

文章编号: 1001-3806(2015)01-0001-05

水面声光耦合光纤水听器的抗波浪解调方法

李 栋, 周金海, 瞿柯林, 祝艳宏, 金晓峰*

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 为了减弱基于水面声光耦合的光纤水听器水面波动对解调信号造成的幅度衰落, 采用了利用检测信号臂光强度信息补偿解调信号幅度的方法。从理论上推导了该方法修正解调信号的过程, 并对该过程进行了数值仿真, 同时实际搭建光纤水听器探测系统, 利用 $\pi/2$ 相位解调法对水面恒定振动信号进行了实验验证。结果表明, 相比原始解调信号, 修正后的信号幅度基本稳定, 幅度值整体提高 5dB, 解调信号失真度减小, 相位噪声得到抑制, 信噪比得到提高, 可辨认信号时间长度扩展为原来的 3.5 倍。该方案能有效克服由水面波动引起的解调信号衰落现象, 信号质量得到优化, 系统抗波浪解调能力得到提高。

关键词: 光纤光学; 光纤水听器; 水声测量; 抗波浪解调; $\pi/2$ 相位解调法

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.01.001

Anti-wave demodulation method for acousto-optic coupling fiber hydrophones on the water surface

LI Dong, ZHOU Jinhai, QU Kelin, ZHU Yanhong, JIN Xiaofeng

(Department of Information & Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A novel method was put forward to weaken the signal fading phenomenon of an acousto-optic coupling fiber optic hydrophone on the water surface when the water fluctuates. The method compensated the signal amplitude by detecting the light intensity of the signal arm. The amendment process of demodulation signal was analysed in theory and by numerical simulation. A fiber optic hydrophone system based on $\pi/2$ phase demodulation technique was constructed to test the water constant vibration signal. The results show that, compared with the original demodulation signal, the amplitude of the amended signal is stabilized and increased by 5dB wholly. The distortion degree is reduced, the phase noise is suppressed, the signal to noise ratio is improved and the time range of the identifiable signal is extended to 3.5 times. This method can overcome the signal fading phenomenon caused by surface fluctuation effectively, optimize the signal quality and enhance the ability of anti-wave demodulation for the system.

Key words: fiber optics; fiber optic hydrophone; underwater acoustic measurement; anti-wave demodulation; $\pi/2$ phase demodulation method

引 言

20 世纪 70 年代, 伴随着光纤通信技术的发展, 光纤传感技术以其独特的优越性, 迅速发展成为一种新型的传感技术, 而光纤水听器作为光纤传感器的一个典型研究领域, 更是受到了研究者的青

睐^[1-2], 其在资源勘探、海洋环境测量以及军事潜艇等领域都有广泛的应用^[3-4]。目前研究的重点之一是水声测量, 其关键技术是尽可能无失真地检测水下振动信号^[5]。

传统的光纤水听器需要依靠浸入水中的传感头将声波信号转化为光信号, 但因此也限制了光纤水听器在大范围海底表面遥感以及复杂海底情况下的使用^[6-8]。为了提高光纤水听器的灵活性和机动性, 美国海军水下作战中心 BLACKMON 等人提出了基于水面声光耦合技术的光纤水听器, 并利用激光多普勒原理进行水下声波的检测^[9]。然而, 在水面波动时, 解调信号会出现衰落甚至消隐现象, 这对探测

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2012BAH34B03)

作者简介: 李 栋 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤水声传感技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jinxf00@zju.edu.cn

收稿日期: 2014-03-31; 收到修改稿日期: 2014-04-02

结果造成了很大影响。为此, BLACKMON 等人又提出了增大激光束直径和接收端面积的方法, 并且采用基于激光的反射跟踪系统来减弱信号衰落, 但是在水面较大波动情况下仍然无法实时跟踪反射光, 而且该跟踪系统的引入会给原有检测系统带来额外噪声, 还会产生一个系统固有的调制频率和附加的多普勒频移^[10]。

针对上述情况, 作者在本文中探究了信号臂光强度和解调信号幅度之间的关系, 继而提出了一种通过实时测量信号臂光强度信息来补偿解调信号幅度的方案。

1 水面声光耦合光纤水听器 $\pi/2$ 相位解调法基本原理

水面声光耦合的光纤水听器 $\pi/2$ 相位解调法是近年来提出的一种新型零差解调方法^[11], 图 1 是系统的结构图。

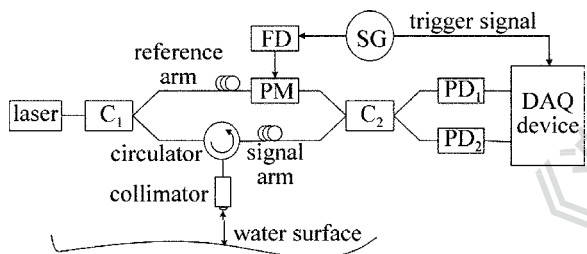


Fig. 1 Structure diagram of the $\pi/2$ phase demodulation method for fiber hydrophone based on the acousto-optic coupling on the water surface, C_1 — 1×2 coupler; C_2 — 2×2 coupler; PM—phase modulator; FD—frequency divider; SG—signal generator; PD—photodetector; DAQ—device—data acquisition device

参考臂和信号臂光信号在分光比为 50:50 的 2×2 耦合器中发生干涉效应, 再经过光电转换, 得到的电压信号形式为:

$$V_{o,1}(t) = A_1 - A_2 \cos[f_s(t) - p_s(t) + \phi(t)] \quad (1)$$

$$V_{o,2}(t) = A_1 + A_2 \cos[f_s(t) - p_s(t) + \phi(t)] \quad (2)$$

式中, $f_s(t)$ 为需要检测的水声振动信号, $p_s(t)$ 为光相位调制器的相位调制方波信号, $\phi(t)$ 为总相位噪声, A_1 为干涉输出直流分量大小, A_2 为:

$$A_2 = kI \sqrt{\frac{P_1(1-P_1)}{L_1L_2}} \quad (3)$$

式中, k 为光电探测器的电压光谱响应度, I 为激光器的输出光强, P_1 为 C_1 耦合器分信号臂光功率百分比, L_1 和 L_2 分别为参考臂和信号臂的光功率衰减

系数。

将两路电信号送入数据采集器中进行模数转换, 并将(1)式和(2)式两式相减, 得到的数据中奇数点和偶数点分别取出, 即为两路正交信号, 为了使两路信号对应点在时间上保持一致, 对其中一路信号相邻两点取平均值做近似处理, 最后采用微分交叉相乘法 (differentiate and cross multiply, DCM), 将所需的信号 $f_s(t)$ 解调出来, 解调结果形式如下:

$$V_o(t) = 4A_2^2 f_s(t) \quad (4)$$

2 信号幅度补偿原理

将上述解调系统用于实际检测, 设定水下振动信号恒定不变, 当水面波动时, 解调信号会出现幅度衰落、甚至消隐, 这将严重影响解调信号的质量, 干扰了对解调信号的判断, 给后期的数据分析造成了极大的困难。

造成信号衰落的主要原因是, 光纤准直器位于水面上方, 且其出射激光方向垂直向下并保持不变。水面波动时, 反射光不能原路返回, 准直器接收到水面反射光功率不断变化, 可以反映在信号臂衰减系数 L_2 的变化上。由(3)式和(4)式两式可知, L_2 的变化引起 A_2 的变化, 最终使得解调信号产生幅度失真。

如果在原有信号臂上分出一部分光, 并进行光电探测, 就得到信号臂的光强度信息, 可以根据这一路信号的大小来补偿解调信号幅度的衰落, 称这一光路为检测臂。

设信号臂耦合器分检测臂光功率百分比为 P_2 , 那么经过光电探测后输出检测臂光强信号为:

$$V_{o,3}(t) = \frac{kP_1P_2I}{L_2} \quad (5)$$

而两路干涉信号经过光电探测后形式仍为(1)式和(2)式, 但是 A_1 和 A_2 被 B_1 和 B_2 代替, 其中, B_1 为干涉输出直流分量大小, B_2 为:

$$B_2 = kI \sqrt{\frac{P_1(1-P_1)(1-P_2)}{L_1L_2}} \quad (6)$$

那么重复上述解调过程, 得到的解调结果形式仍然如(4)式所示, 其中的 A_2 也相应地被 B_2 代替。将(6)式代入解调信号中:

$$V_o(t) = \frac{4k^2I^2P_1(1-P_1)(1-P_2)}{L_1L_2} f_s(t) \quad (7)$$

(7)式除以(5)式, 得到:

$$V_a(t) = \frac{V_o(t)}{V_{o,3}(t)} = \frac{4kI(1 - P_1)(1 - P_2)}{P_2L_1} \times f_s(t) \quad (8)$$

这时,水面波动情况下解调信号中的变量 L_2 被消掉了,由于剩下的参量可以认为是基本恒定不变的,因此就得到了无失真的解调信号。

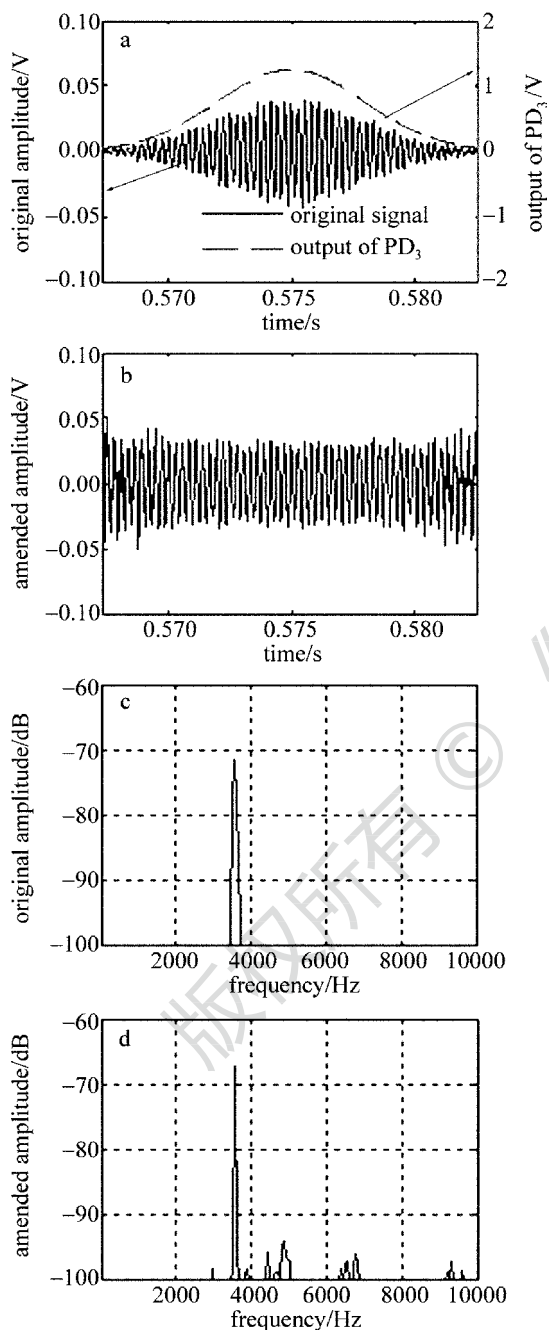


Fig. 2 Results of numerical simulation (sampling rate: 200kHz; signal frequency: 3.6kHz)
a—original signal and output of PD₃ (PD₃: photodetector of the detection arm) b—amended signal c—spectrum of original signal d—spectrum of amended signal

3 数值仿真

下面对恒定振幅的单频水下信号进行数值仿真。水面波动较剧烈时,在很长一段时间内准直器接收不到或者只接收到极少量的水面反射光,这段时间解调信号会淹没在系统的基底噪声中,信噪比很差。由于修正过程会将噪声同步放大,为了使修正结果获得更高的信噪比,需要选取一段有效时间。现定义最小信号幅度系数为实际可以接收的最小信号幅度与一固定信号幅度的比值,这个固定的信号幅度就是解调信号补偿之后最终得到的稳定幅度,同时将解调信号幅度大于最小可接收信号幅度的这段时间称为修正信号的有效时间。根据(5)式和(7)式可知,原始解调信号幅度和检测臂信号幅度是成正比的,为了方便信号处理,现将检测臂信号归一化,其中的归一化电压值对应解调信号修正后的稳定幅度。下面对水面波动较大情况下的修正过程进行仿真。

仿真中设采样率为200kHz,水下振动信号频率为3.6kHz,选取最小信号幅度系数为0.04,在有效时间段内得到图2的仿真结果。时域上,由于水面波动造成解调信号幅度出现衰落,补偿之后的信号幅度在有效时间内基本保持恒定;频域上,修正后解调信号幅度整体比原始信号高5dB,而且信号带宽有所减小,信号频率更加集中,说明修正后信号的相位噪声得到抑制,信噪比得到提高。

4 实验验证

下面搭建采用抗波浪解调方案的光纤水听器 $\pi/2$ 相位解调系统,系统结构如图3所示。和图1相比,信号臂上多了一个 1×2 耦合器,将准直器移至水面之上,并调节其出射的激光方向垂直向下,同时压电换能器产生3.6kHz恒定振幅的水下振动信

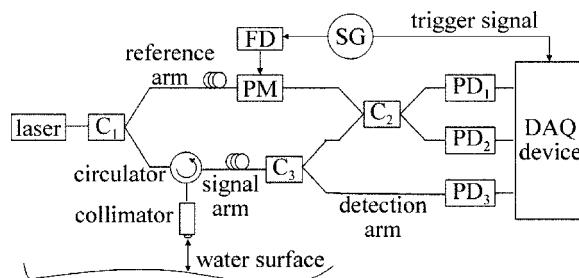


Fig. 3 Structure diagram of anti-wave demodulation experiment (C₃: 1 × 2 coupler)

号。信号发生器输出 200kHz 的方波触发采样,并通过分频器驱动光相位调制器。将 3 路光电探测器输出的电信号送入数据采集器中,并对采集到的数据进行解调处理。

取水面波动较剧烈时刻采集到的实验数据,并选取最小信号幅度系数为 0.04 的一段有效时间进行分析,如图 4 所示。

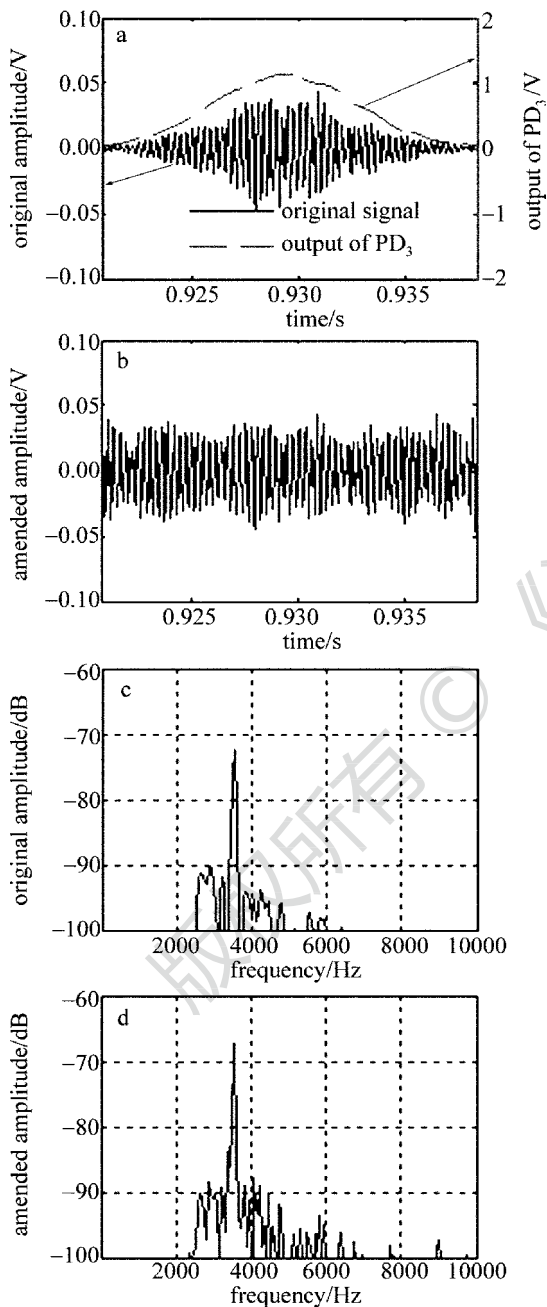


Fig. 4 Experimental results (sampling rate: 200kHz; signal frequency: 3.6kHz)
 a—original signal and output of PD₃ (PD₃: photodetector of the detection arm) b—amended signal c—spectrum of original signal d—spectrum of amended signal

图 4a 中原始解调信号中间时刻的幅值较大,两端幅值较小,信号衰落现象严重,并且和检测臂信号变化情况相同。图 4b 是采用抗波浪解调方法对原始解调信号进行幅度补偿得到的时域结果,可以看出,修正后信号幅度较原始信号有了很明显改观,在有效时间段内基本保持稳定。图 4c、图 4d 两图所示的是频域结果,对比幅度补偿前后,补偿后信号幅度比之前整体提高 5dB,而且由于幅度的不稳定造成的 3.6kHz 单频信号出现频带展宽等现象,也得到了很好的改善,信号频率更加纯净。

另外,通过计算得到如下数据,原始解调信号的 3dB 带宽为 80Hz,修正后为 25Hz,相位噪声得到很好的抑制;原始解调信号和水下振动信号的互相关系数为 0.6689,修正后为 0.7237;如果设幅度减小到无失真信号的 1/2 为幅度失真下限,幅度大于这一下限的时间为可辨认信号时间,那么原始解调信号的可辨认信号时间长度为 0.005s,而修正后可辨认信号时间长度为 0.0175s,扩展为原来的 3.5 倍。

虽然修正后解调信号幅度较原始信号有了很大改观,但是仍然存在一定程度的幅度波动,其主要原因有以下几点:(1)由于实验室水池有限,水面回波会对水面振动产生干扰;(2)在(8)式的修正结果中,所示的 k, I, P_1, P_2, L_1 等参量在上述分析中都认为是恒定不变的,而实际上,因为环境影响、器件本身都会造成这些参量的不稳定;另外,数据采集、解调过程和修正处理过程均会存在一定的误差。

以上分析的是水面波动比较剧烈的情况,这种情况相对复杂,对于水面波动较弱的情况,在所有时间段内均可以进行幅度补偿,修正过程和上述过程类似,在此不做详细阐述。

5 结 论

由于水面波动对解调信号造成的衰落现象和信号臂光功率变化密切相关,因此通过实时检测信号臂光强度信息,并据此对解调信号进行幅度补偿在理论上是可行的。而实验结果与理论分析和数值仿真结果是一致的,表明该方案不仅能够改善水面波动对解调信号造成的影响,还能在一定程度上减弱解调信号相位噪声,扩大可辨认信号的时间范围、提高信号质量、增大系统动态范围,是一种简便有效的方案。

参 考 文 献

[1] HOU J F, PEI L, LI Z X, *et al.* Development and application of

- optical fiber sensing technology[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(1): 49-53 (in Chinese).
- [2] LIN Z H, LI C F, LIU J C. Optical fiber sensing technology and its application in military[J]. *Optical Communication Technology*, 2011, 35(7): 4-6 (in Chinese).
- [3] KIRKENDALL C K, DANDRIDGE A. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *Journal of Physics*, 2004, D37(18): 197-216.
- [4] ZHANG R H, NI M. Principle and applications of the fiber optic hydrophone[J]. *Physics*, 2004, 33(7): 503-507 (in Chinese).
- [5] WANG Z L, LUO H, HU Y M. Signal detection technique for fiber-optic interferometric sensors[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(1): 86-91 (in Chinese).
- [6] CAMPOPIANO S, CUTOLO A, CUSANO A, *et al.* Underwater acoustic sensors based on fiber Bragg gratings[J]. *Sensors*, 2009, 9(6): 4446-4454.
- [7] MOCCIA M, PISCO M, CUTOLO A, *et al.* Opto-acoustic behavior of coated fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 18842-18860.
- [8] NI M, LI X L, ZHANG R H, *et al.* Seatests of an all-optical fiber-optic hydrophone system[J]. *Acta Acustica*, 2004, 29(6): 539-543 (in Chinese).
- [9] BLACKMON F, ANTONELLI L. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air, acousto-optic sensor[J]. *Oceanic Engineering*, 2006, 31(1): 179-187.
- [10] ANTONELLI L, BLACKMON F. Experimental demonstration of remote, passive acousto-optic sensing[J]. *Acoustical Society of America*, 2004, 116(6): 3393-3403.
- [11] JIN X F, OU J H, HAO R, *et al.* Novel demodulation method for fiber-optic interferometers based on $\pi/2$ phase modulation[J]. *Photonics Technology*, 2012, 24(22): 1981-1983.

《激光技术》编辑部