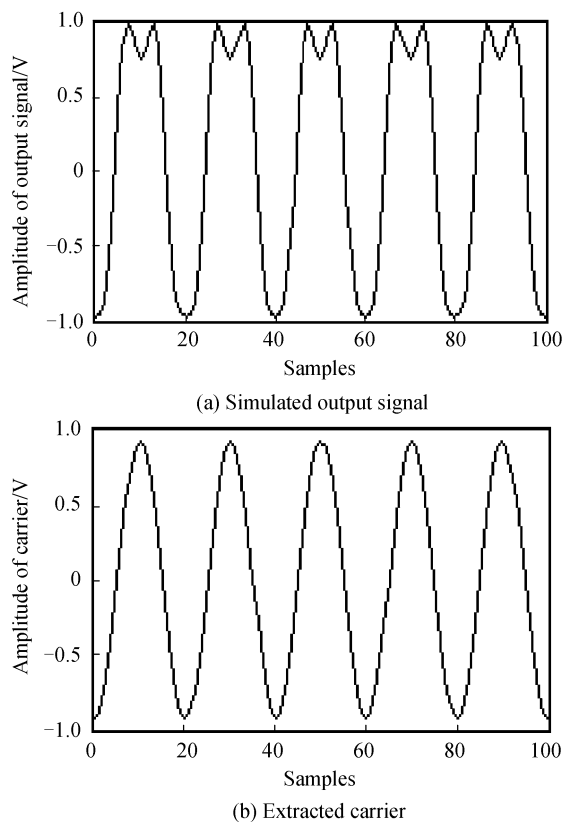


图 2 载波提取仿真信号
Fig. 2 Carrier extracting simulation

$E_{\max}(\varphi_s) = 0.0785$.为了使提取的载波更接近真实值,可以将提取的载波幅值进行归一化.

改变信号频率 f 和幅度 φ_s ,可以得到提取的载波随不同频率信号幅值的变化,其幅值的变化情况,如图 3.

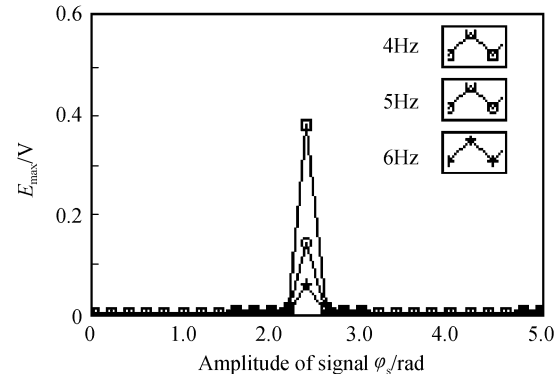


图 3 误差随信号频率和幅值 φ_s 的变化
Fig. 3 Deviation changing with signal frequency and amplitude

从图 3 可见,提取载波的幅值变化在信号幅度 $\varphi_s \rightarrow 2.4$ rad 处较大,原因是 $\varphi_s \rightarrow 2.4$ rad 时,式(6)中的系数 $J_0(\varphi_s) \rightarrow 0$,所以此时传感器输出信号中提取的载波幅值很小,误差项相对较大.当 φ_s 不在 2.4 附近时,误差很小,可以忽略.且随着信号频率 f 的增加,外界信号对提取的载波幅度的影响减小.当幅度为 2.4 rad 低频信号频率从 4 Hz 上升到 6 Hz 时,提取的载波幅度的变化两从 0.4 V 下降到 0.07 V,继续提高信号的频率将使得提取载波幅度的变化量迅速减小.可见,只有极低频的信号会对载波的提取产生影响.

3 实验

在法拉第旋转镜前的 PZT 上加载频率 $f_c=20$ kHz,幅度 $\varphi_c=1.84$ 的载波,在传感臂上用另一个 PZT 加载一个频率 $f_s=1$ kHz,幅度 $\varphi_s=1$ rad 的外界振动信号.用 1 MS/s 的采样率采集从输出端输出的信号,图 4(a)中显示前 100 个采样点;输出信号频谱如图 4(b),从频谱中可见,1 kHz 的信号及其各次倍频出现在载波的两侧旁瓣上.

图 4(c)为输出信号通过中心频率为 20 kHz,通带为 19 999~20 001 Hz 的窄带带通滤波器获得的载波信号,其频谱如图 4(d).用提取的载波进行 PGC 被动零差解调后,得到在传感臂上加载的 1 kHz 的扰动信号,前 5 000 个采样点如图 4(e);图 4(f)为扰动信号的频谱.

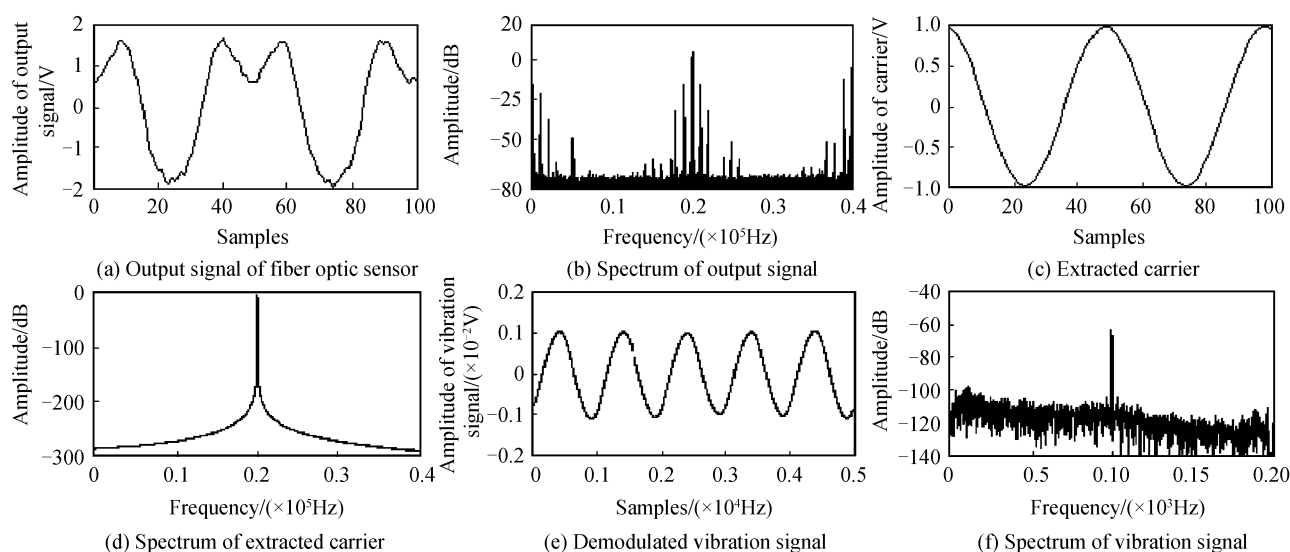


图4 同步载波提取方法的实验数据

Fig. 4 Experiment data using synchronous carrier extracting method

用 1MS/s 的采样率同步采集加载在相位调制器上的载波,用该载波进行 PGC 解调得到外界扰动信号,如图 5(a).图 4(e)中的信号与该信号相比,频率相同,只是幅值较小,这是因为同步采集的载波比从输出信号中提取的载波信号幅度大,这一问题很容易通过软件的方法调节提取的载波幅值的方法来解决.图 5(b)为直接采集载波进行解调得到的扰动信号的频谱解调.

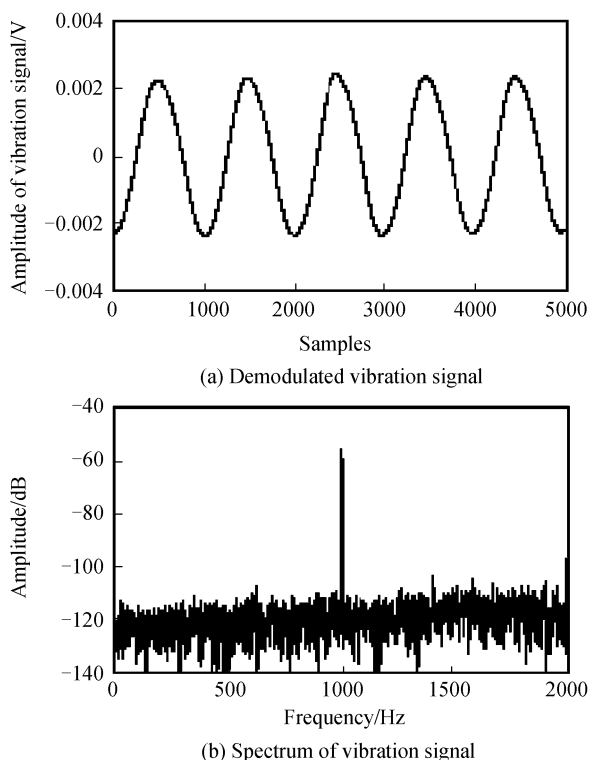


图5 直接采集载波进行解调得到的扰动信号

Fig. 5 Demodulated vibration signal using direct acquisition of carrier method

4 结论

本文使用 3×3 耦合器等光学元件构造了干涉型光纤传感器,理论分析表明:在使用 PGC 外调制方法进行载波调制时,输出信号中可以提取出加载在相位调制器上的载波信号.利用计算机仿真从模拟的输出信号中提取出了该载波,验证了该方法提取载波的有效性.同时,得到了提取载波的误差随外界信号频率和幅度变化的改变情况.研究发现,当外界信号幅度为 2.4 rad 时,提取载波的误差较大,且该误差随着外界信号频率的提高迅速降低,正好适用于对低频信号较不敏感的光纤传感器.最后,在实际构造的光路上进行了 PGC 调制,用动态提取出的载波进行 PGC 解调,得到了传感臂上加载的外界信号,进一步验证了该方法的有效性.该方法尤其适用于 PGC 调制端与解调端相距很远的情况.

参考文献

- [1] LIU Ying LI Yu-shen, XU Da-wei, *et al.* Research and realization of interferometric Michelson fiber-optic hydrophone [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, **24**(11): 30-32.
刘鹰,李玉深,徐大伟,等. 迈克尔逊干涉型光纤水听器研究与实现[J]. *传感器技术*, 2005, **24**(11): 30-32.
- [2] WANG Qian, LIU Yong-zhi, PENG Zhen-shou. Micro-vibration vector sensor with TWO all-fiber sensor arms [J]. *Infrared*, 2007, **28**(9): 9-12.
王茜,刘永智,彭增寿全光纤双传感臂微振动传感器[J]. *红外*, 2007, **28**(9): 9-12.
- [3] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000: 175.
- [4] DANDRIDGE A, TVETEN A B, GIALLORENZI T. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, **QE-18**(10): 1647-1653.
- [5] WANG Ze-feng, LUO Hong, XIONG Shui-dong, *et al.* Phase compensating detection method of interferometric fiber-optic

- hydrophones based on tuning the frequency of the laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 654-658.
- 王泽锋,罗洪,熊水东,等.基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 654-658.
- [6] HUANG Jian-hui, CAO Mang, LI Da-cheng, *et al.* Review of phase generated carrier demodulation techniques for interferometric fiber-optic sensor [J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(3): 228-231.
- 黄建辉,曹芒,李达成,等.用于干涉型光纤传感器的相位生成载波解调技术[J]. *光学技术*, 2000, **26**(3): 228-231.
- [7] WANG Ze-feng, HU Yong-ming, 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.
- [8] JING Zhen-guo, YIN Kai, ZHANG Min. Polarization induced fading eliminating technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2024-2028.
- 荆振国,殷锴,张敏,等.干涉型光纤传感器的消偏振衰落技术研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 2024-2028.
- [9] 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与改进[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 766-769.
- [10] SUN Yao, JIA Bo, ZHANG Tian-zhao. Position determination sensing system based on all-fiber interferometer with feedback loop [J]. *Transducer And Microsystem Technology*, 2006, **25**(1): 44-46.
- 孙尧,贾波,张天照.基于反馈环全光纤干涉的定位系统[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(1): 44-46.
- [11] PRIES R. Analysis of fiber interferometer utilizing 3×3 fiber coupler[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, **QE-18**(10): 1601-1603.

Synchronous Carrier Extracting Method Based Demodulation Scheme for Fiber Optic Sensor Using Phase Generated Carrier

ZHANG Yi, JIA Bo, XU Hai-yan, WU Hong-yan, XIAO Qian
(Optic-Fiber Research Center, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A Michelson interferometer based fiber optic sensor was constructed with the application of a 3×3 coupler, faraday rotator, and other optical elements. Phase generated carrier method was applied to modulate the laser. The constructed fiber disturbance sensor was used to a long-distance field safety monitoring. According to the analysis of the interferometer system output, a signal component with the same frequency of the carrier was found in the output signal. Consequently, the carrier signal could be extracted synchronously with a narrow-band band pass filter with center frequency being set to the carrier frequency. When the extracted carrier signal was used to passive homodyne demodulation procedure of phase generated carrier method, the external disturbance signal could be acquired. The method of synchronous carrier extraction was introduced, the feasibility of this method was obtained through theoretical derivation, and the correctness of this theory was authenticated through software simulation and experiment. The low frequency influence to the extracted carrier was also discussed, and the solution was given for the limit of the influence caused by the low frequency signal. This method can be applied especially in the condition when modulation is set far from the output signal to make it hard to acquire the carrier signal.

Key words: Fiber optics; Distributed fiber-optic sensor; Synchronous carrier extracting; Phase Generated Carrier(PGC) demodulation