

基于频率调制连续波的干涉型光纤声传感器信号检测技术

赵 锋¹ 郭 戈¹ 李 东¹ 王立新¹ 刘喜文¹ 杨 嵩²

¹中国石油天然气管道通信电力工程总公司, 河北 廊坊 065000

²华北航天工业学院, 河北 廊坊 065000

摘要 针对光纤干涉仪存在的相位衰落问题,讨论了基于正弦波形的频率调制连续波(FMCW)和锯齿波 FMCW 两种干涉型光纤声传感器的信号检测原理,并给出了数字化信号解调方案。采用 7.5 m 臂差的光纤声传感器和具备调频功能的半导体激光器,对 10 kHz 正弦波 FMCW 和锯齿波 FMCW 两种调频方式进行了信号解调实验对比。解调结果表明,两种调制解调方案均能稳定检测出加在声传感器上的模拟声信号,消除了光纤干涉仪的相位衰落。但在实际工程应用中,与正弦波 FMCW 检测方案相比,锯齿波 FMCW 方案无需检测混频信号的初始相位,检测灵敏度高且稳定,算法实现更为简单,而且使用不同臂差的光纤传感器可实现传感器的频分复用。

关键词 光纤光学; 锯齿波形的频率调制连续波(FMCW); 正弦波 FMCW; 相位衰落; 光纤声传感器

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.080602

Acoustic Signal Detection Technology Based on the Frequency-Modulated Continuous Wave Interferometric Fiber Acoustic Sensor

Zhao Feng¹ Guo Ge¹ Li Dong¹ Wang Lixin¹ Liu Xiwen¹ Yang Song²

¹China Petroleum & Gas Pipeline Telecommunication & Electricity Engineering Corporation, Langfang, Hebei 065000, China

²North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang, Hebei 065000, China

Abstract For the phase induced signal fading, the principles of interferometric fiber acoustic sensors based on sinusoidal-wave frequency-modulated continuous wave (FMCW) and sawtooth-wave FMCW are introduced, and two corresponding digital demodulation methods are described. Based on the principles an experimental system is built including a fiber acoustic sensor with 7.5 m arm-difference and an FMCW laser source. Digital signal demodulations under 10 kHz sinusoidal-wave FMCW and 10 kHz sawtooth-wave FMCW are finished and comparative analysis between the demodulation results is performed. The experimental results show that both of the demodulation methods can detect the analog acoustic signal added to the acoustic sensor and eliminate the phase induced signal fading phenomenon of fiber interferometer. But the one based on sawtooth-wave FMCW possesses high and stable sensitivity with a simpler algorithm. Furthermore in this method a frequency division multiplexing system can be easily got by changing the arm difference of the fiber sensor.

Key words fiber optics; sawtooth-wave frequency-modulated continuous wave (FMCW); sinusoidal-wave FMCW; phase induced signal fading; interferometric fiber acoustic sensor

OCIS codes 060.2370; 060.2630; 120.5060; 120.7280

1 引言

干涉型光纤声传感器存在相位衰落,导致输出信号信噪比随机涨落,甚至信号完全消隐。因此消除相位衰落、实现信号的稳定检测,是提高光纤声传感器性能、使其走向实用化的关键技术之一。国内外众多学者和专家对无源抗相位衰落检测技术进行了深入研究,包括 3×3 耦合器多相检测、远程匹配零差解调和相位

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-07; 网络出版日期: 2014-07-23

作者简介: 赵 锋(1978—),男,硕士,工程师,主要从事光纤传感及油气管道安全监测方面的研究。

E-mail: tx_zhaofeng@cnpc.com.cn

载波(PGC)调制解调^[1-8],其中基于连续波频率调制(FMCW)来调制光频实现不等臂干涉仪相位载波的 PGC 调制解调系统,无需在干涉仪中加任何器件,系统可以实现全光检测,且光路结构简单。

根据调制波形的不同,FMCW可分为锯齿波 FMCW、三角波 FMCW 和正弦波 FMCW。其中,正弦波 FMCW 对激光器调制性能要求较低,在光纤传感中已有广泛应用,如光纤水听器的 PGC 调制解调方案就是用正弦波 FMCW 有效地消除了干涉相位衰落现象^[2];而锯齿波和三角波 FMCW 属于线性调频连续波(LFM-CW)^[9],这种调制方式对激光器频率调制性能要求较高。随着半导体激光器调制性能的提高,LFMCW 在光纤传感器领域的应用将会越来越广泛。

本文对基于锯齿波 FMCW 和正弦波 FMCW 两种调制方式的干涉型声传感器的传感原理进行了理论分析,并提出了锯齿波 FMCW 干涉型声传感器的解调方案,与正弦波 FMCW 解调方案进行了对比,实验室解调实验表明两种调制均能有效消除相位衰落,但在算法实现和传感器复用上,锯齿波 FMCW 解调方案更具优势。

2 FMCW 干涉型光纤声传感器

光纤声传感器采用迈克耳孙干涉仪结构,使用法拉第旋转镜消除偏振衰落现象。如图 1 所示,激光经调制后,经光隔离器进入迈克耳孙干涉仪的 3 dB 耦合器,分束后分别进入传感臂和参考臂,经末端法拉第旋转镜反射后返回耦合器实现干涉,激光通过传感臂时将受到外界声信号 $\phi_s(t)$ 的调制。

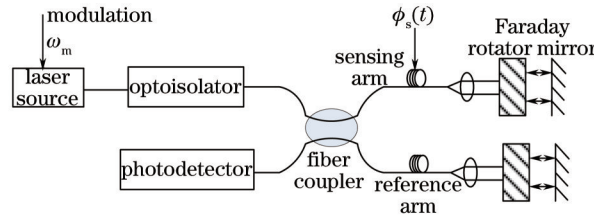


图 1 光纤声传感器结构

Fig.1 Structure of the interferometric fiber acoustic sensor

干涉仪输出信号光强可表示为

$$I = I_0 \{1 + V \cos[\phi(t) + \phi_s(t) + \phi_n(t)]\}, \quad (1)$$

式中 I_0 为干涉信号的平均光强, V 为干涉信号的可见度, $\phi(t)$ 为调制光源产生的相位差, $\phi_s(t)$ 为外界声信号作用于干涉仪产生的相位差, $\phi_n(t)$ 为外界环境影响产生的相位差和初始相位差之和。

2.1 正弦波 FMCW 光纤传感原理

使用正弦波调制激光器时,参考光和信号光角频率可表示为^[9]

$$\begin{aligned} \omega_1(t) &= \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \sin(\omega_m t), \\ \omega_2(\tau, t) &= \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \sin[\omega_m(t - \tau)]. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 ω_0 为激光平均角频率, $\Delta\omega$ 为角频率调制范围, ω_m 为正弦波调制信号角频率, $\tau = 2nl/c_0$ 为干涉仪臂差 l 引起的信号光相对于参考光的时延, n 为干涉仪光路的折射率, c_0 为真空中光速。

参考光和信号光相位分别为

$$\begin{aligned} \phi_1(t) &= \omega_0 t - \frac{\Delta\omega}{2\omega_m} \cos(\omega_m t) + \phi_0, \\ \phi_2(\tau, t) &= \omega_0(t - \tau) - \frac{\Delta\omega}{2\omega_m} \cos[\omega_m(t - \tau)] + \phi_0, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 ϕ_0 为光波初相。

因此,由调制光源产生的相位差为

$$\phi(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t) = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \sin \frac{\omega_m \tau}{2} \sin \left[\omega_m \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] + \omega_0 \tau. \quad (4)$$

干涉信号可表示为

$$\begin{aligned}
I &= I_0 \{1 + V \cos[\phi(t) + \phi_s(t) + \phi_n(t)]\} = I_0 \left\{1 + V \cos\left[\frac{\Delta\omega}{\omega_m} \sin\frac{\omega_m \tau}{2} \sin\left[\omega_m\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right] + \phi_s(t) + \phi_n(t) + \omega_0 \tau\right]\right\} \\
&= I_0 \left\{1 + V \cos\left[C \sin\left[\omega_m\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right]\right] + \phi_s(t) + \phi_n(t) + \omega_0 \tau\right\}, \quad (5)
\end{aligned}$$

式中 $C = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \sin\frac{\omega_m \tau}{2}$ 反映干涉信号的调制深度, 由于实际应用中 $\omega_m \tau/2$ 很小, $\sin\frac{\omega_m \tau}{2} = \frac{\omega_m \tau}{2}$, 故 $C = \frac{\Delta\omega \tau}{2}$ 。

通过一定的解调算法对(5)式进行解调, 可获得声信号 $\phi_s(t)$ 。正弦波调制激光的角频率及干涉信号拍频示意图如图2所示。其中 T_m' 表示正弦波调制信号周期。

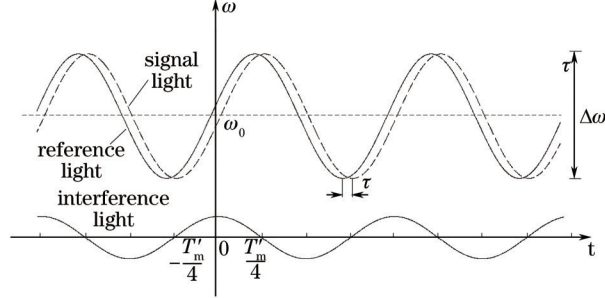


图2 正弦波调制激光的角频率及干涉信号拍频

Fig.2 Angular frequency of light wave and frequency of interference sinusoidal on sinusoidal-wave FMCW

2.2 锯齿波 FMCW 光纤传感原理

使用锯齿波 FMCW 时, 在一个锯齿波周期 $(-T_m/2 + \tau) \sim T_m/2$ 内, 参考光和信号光角频率可表示为^[9]

$$\begin{aligned}
\omega_1(t) &= \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{T_m} t = \omega_0 + \alpha t, \\
\omega_2(\tau, t) &= \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{T_m} (t - \tau) = \omega_0 + \alpha(t - \tau), \quad (6)
\end{aligned}$$

式中 ω_0 , $\Delta\omega$ 和 τ 的含义与 2.1 节中相同, 为激光角频率调制范围, T_m 是锯齿波调制信号周期, $\alpha = \Delta\omega/T_m$ 为激光角频率调制速率。

参考光和信号光相位分别为

$$\begin{aligned}
\phi_1(t) &= \frac{1}{2} \alpha t^2 + \omega_0 t + \phi_0, \\
\phi_2(\tau, t) &= \frac{1}{2} \alpha (t - \tau)^2 + \omega_0 (t - \tau) + \phi_0. \quad (7)
\end{aligned}$$

因此, 由调制光源产生的相位差为

$$\phi(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t) = \alpha \tau t - \frac{\alpha \tau^2}{2} + \omega_0 \tau \approx \alpha \tau t + \omega_0 \tau. \quad (8)$$

干涉信号可表示为

$$I = I_0 \{1 + V \cos[\phi(t) + \phi_s(t) + \phi_n(t)]\} = I_0 \{1 + V \cos[\alpha \tau t + \phi_s(t) + \phi_n(t) + \omega_0 \tau]\}. \quad (9)$$

(9) 式为一个锯齿波周期中的干涉信号, 整个时间轴上的干涉信号表达式为^[9-10]

$$I(\tau, t) = I_0 \left\{1 + \left\{VT_m \cos[\alpha \tau t + \phi(t)] \text{rect}_{T_m}(t) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_m)\right\}\right\} = I_0 \left\{1 + \left\{VT_m \cos[\omega_b t + \phi(t)] \text{rect}_{T_m}(t) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_m)\right\}\right\}. \quad (10)$$

式中 $\text{rect}_{T_m}(t) = \begin{cases} 1/T_m, & |t| \leq T/2, \\ 0, & |t| > T/2, \end{cases}$ $\omega_b = \alpha \tau = \frac{2nL}{c_0} \cdot \frac{\Delta\omega}{T_m}$ 为拍频信号的角频率, 与干涉仪臂差、锯齿波调制信号幅度和周期有关。

调节锯齿波信号幅度或改变干涉仪臂差, 使拍频信号频率为锯齿波频率的整数倍时, 干涉信号是单频信号, 对其做中心频率为 $\omega_b/2\pi$ 的带通滤波后得到的信号为

$$I = I_0 V \cos[\omega_b t + \phi_s(t) + \phi_n(t) + \omega_0 \tau]. \quad (11)$$

对(11)式进行解调, 可获得声信号 $\phi_s(t)$ 。图3为锯齿波调制激光的角频率及干涉信号拍频图。

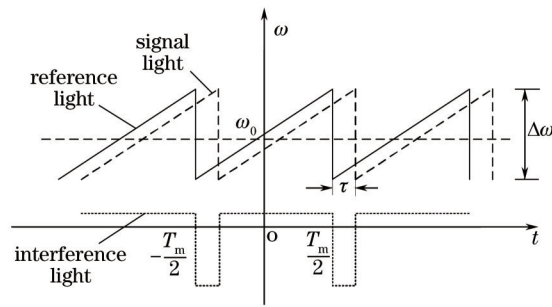


图3 锯齿波调制激光的角频率及干涉信号拍频

Fig.3 Angular frequency of light wave and frequency of interference signal on sawtooth-wave FMCW

3 数字化信号解调方案

3.1 正弦波 FMCW 解调方案

对(5)式进行解调可获得声信号 $\phi_s(t)$, 信号数字化解调流程如图4所示^[1]。

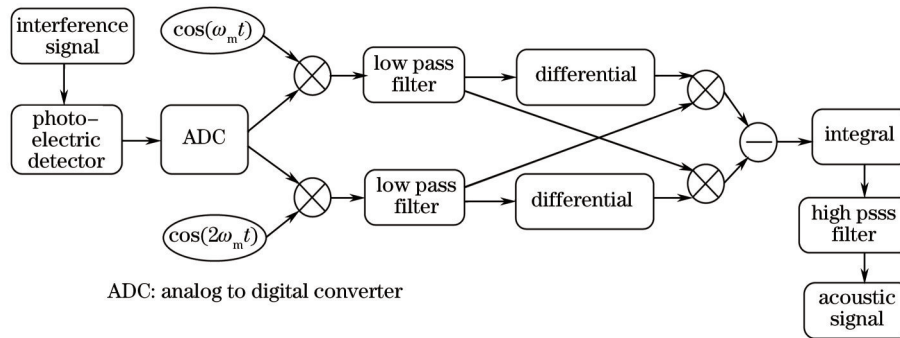


图4 正弦波 FMCW 调制解调流程

Fig.4 Signal demodulation schematic for sinusoidal-wave FMCW

3.2 锯齿波 FMCW 解调方案

对(11)式进行解调可获得声信号 $\phi_s(t)$, 信号数字化解调流程如图5所示^[10-11]。

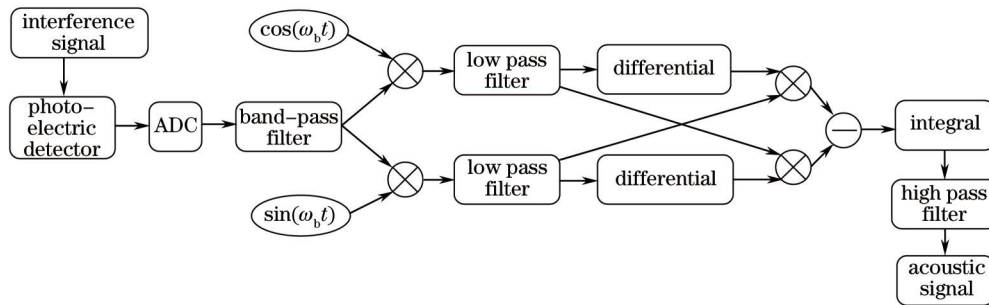


图5 锯齿波 FMCW 调制解调流程

Fig.5 Signal demodulation schematic for sawtooth-wave FMCW

4 实验与结果分析

4.1 实验基础

实验所用光纤传感器结构如图1所示,光源为半导体激光器,光纤声传感器两臂臂差为7.5 m,将传感臂中的一段光纤缠绕在压电陶瓷环上构成相位调制器,对其加频率为1200 Hz、幅度为0.3 V的正弦电压信号以模拟声信号。

4.2 正弦波 FMCW 解调结果

对半导体激光器加频率为10 kHz的正弦波调制信号,调节正弦波调制信号幅度,使 $C \approx 2.37^{[1]}$ 。使用 NI

数据采集卡采集光电转换之后的干涉信号,并按图4所示解调流程进行解调,获得声信号及其频谱如图6所示。从图6可知,正弦波 FMCW 可以无失真地解调出加在相位调制器上的声信号。

但在解调过程中发现,对同一段正弦波 FMCW 干涉信号,改变干涉信号与混频信号 $\cos(\omega_0 t)$ 、 $\cos(2\omega_0 t)$ 的相对相位,解调的声信号幅度也会变化,如图7所示。

进一步地,使干涉信号与混频信号的相对相位在 $0\sim 2\pi$ 之间变化,对同一段干涉信号进行解调,获得声信号幅度与相对相位之间的关系如图8所示。可以看出,声信号解调幅度与相对相位呈周期性变化,周期为 π ; 相对相位取某些值时,解调声信号幅度达到最大值,获得最大检测灵敏度。通过一定的算法计算得到该相对相位值,可实现声信号的高灵敏度检测,但相对相位的计算误差将对灵敏度产生一定影响。

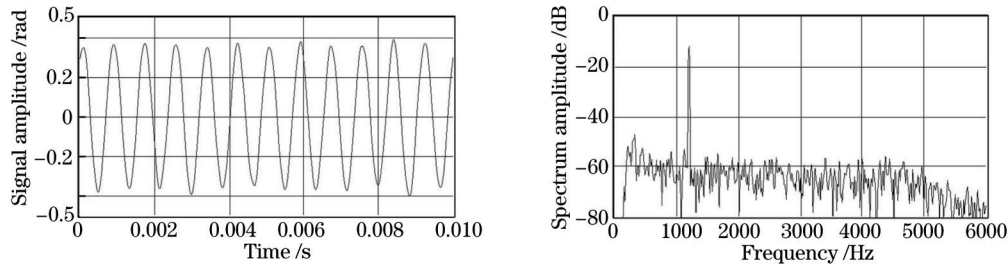


图6 正弦波 FMCW 解调的声信号及频谱

Fig.6 Acoustic signal demodulated from sinusoidal-wave FMCW and its spectrum

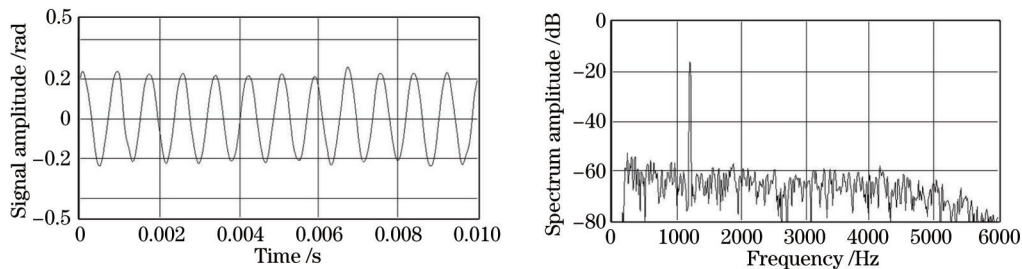


图7 改变干涉和混频信号的相对相位后正弦波 FMCW 解调的声信号及频谱

Fig.7 Acoustic signal demodulated from sine-wave FMCW and its spectrum after changing the relative phase between interference and mix frequency signal

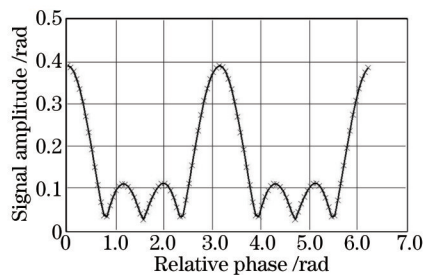


图8 正弦波 FMCW 声信号解调幅度与相对相位的关系

Fig.8 Signal amplitude-relative phase curve based on sinusoidal-wave FMCW

4.3 锯齿波 FMCW 解调结果

对半导体激光器加频率为 10 kHz 的锯齿波调制信号,使用 NI 数据采集卡采集干涉信号,调节锯齿波调制信号幅度,使干涉信号能量集中在 10 kHz 上。按图5所示锯齿波 FMCW 解调流程进行解调,获得声信号及其频谱如图9所示。

理论分析和多次解调实验表明,锯齿波 FMCW 同样可无失真解调出加在相位调制器上的声信号。但与正弦波 FMCW 解调不同,锯齿波 FMCW 声信号检测幅度是一个常数,不受干涉信号与混频信号 $\cos(\omega_0 t)$ 、 $\sin(\omega_0 t)$ 的相对相位影响,检测灵敏度始终处于最大值状态,如图10所示。

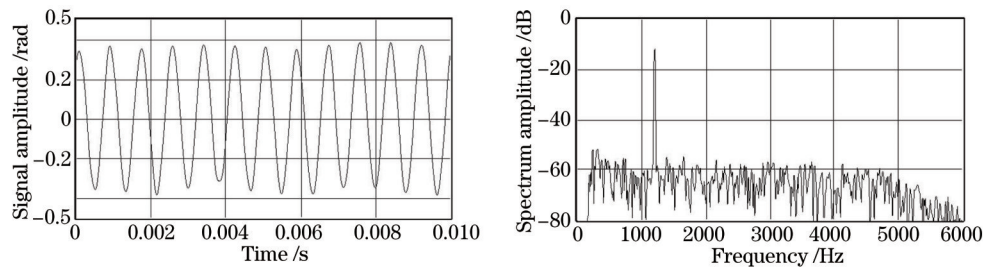


图9 锯齿波 FMCW 解调的声信号及频谱

Fig.9 Acoustic signal demodulated from sawtooth-wave FMCW and its spectrum

4.4 两种调频方式的实验结果对比

解调实验结果表明,正弦波和锯齿波两种调频方式均能无失真地检测出加在声传感器上的声信号,消除相位衰落现象,实现声信号的稳定检测。

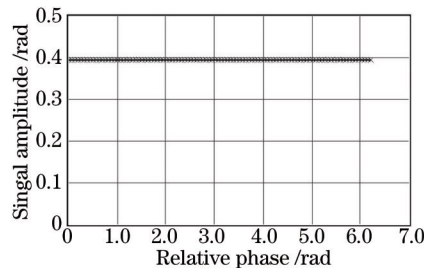


图10 锯齿波声信号解调幅度与相对相位的关系曲线

Fig.10 Signal amplitude–relative phase curve based on sawtooth-wave FMCW

正弦波 FMCW 干涉仪的声信号检测灵敏度受干涉信号与混频信号之间相对相位的影响,通过一定的算法可计算得到该相对相位,据此调节混频信号 $\cos(\omega_0 t)$ 、 $\cos(2\omega_0 t)$ 的初相,将灵敏度提高到最大值附近,实现声信号的稳定检测,但由于相对相位计算会存在一定的误差,这将对灵敏度产生影响;锯齿波 FMCW 干涉仪声信号检测则完全不受相对相位影响,无需计算相对相位,算法实现更为简单,但对光源线性频率调制性能要求较高。

5 结 论

对正弦波 FMCW 和锯齿波 FMCW 干涉型光纤传感器的声信号检测原理和干涉信号特征进行了探讨,给出两种调频方式的数字化信号解调方案,并进行了实际干涉信号的解调实验。解调实验表明,与正弦波 FMCW 相比,锯齿波 FMCW 信号检测灵敏度不受干涉信号与混频信号相对相位的影响,灵敏度更稳定,解调算法实现更为简单,而且使用不同臂差干涉仪即可实现传感器的频分复用,但要求光源具有较高的线性频率调制性能。随着激光器频率调制性能的提高,锯齿波 FMCW 干涉型光纤传感器在实际应用中将具有明显的优势。

参 考 文 献

- 1 Ni Ming. Investigation of the Key Technologies of Fiber Optic Hydrophone[D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 57–69.
倪 明. 光纤水听器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2003. 57–69.
- 2 Ni Ming, Xiong Shuidong, Meng Zhou. 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. 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.
- 3 Xia Dongming, Lou Shuqin, Wen Xiaodong, *et al.*. PGC method using in fiber-optic interference sensors[J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(5): 47–50.
夏东明, 娄淑琴, 温晓栋, 等. 干涉型光纤传感器相位载波解调技术研究[J]. 光电技术应用, 2011, 26(5): 47–50.
- 4 Bai Linhou, Liao Yanbiao, 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.
- 5 Cao Chunyan, Hu Zhengliang, Xiong Shuidong, *et al.*. Suppression of rayleigh scattering induced coherent noise in remotely interrogated fiber-optic hydrophones[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005005.
- 曹春燕, 胡正良, 熊水东, 等. 光纤水听器远程传输中相干瑞利噪声的抑制[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005005.
- 6 Tang Weijie, Fu Lei, Chen Shufen, *et al.*. Realization of measuring micro-vibration based on phase generated carrier modulation-demodulation method and interference analysis[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0214001.
- 唐伟杰, 付雷, 陈淑芬, 等. 相位生成载波调制解调法测量微振动的实现及干扰分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0214001.
- 7 Wang Lin, He Jun, Li Fang, *et al.*. Ultra low frequency phase generated carrier demodulation technique for fiber sensors [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405001.
- 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方法[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405001.
- 8 Liu Zhibo, Li Yang, Su Yun, *et al.*. Measurement and verification of the modulation coefficient of the optical phase modulator based on piezoelectric[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706014.
- 刘志波, 李阳, 苏耘, 等. 基于压电陶瓷的光相位调制器的调制系数测量及验证[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706014.
- 9 Jesse Zheng. Optical Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) Interferometry[M]. New York: Springer, 2005. 18-56.
- 10 Li Chuang, Ni Ming. Demodulation technology of the sawtooth-wave optical FMCW fiber acoustic sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(5): 688-691.
- 李闯, 倪明. 锯齿波FMCW光纤声传感器信号解调技术[J]. 压电与声光, 2012, 34(5): 688-691.
- 11 Zhang Nan. Research on Optical Heterodyne Technique and Time-Division-Multiplexing of Large-Scale Fiber-Optic Hydrophones Arrays[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- 张楠. 大规模光纤水听器阵列光学外差及时分复用技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.