

# PGC 调制-解调光纤水声传感器的 研究与实现\*

周效东 汤伟中 周 文

(浙江大学信息与电子工程学系 杭州 310027)

**提要** 对适用于干涉型光纤水声传感器阵列的 PGC(相位载波)调制-解调单元光纤水声传感器进行了研究,分析得出了光纤水声传感器 PGC 检测新的带宽要求;采用半导体激光器光源及其光频率调制技术,研制成功了高灵敏度的 PGC 调制-解调单元光纤水声传感器,获得了稳定的水声信号,并在国家水声一级计量站完成了测试。

**关键词** 光纤,干涉仪,水声,信号检测

光纤水声传感器是 70 年代末发展起来的一种新型水声传感器。其中干涉型光纤水声传感器由于灵敏度高、便于组阵而成为最常用的光纤传感器结构和主要研究方向。在多种干涉型光纤传感器的检测技术中,相位载波(Phase Generation Carrier—PGC)方式<sup>[1]</sup>适于组阵,并能从根本上避免有源相位跟踪技术<sup>[2]</sup>所需的有源补偿系统,减小了复用的复杂性,提高了系统的实用价值,在远距离、恶劣环境、无源检测和复用传感系统中有很大的应用前景。本文对这一检测技术的检测带宽进行新的理论分析,研制成功了马赫-陈德尔干涉仪型的 PGC 检测单元光纤水声传感器,并在国家水声一级计量站取得了较好的测试结果。

## 1 PGC 调制-解调原理

干涉型光纤水声传感器的 PGC 检测方式<sup>[1]</sup>是在光纤干涉仪中引入检测信号带宽外的某一频率的大幅度相位调制信号,通过分离随机漂移与信号项,消除随机漂移对传感信号的影响。将圆频率为  $\omega_m$ , 信号幅度为  $C$  的相位调制信号加到如图 1 所示的马赫-陈德尔光纤干涉仪上,则干涉仪的检测信号及其 Bessel 函数展开为

$$I = A + B \cos[C \cos \omega_m t + \varphi(t)] =$$

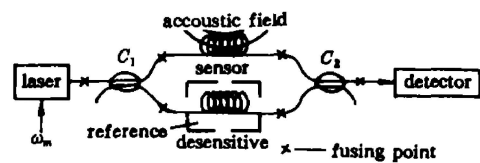


图 1 PGC 检测光纤水声传感器的光路示意图

$C_1, C_2$  为光纤耦合器

Fig. 1 The optical scheme of the PGC detection

fiber-optic acoustic sensor

$C_1, C_2$  are fiber couplers

\* 国家自然科学基金资助项目(69702003)。

收稿日期: 1997-01-27; 收到修改稿日期: 1997-06-02

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

其中  $A$  为直流项,  $B$  为与光纤干涉仪的输入光强、光纤耦合器的分光比及干涉信号的可见度有关的项,  $\varphi(t) = D \cos \omega_s t + \varphi_0(t)$  包括干涉仪的低频传感信号和环境扰动引起的相位随机波动  $\varphi_0(t)$ ,  $J_i(C)$  为第  $i$  阶 Bessel 函数。

通过相干检测方式, 将(1)式信号分别乘以  $G \cos \omega_m t$  和  $H \cos 2\omega_m t$  (其中  $G, H$  为信号幅度), 低通滤波后得到  $\sin \varphi(t)$  和  $\cos \varphi(t)$  的项。两者分别微分并交叉相乘, 相减得到  $B^2 G H J_1(C) J_2(C) \dot{\varphi}(t)$ , 积分即可得到与传感信号  $\varphi(t)$  成正比的信号。此时导致信号衰落的漂移项  $\varphi_0(t)$  变成了一个直流项的变化, 经过高通滤波后可以获得稳定的交变传感信号。

## 2 检测带宽设计分析

PGC 信号检测系统所需要的最小带宽不同于真正的信号带宽, 具体分析如下:

对于某一单频水声信号, 在 PGC 检测中检测得的信号为  $\varphi(t) = D \cos \omega_s t + \varphi_0(t)$ , 其中  $\omega_s$  为水声信号的圆频率,  $D$  为单频水声信号引起的最大相偏。将  $\cos \varphi(t)$  用 Bessel 函数展开并利用该函数的性质得到

$$\cos \varphi(t) = \cos [D \cos \omega_s t + \varphi_0(t)] = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(D) \cos \left[ l \omega_s t + \varphi_0(t) + \frac{1}{2} l \pi \right] \quad (2)$$

从(2)式可见, 在 PGC 检测信号的频谱中含有无穷多个所传感的单频声信号的高次频率分量, 理论上 PGC 检测系统的带宽不同于真正的信号带宽, 而应为无限宽。根据 Bessel 函数的性质, 当  $D$  一定时, 由于各边频的幅度正比于  $J_l(D)$ , 随着  $l$  的增大而减小, 如果忽略振幅很小的边带分量, 实际检测中的信号带宽是有限的。

根据水声信号检测要求的质量, 一个比较精确的标准是: 当边频幅度与零频信号相比小于某一值  $\varepsilon$  时可以略去不计。根据 Bessel 函数的性质, 当  $l > D + 1$  时,  $J_l(D)$  恒小于 0.1。为了方便起见, 可用下式进行估算

$$B_f = 2(D + 2)f_s \quad (3)$$

这里  $f_s$  为水声信号的频率。根据(3)式取信号带宽, 可使  $\varepsilon$  值在 0.1 和 0.01 之间,  $D$  值越小,  $\varepsilon$  值越接近于 0.01<sup>[3]</sup>。该式表明水声信号越大, 水声信号的频率越高, 为了不失真地检测水声信号, PGC 检测系统的带宽要求就越高。

光纤水声传感器往往有极高的灵敏度, 其灵敏度由光电检测本身可检测到的最小光信号和传感头对声压的敏感度两方面决定。其中光纤干涉仪为小信号探测, 如 PGC 方式可检测的最小光信号在  $10^{-5}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$  左右。当传感信号引起的最大相偏  $D < 1.0$  rad 时,  $6f_s$  的频带宽度即可满足不失真信号检测的要求。

对于有  $n$  个频率的单频水声信号叠加的一般信号, 各频率水声信号引起的最大相偏分别为  $D_1, D_2, \dots, D_n$ , 在 PGC 检测中的信号为

$$\varphi(t) = D_1 \cos \omega_1 t + D_2 \cos \omega_2 t + \dots + D_n \cos \omega_n t + \varphi_0(t) \quad (4)$$

在(4)式中利用信号的复数表示, 得到

$$\cos \varphi(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(D_1) J_k(D_2) \dots J_l(D_n) \times$$

$$\cos[i\omega_1 t + k\omega_2 t + \dots + l\omega_n t + \varphi_0(t) + (i+k+\dots+l)\pi/2] \quad (5)$$

可见当水声信号为多频信号时,水声信号的频谱中除了存在无穷多个频率为  $i\omega_1, k\omega_2, \dots, l\omega_n$  的分量之外,还存在无穷多个交叉调制分量。由于各 Bessel 函数的分量随  $i, k, l$  的增大而衰减,频谱中的主要功率仍集中在零频附近。这时检测系统的频带宽度要求与通信中的频谱分量类似。通信中的实践已表明,复杂信号调制时,大多数调频波占有的有效频谱宽度仍可用单音调制时的公式表示,仅需将其中的  $f$ , 用复杂调制信号中的最高频率取代,最大相偏用复杂调制信号中对应的最大相偏  $\Delta\omega_{\max}$  取代即可<sup>[3]</sup>,因此复杂水声信号检测中的频宽可以根据下式估算

$$B_f = 2 \left( \frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_{\max}} + 2 \right) f_{\max} \quad (6)$$

其中

$$\Delta\omega_{\max} = \left| \frac{d\varphi(t)}{dt} \right|_{\max} = D_1\omega_1 + D_2\omega_2 + \dots + D_n\omega_n$$

由此可见,为了基本不失真地恢复光纤水声传感器的信号,PGC 调制-解调方式对检测系统的带宽提出了较高的要求。以上结果即为本文 PGC 检测电路带宽设计的依据。

### 3 PGC 检测光纤水声传感器的实现

光纤水声传感器光路系统如图 1 所示。图中干涉仪为略不平衡式的马赫-陈德尔光纤干涉仪,由半导体激光器加电流频调引入 50 kHz 的信号调制频率。光纤水声传感器中的两只光纤耦合器均为 3 dB 光纤定向耦合器,将激光均匀地分到长度均为 10 m 左右的光纤干涉仪的两臂,其中传感臂绕在传感头结构上传感声信号,参考臂则进行声场屏蔽。光纤水声传感器外形结构如图 2 所示。根据 PGC 检测原理设计和制做的信号检测电路带宽设计满足(3)式和(6)式的信号带宽要求,研制的光纤水声传感器的检测信号带宽为 50 Hz~5 kHz。

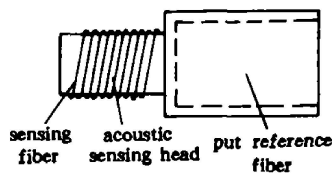


图 2 光纤水声传感器的传感头外形图

Fig. 2 The structural diagram of the fiber-optic acoustic sensor

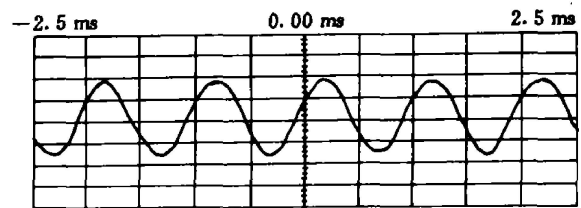


图 3 光纤水声传感器检测得的水声信号

Fig. 3 The acoustic signal detected by the fiber-optic sensor

由于干涉型光纤传感器是一个光路传感与电路检测的综合系统,在实际调试中的许多因素,例如激光器噪声、光纤耦合器的分光比偏差、外界电磁干扰、电源噪声、电路噪声以及环境噪声都会影响光纤传感器的检测性能。因此在实际制作中要采用电磁屏蔽抗电磁干扰,并应选用窄线宽低噪声的半导体激光器和质量较好的光电器件和电子元件。

光纤水声传感器在国家一级水声计量站进行了测试。检测结果表明光纤水声传感器有很高的水声检测灵敏度,在 630 Hz 时达到了  $-134.1$  dB (0 dB 为  $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ )。部分测试数据见表 1。图 3 为检测得的水声信号。

表 1 光纤水声传感器电压灵敏度及相位测试数据(0 dB 为 1 V/ $\mu$ Pa)

Table 1 The tested data of the fiber-optic hydrophone's voltage sensibility and phase

$f$ /Hz	160	315	630	1000	1600	2000	3150
$M_j$ /dB	-136.0	-129.7	-134.1	-131.0	-132.3	-135.0	-138.1

## 参 考 文 献

- 1 Dandridge A. , Tveten A. B. , Giallorenzi T. G. . Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier. *IEEE J. Quant. Electron.* , 1982, QE-18(10) : 1647~1653
- 2 Fritsch K. , Adamovsky G. . Simple circuit for feedback stabilization of a single-mode optical fiber interferometer. *Review of Science Instrument* , 1981, 52(7) : 996~1000
- 3 Xie Jiakui, Xuan Yueqing. *Electronic circuit*. Beijing : High Education Press, 1987, 465~476 (in Chinese)

## The Realization of PGC Scheme Interferometric Fiber-optic Sensor

Zhou Xiaodong Tang Weizhong Zhou Wen

*(The Information & Electronic Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)*

**Abstract** This paper presents the research on the interferometric fiber-optic sensor's PGC scheme which is suitable for the construction of the acoustic sensor array. The new bandwidth requirement of the scheme is analyzed, and high sensitivity fiber-optic acoustic sensor detected by PGC scheme is successfully developed with LD and its frequency modulating technique. The stabilized acoustic signal is obtained by the sensor in the state's first class acoustic measurement station.

**Key words** fiber, interferometer, acoustic, signal detect