

基于改进相位生成载波解调的水表面 声波激光相干探测

张烈山¹, 张晓琳¹, 刘 刚², 李开琴¹, 唐文彦¹

¹哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²上海航天技术研究院, 上海 200240

摘要 针对低频水表面声波(WSAW)的频率识别问题,提出了一种基于改进相位生成载波(PGC)解调的激光相干探测方法。利用简单的激光干涉系统探测水下声源激发的低频 WSAW,再利用 4 路载波信号对其进行混频,通过功率比较遴选出 2 路功率最大的正交干涉信号,然后进行相位解调和频谱分析,实现了 WSAW 的频率测定。仿真和实验研究表明,改进的 PGC 解调法能够有效防止载波信号初始相位不可控条件下的正交信号消隐并准确实现低频 WSAW 的频率识别(频率探测下限可达 30 Hz),对变频 WSAW 及大尺度扰动波干扰条件下的低频 WSAW 也取得了很好的检测效果。该研究结果表明改进的 PGC 解调方法能够准确实现 WSAW 的频率识别,并具有很强的抗干扰能力。

关键词 光通信; 激光干涉; 频率识别; 相位载波; 水表面波; 水下声信号

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201744.0906006

Laser Interferometric Detection of Water Surface Acoustic Wave Based on Improved Phase-Generated Carrier Wave Demodulation

Zhang Lieshan¹, Zhang Xiaolin¹, Liu Gang², Li Kaiqin¹, Tang Wenyan¹

¹School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

²Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 200240, China

Abstract In order to solve the problem of frequency identification of the low frequency water surface acoustic wave (WSAW), a laser interferometric detection method is proposed based on an improved phase-generated carrier wave (PGC) demodulation technique. A simple laser interferometer system is used to detect the low frequency WSAW caused by underwater acoustic sources. Frequency mixing of four carrier signals is conducted and two orthogonal interference signals are selected by power comparison. Further phase demodulation and spectrum analysis are carried out, and the frequency measurement for WSAW is achieved. Simulations and experiments for low frequency WSAW are conducted to confirm that the improved PGC demodulation method can effectively avoid orthogonal signal blanking when the initial phase of carrier signal is uncontrollable. The accurate frequency identification for WSAW can be achieved, and the frequency detection limit is as low as 30 Hz. Good detection effect for WSAM with low frequency can be achieved by the proposed method under conditions of frequency-varying WSAM and low-frequency WSAM with large-scale disturbance wave interference. The results show that the improved PGC demodulation method can accurately determine the frequency of WSAW and be able to resist disturbance.

Key words optical communications; laser interferometry; frequency identification; phase carrier; water surface wave; underwater acoustic signal

收稿日期: 2017-04-10; **收到修改稿日期:** 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61108073)、上海航天科技创新基金(SAST2015029)

作者简介: 张烈山(1987—),男,博士研究生,主要从事水表面声波检测方面的研究。E-mail: zhanglieshan@163.com

导师简介: 张晓琳(1976—),女,博士,副教授,主要从事激光干涉测量方面的研究。

E-mail: zhangoptoacoustic@163.com(通信联系人)

1 引 言

近年来,以光纤水听器为代表的光学方法是实现水下声信号测量的主要技术手段^[1-2]。为了提高探测系统的机动性,越来越多的学者将目标转移到激光-声联合探测技术^[3-4]。该技术通过实现对水下声源激发的水表面声波(WSAW)的探测来实现水下声场信息的评估,这种探测方法根据探测信号获取和解调方法的不同可以分为光通量方法^[5]、激光多普勒干涉法^[6]和激光衍射法^[7]。其中,激光多普勒干涉法具有探测灵敏度高、精度高、探测频带宽等优点,受到越来越多的重视。

过去利用激光多普勒干涉法探测 WSAW 时都以频谱分析为基础,这类方法对于高频段水下声信号的频率识别具有较高的检测精度^[8-10],但是由于水表面大尺度低频环境扰动的影响,频谱分析法无法准确识别低频水下声信号信息。在水下声场的探测应用中,声信号一般为 1 kHz 以下的低频信号,因此实现低频段水下声信号的特征识别具有非常重要的研究意义。相位生成载波(PGC)解调技术是一种广泛应用于干涉型光纤传感器的零差解调方法^[11-14],具有解调信号动态范围大、灵敏度高、线性度好、解相精度高等特点。本文将 PGC 解调方法应用到分立光学系统中,并对传统的 PGC 解调方法进行改进,采用 4 路不同相位的载波信号进行信号混频,混频滤波后计算信号的功率,选择 2 路功率最大的正交信号进行后续解相处理,有效防止信号的消息失真。将改进的 PGC 解调法应用到 WSAW 的激光多普勒相干探测信号解调中,实现低频段 WSAW 的频率识别。

2 基本原理

2.1 WSAW 的相干探测

垂直入射到水气界面的声压能够在水表面激发同频振动的 WSAW^[15],激光-声联合探测技术就是利用激光来探测这种与水下声信号同频振动的 WSAW,从而实现水下声源特征的估计。

WSAW 是振幅极小的表面横波,它通常淹没在自然水表面波动中,WSAW 的相干探测实质就是随机粗糙表面微弱振动的相干探测问题。假定水表面的波动由两部分构成,即由低频的环境扰动表面波动和水下声源引起的 WSAW 构成,并假设环境扰动表面波的振幅为 A_n 、角频率为 ω_n ,WSAW 的振幅为 A_s 、角频率为 ω_s 。利用基本的迈克耳孙干涉系统探测水表面,测量光受到水表面振动相位调制作用后返回探测系统,与参考光发生干涉作用,干涉光被光电接收器转换为电信号,根据零差干涉的基本原理^[16],滤除相干探测信号中的直流成分后得到的探测信号为

$$U(t) = A_d \cos\{2k [A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) + A_s \sin(\omega_s t + \varphi_s)]\}, \quad (1)$$

式中 A_d 为系统增益,由测量光和参考光的光功率以及光电转换模块的性能决定; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光的工作波长; φ_n 为自然水表面波动的初相位; φ_s 为 WSAW 的初相位; t 为时间。

2.2 PGC 法解调 WSAW 信号

PGC 方法利用内调制或者外调制技术改进迈克耳孙干涉系统,使相干信号的相位中生成一种高频载波。假设这种调制信号的频率为 ω_0 ,调制深度为 C ,初相位为 φ_0 ,那么利用这种改进的相干系统对 WSAW 进行探测,滤除探测信号中的直流分量,最终得到的信号为

$$U_c(t) = A_d \cos\{C \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + 2k [A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) + A_s \sin(\omega_s t + \varphi_s)]\}. \quad (2)$$

记水表面振动引起的相位为 $\varphi(t)$,即

$$\varphi(t) = 2k [A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) + A_s \sin(\omega_s t + \varphi_s)]. \quad (3)$$

根据 PGC 解调法基本原理^[14],将相干探测信号 $U_c(t)$ 与一倍频载波信号 $\cos(\omega_0 t)$ 和二倍频载波信号 $\cos(2\omega_0 t)$ 进行混频,然后利用低通滤波器(LPF)滤除高频分量后可得 2 路正交的干涉信号,再利用微分交叉相乘(DCM)算法或者反正切算法对 2 路正交信号进行处理,DCM 解调算法^[17]的过程如图 1 所示,图中 A 和 B 分别为同相信号和正交信号的增益系数。

利用 DCM 算法,可得解相信号为

$$u(t) = \cos \varphi_0 \cos(2\varphi_0) A_d^2 J_1(C) J_2(C) \varphi(t), \quad (4)$$

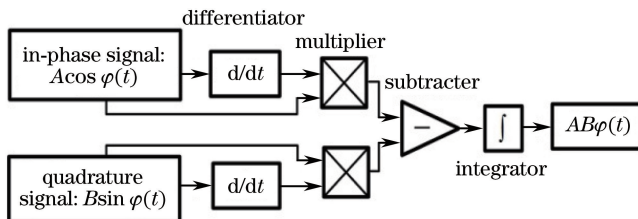


图 1 DCM 解调算法流程图

Fig. 1 Flowchart of DCM demodulation algorithm

式中 $J_1(C)$ 、 $J_2(C)$ 分别为载波调制深度 C 的一阶和二阶贝塞尔函数值。将水表面环境扰动引起的低频分量滤除后即可得到一个与 WSAW 频率相同的单频信号,对最终输出信号进行频谱分析,即可实现 WSAW 频率的探测。

2.3 改进的 PGC 解调法

根据(4)式,PGC 解调方法对载波信号初始相位 φ_0 是极为敏感的,而且工程实际应用时也存在不能精确控制载波信号初相位的情况。当初始相位 φ_0 接近 $N\pi/2$ 时(N 为非 0 整数),将会发生同相信号 $U_1(t)$ 或正交信号 $U_Q(t)$ 的消隐,进而导致解相信号的失真。对这一现象进行仿真研究,设激光的工作波长为 632.8 nm,WSAW 的频率为 2 kHz,振幅为 25 nm;水表面环境扰动的频率为 5 Hz,振幅为 $2\ \mu\text{m}$;相位载波的频率为 15 kHz,调制深度为 2.37 rad,载波信号的初相位 φ_0 为 0.5π ;干涉信号的增益系数 A_d 设为 1。利用一倍频载波信号 $\cos(\omega_0 t)$ 和二倍频载波信号 $\cos(2\omega_0 t)$ 对原始信号进行混频,再通过低通滤波后,得到 2 路正交信号的波形如图 2 所示。根据仿真信号,当相位载波信号的初相位 $\varphi_0 = 0.5\pi$ 时,同相信号 $U_1(t)$ 几乎衰减为 0,2 路正交信号的功率差异达到了 4.8 dB。

采用图 2 所示的 2 路正交信号进行相位解调处理后,得到的解相信号发生了明显的失真,图 3 所示为采用 DCM 法处理后得到的相位解调信号的时域和频域分布。由图 3 可知,相位解调信号发生了严重的失真,与仿真信号设定的形式完全不相符。

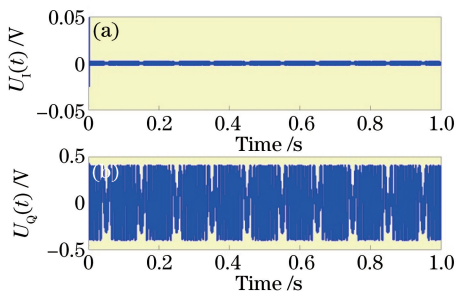


图 2 仿真正交干涉信号。(a) $U_1(t)$; (b) $U_Q(t)$
Fig. 2 Simulation of orthogonal interference signals.
(a) $U_1(t)$; (b) $U_Q(t)$

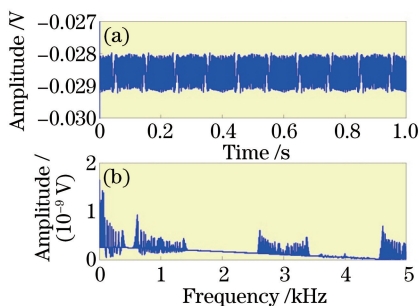


图 3 仿真相位解调信号。(a)时域;(b)频域
Fig. 3 Simulation of phase demodulation signal.
(a) Time domain; (b) frequency domain

事实上,更多的仿真研究表明,干涉信号混频时采用的一倍频载波信号和二倍频载波信号的初相位对 PGC 解调方法的性能都有重要影响。对于 WSAW 的探测来说,干涉信号的初相位总是具有很大的随机性,参考臂的高频相位载波的初相位也无法被精确控制,因此用 PGC 解调法处理 WSAW 探测信号时常常发生正交信号的消隐和失真。PGC 解调方法的可靠性很大程度上依赖于 2 路正交信号 $U_1(t)$ 和 $U_Q(t)$ 的对比度,即信号强度的差异。在保证信噪比的情况下,2 路正交信号的强度越大且越接近,则解调的效果越佳。为了使正交信号 $U_1(t)$ 和 $U_Q(t)$ 的强度能够匹配,采用 4 路不同初相位的一倍频和二倍频载波信号对原始信号进行混频,这样可以得到 4 对正交信号 $U_1(t)$ 和 $U_Q(t)$,通过对每一个正交信号的强度的分析,选择质量最佳的正交信号进行后续的解相处理。以 DCM 算法为例,给出改进的 PGC 解调方法的原理图,如图 4 所示,图中 $U_s(t)$ 为改进的 PGC 解调方法最终解调得到的信号。

分别用一倍频载波信号 $\cos(\omega_0 t)$ 、 $\sin(\omega_0 t)$ 以及二倍频载波信号 $\cos(2\omega_0 t)$ 、 $\sin(2\omega_0 t)$ 与原始相干探测

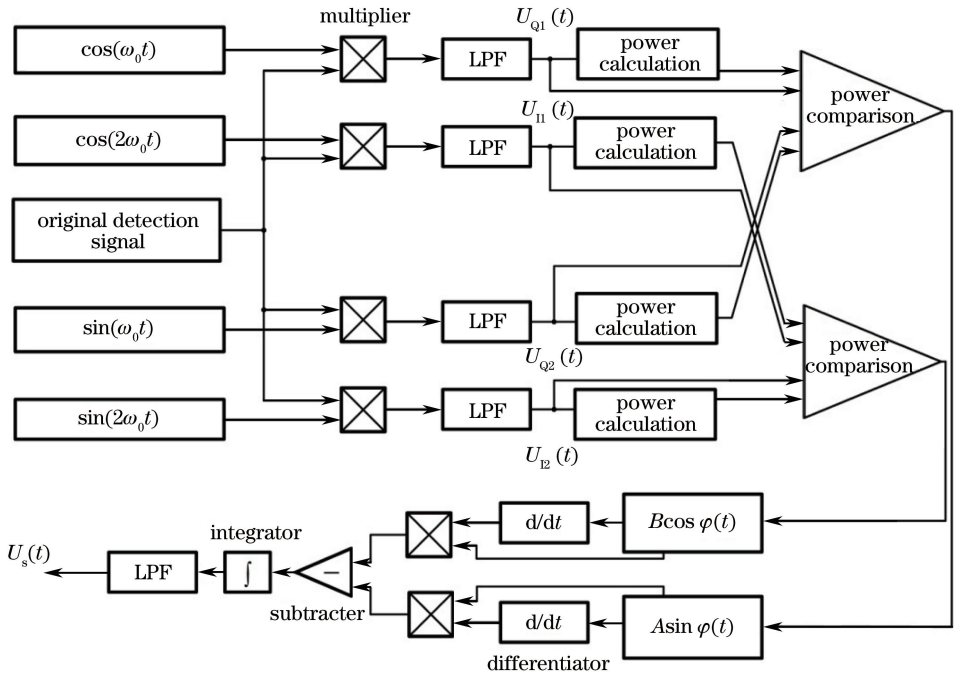


图 4 改进的 PGC 解调方法基本流程

Fig. 4 Flowchart of improved PGC demodulation method

信号进行混频,再经过低通滤波后,可得 4 路信号

$$\begin{cases} U_{Q1}(t) = -A_d J_1(C) \cos \varphi_0 \sin \varphi(t) \\ U_{I1}(t) = -A_d J_2(C) \cos(2\varphi_0) \cos \varphi(t) \\ U_{Q2}(t) = -A_d J_1(C) \sin \varphi_0 \sin \varphi(t) \\ U_{I2}(t) = -A_d J_2(C) \sin(2\varphi_0) \cos \varphi(t) \end{cases} \quad (5)$$

这 4 路信号可构成 4 对正交信号。通过比较 $U_{I1}(t)$ 和 $U_{I2}(t)$ 的功率,再比较 $U_{Q1}(t)$ 和 $U_{Q2}(t)$ 的功率,选出一对具有最强功率的正交信号进行后续的解相处理。对相位解调信号再进行低通滤波后即可得到 WSAW 的同频信号,再对其进行频谱分析即可得到 WSAW 的频率。

以上述仿真信号为例,用图 4 所示的方法遴选出的 2 路正交信号如图 5 所示,由图可知,这 2 路正交信号已具有相当大的强度,这说明改进的 PGC 解调方法能够有效防止正交信号的消逝。

图 6 所示为改进的 PGC 解调方法对仿真信号的解调结果,并用高通滤波滤除了低频环境扰动分量。由图 6 可知,除了 DCM 算法的端点效应,改进的 PGC 解调方法能够完全不失真地解调出 WSAW 信息。

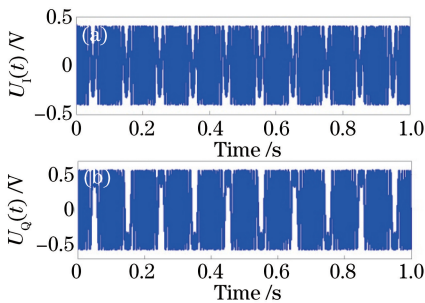


图 5 基于改进 PGC 解调法的仿真正交干涉信号。(a) $U_{I1}(t)$; (b) $U_{Q1}(t)$

Fig. 5 Simulated orthogonal interference signals based on improved PGC demodulation method.

(a) $U_{I1}(t)$; (b) $U_{Q1}(t)$

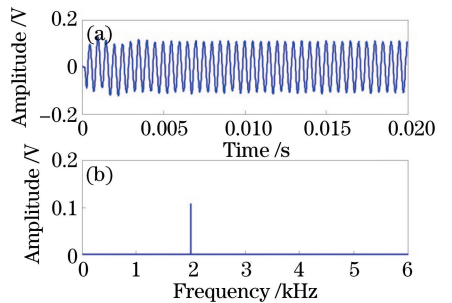


图 6 基于改进的 PGC 解调法的仿真信号解调结果。(a) 时域; (b) 频域

Fig. 6 Demodulation results of simulated signal based on improved PGC demodulation method.

(a) Time domain; (b) frequency domain

3 实验装置

为了实现 WSAW 的相干检测,搭建了图 7 所示的实验系统,实验系统分为三大功能模块:1) WSAW 的激发模块;2) 激光多普勒相干探测光路系统;3) 相干探测信号采集及处理模块。激光器采用稳频的氦-氖(He-Ne)激光器,工作波长为 632.8 nm。光电探测器的光电器件为硅光电二极管,具有响应速度快、等效噪声功率小等特点。DAQ 代表数据采集。

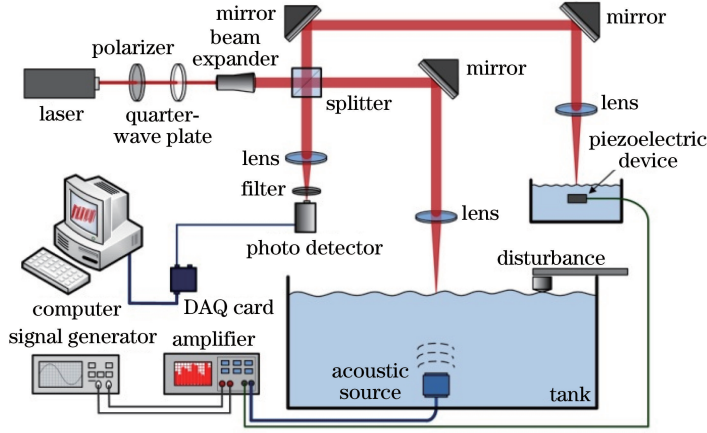


图 7 实验系统示意图

Fig. 7 Schematic of experimental system

WSAW 的激发模块由信号发生器、功率放大器以及水下电声换能器组成,信号发生器发出的特定频率的信号经功率放大器放大后可用于驱动电声换能器发出特定频率声信号,水下声压入射到水气界面激发了 WSAW。激光多普勒相干系统采用经典的迈克耳孙干涉结构,由于水表面对于入射激光来说是微粗糙的,它会使人射光发生一定程度的散射,回光的光斑直径明显大于入射光的光斑直径。为了保证外差干涉的效果,在干涉仪的参考臂也采用了水表面作为反射面,这样做一方面使得光路调节更加容易,干涉信号的稳定性也更好,另一方面也通过差分的方法消除了被测水面与参考水面具有相同性质的随机扰动,进一步提升了干涉信号的质量。在参考水面放置了用于激发高频载波的压电致动器件,该器件的高频振动激发了水表面高频的微小振幅的振动,使得参考光相位生成了高频载波,实验中采用频率为 10 kHz 的载波。在被测水表面设计的机械扰动装置用来考察水表面存在大尺度扰动时,改进的 PGC 解调方法是否能够准确解调 WSAW 的频率。信号的采集及处理模块由光电探测器、数据采集卡和上位机组成,数据采集卡的采样率为 100 kSa/s,分辨率为 16 bit。

4 实验研究

利用图 7 所示的探测系统对 WSAW 进行探测实验,分别对 0.02~1 kHz 低频 WSAW 和变频 WSAW 进行频率探测实验,并在水表面存在大尺度环境扰动波的条件下进行 WSAW 的频率探测,以验证改进的 PGC 解调方法的可行性。设定信号发生器的一个输出通道输出频率为 10 kHz 的标准正弦信号,该信号经放大后驱动压电致动器件,使干涉仪参考臂生成 10 kHz 高频相位载波。

4.1 低频 WSAW 的频率探测实验

设定信号发生器的另一个输出通道输出 200 Hz 标准正弦信号,该信号经放大后驱动水下电声换能器,并最终在水表面激发出 200 Hz 的 WSAW,利用相干探测系统对 200 Hz 的 WSAW 进行探测实验。在相干信号的频谱分布中,WSAW 引起的频率分量完全淹没在水表面低频扰动波引起的频带中,文献[8]所述方法将失效,无法直接从相干信号频谱分布中提取出 WSAW 的频率。此时,分别用常规 PGC 解调法和改进的 PGC 解调法对相干信号进行处理,滤除信号中频率小于 100 Hz 的分量,最终得到相位解调信号的频谱分布如图 8 所示。图 8(a)为常规 PGC 解调方法的解调结果,图 8(b)为改进的 PGC 解调方法的解调结果。对比可知,改进的 PGC 解调方法能够更准确地解调出 WSAW 信息,解调结果中有效信号的幅值和信噪比明显

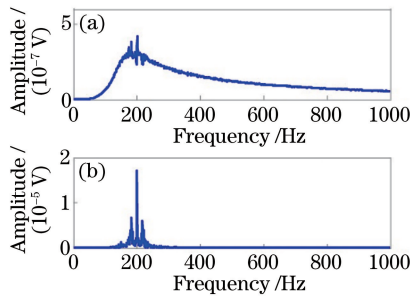


图 8 200 Hz 的 WSAW 相干探测信号解调结果。(a)常规 PGC 解调方法;(b)改进的 PGC 解调方法

Fig. 8 Demodulation results of 200 Hz WSAW interference signal. (a) Traditional PGC demodulation method;
(b) improved PGC demodulation method

优于常规 PGC 解调法得到的信号的幅值和信噪比。事实上,常规的 PGC 解调方法已经出现了波形的失真。

为分析改进 PGC 解调方法的优越性,给出 2 种方法所采用的正交信号,如图 9 所示。图 9(a)为常规 PGC 解调方法得到的 2 路正交信号,可见这 2 路信号的强度都很小,尤其是 $U_q(t)$ 已趋近于 0,这使得常规 PGC 解调法的结果出现了失真。图 9(b)是改进 PGC 解调法所采用的 2 路正交信号,它们的信号强度明显优于图 9(a),因此保证了较好的解调结果。

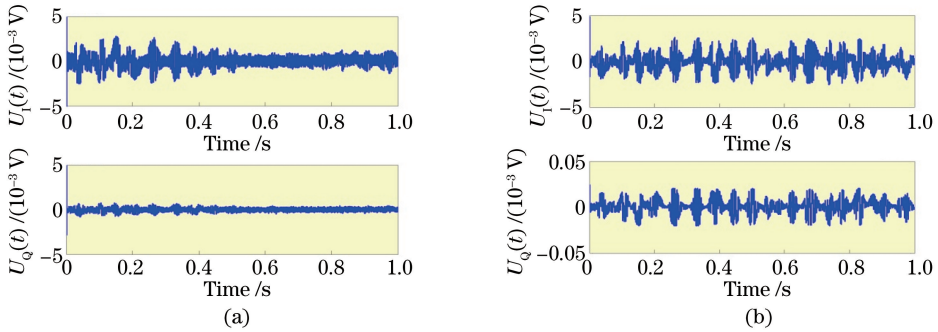


图 9 (a)常规 PGC 解调法得到的正交信号;(b)改进的 PGC 解调法得到的正交信号

Fig. 9 (a) Orthogonal signals obtained by traditional PGC demodulation method;
(b) orthogonal signals obtained by improved PGC demodulation method

对频率为 0.02~1 kHz 的 WSAW 进行了相干检测,利用改进的 PGC 解调方法对检测信号进行解调。实验结果表明,改进的 PGC 解调法对 WSAW 频率探测的下限为 30 Hz,对于频率小于 30 Hz 的 WSAW,本文所述的方法已不能实现准确解调。图 10 所示分别为 30, 50, 100, 500 Hz WSAW 探测信号的解调结果。通过改进的 PGC 解调法结合傅里叶频谱分析,实现 WSAW 频率的测定,解调结果的频谱分布基本呈现线谱特征,并且具有较高的信噪比。这里无需设计频率提取算法即可实现 WSAW 频率的测定,其测量误差主要由频率分辨率造成。

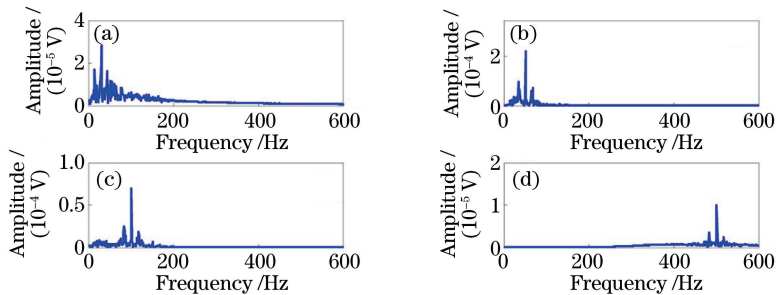


图 10 不同频率的低频 WSAW 检测信号解调结果。(a) 30 Hz;(b) 50 Hz;(c) 100 Hz;(d) 500 Hz

Fig. 10 Demodulation results of low frequency WSAW detection signals with different frequencies.

(a) 30 Hz; (b) 50 Hz; (c) 100 Hz; (d) 500 Hz

4.2 扫频 WSAW 的频率探测实验

改进的 PGC 解调方法对变频的 WSAW 相干信号也能进行解调,再结合时频分析工具可实现 WSAW 频率的实时追踪。图 11 所示为扫频 WSAW 激光相干探测信号的解调结果,其时频分布由短时傅里叶变换得到,扫频 WSAW 的起始频率为 1 kHz,截止频率为 3 kHz,变化周期为 1 s。由图 11(c)可知,PGC 解调方法能够准确反映 WSAW 主频的变化,而文献[8]所述的相干信号全局频谱分析方法只能对探测信号进行静态分析,无法追踪 WSAW 频率的变化。

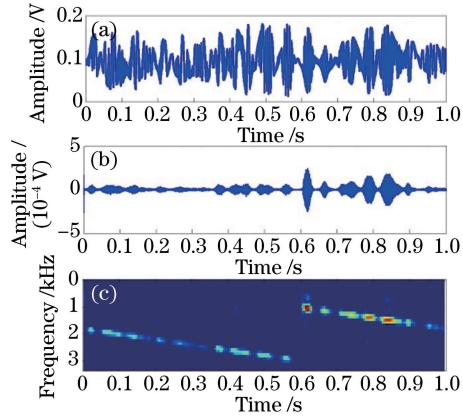


图 11 (a)扫频 WSAW 激光相干探测信号;(b)改进的 PGC 解调法的结果;(c)解调信号时频分布

Fig. 11 (a) Laser interference detection signal of sweep frequency WSAW; (b) result obtained by improved PGC demodulation method; (c) time-frequency distribution of demodulation signal

4.3 大尺度环境扰动波干扰下的 WSAW 频率识别

自然的水表面总是存在一些大尺度的环境扰动波,实验中利用机械扰动装置使被测水面激发出低频大尺度的环境扰动波,环境扰动波的频率低于 5 Hz,其最大波动幅度约为 2 cm。图 12 所示为大尺度环境扰动波干扰下 200 Hz WSAW 实测信号,由其时域波形[图 12(a)]可知,由于水表面存在大尺度的随机扰动,相干信号的强度时大时小,干涉条纹时有时无,从其时域分布特点中无法获取 WSAW 的信息。从频谱分布[图 12(b)]看出,相干信号频谱中存在一个由低频水面波动引起的低频谱线分布带,水表面存在大尺度随机扰动使得该频带完全覆盖了 200 Hz WSAW 频率,这种情况下文献[8]等所采用的基于频谱分析的方法将无法提取 WSAW 的频率信息;10 kHz 高频载波的相位调制作用使得载波频率附近出现了密集的谱线分布,其构成的频带以 10 kHz 为中心。

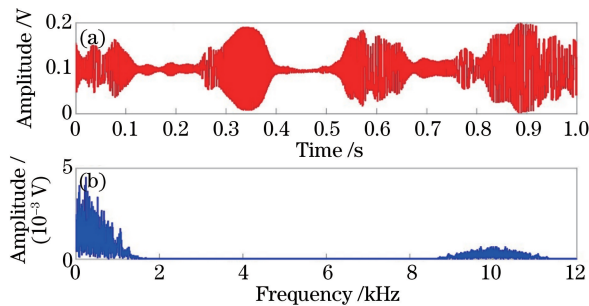


图 12 实测 200 Hz WSAW 相干信号的(a)时域分布和(b)频域分布

Fig. 12 (a) Time domain distribution and (b) frequency domain distribution of measured 200 Hz WSAW interference signal

分别用常规的 PGC 解调方法和图 4 所示改进的 PGC 解调方法对前述 200 Hz WSAW 相干检测信号进行处理,滤除解相信号中 100 Hz 以下低频分量,两种处理方法得到的信号频谱分布如图 13 所示。图 13(a)为常规 PGC 解调法的处理结果,可以看出常规的 PGC 解调法无法从解调结果中识别 WSAW 的频率。图 13(b)为改进 PGC 解调法的处理结果,可以看出,最终得到信号的主频为 200 Hz,且几乎呈现线谱的特征。在大尺度环境扰动波条件下,对频率为 0.02~1 kHz 的低频 WSAW 进行了探测实验,实验结果表明大尺度环境扰动波条件下改进的 PGC 解调方法能够探测 WSAW 的频率下限约为 50 Hz。

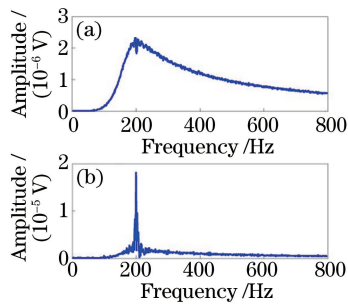


图 13 (a)常规 PGC 解调法解调结果;(b)改进 PGC 解调法解调结果

Fig. 13 (a) Demodulation result of traditional PGC demodulation method; (b) demodulation result of improved PGC demodulation method

5 结 论

研究了 WSAW 的激光相干探测技术,针对低频段 WSAW 的频率识别问题,提出了一种基于改进 PGC 解调技术的检测方法,进一步推动了激光多普勒干涉法探测水下声源信息的研究。主要结论如下:1)针对载波信号相位不可控条件下常规 PGC 解调方法正交干涉信号消隐的问题,提出了一种改进的 PGC 解调方法,该方法利用 4 个不同相的载波信号与原始信号进行混频,得到 4 路正交信号,通过功率比较遴选出 2 路功率最大的正交信号进行后续解相处理,有效解决了正交信号消隐失真的问题;2)搭建了一套多普勒相干探测系统,在参考臂利用压电致动器件使水面激发高频表面波,从而巧妙地使相干检测信号生成高频载波,利用多普勒相干系统进行低频 WSAW 探测实验,验证了改进 PGC 解调方法的有效性;3)通过 1 kHz 以下低频 WSAW 的探测实验,验证了改进的 PGC 解调方法结合傅里叶频谱分析能够准确地实现 WSAW 频率的测定,频率的探测下限为 30 Hz;4)改进的 PGC 解调方法能够实现扫描 WSAW 相干检测信号的解调,结合时频分析工具实现了扫频 WSAW 频率的识别;5)对大尺度环境扰动波条件下的水表面也进行了 WSAW 相干探测实验,并利用改进的 PGC 解调方法对探测信号进行解调,实现了 WSAW 频率的识别,频率探测下限约为 50 Hz。

参 考 文 献

- [1] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, *et al.* Pseudo working-point control measurement scheme for acoustic sensitivity of interferometric fiber-optic hydrophones[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(5): 381-383.
- [2] Beverini N, Firpi S, Guerrini P, *et al.* Fiber laser hydrophone for underwater acoustic surveillance and marine mammals monitoring[C]. SPIE, 2011, 7994: 79941D.
- [3] Farrant D, Burke J, Dickinson L, *et al.* Opto-acoustic underwater remote sensing (OAURS)-an optical sonar?[C]. OCEANS 2010 IEEE, 2010: 11595624.
- [4] Churnside J H, Bravo H E, Naugolnykh K A, *et al.* Effects of underwater sound and surface ripples on scattered laser light[J]. Acoustical Physics, 2008, 54(2): 204-209.
- [5] Wang Yan, Fang Erzhen. Underwater acoustic detection utilizing laser luminous flux variation method[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 33(1): 69-73.
王 燕, 方尔正. 激光通量变化法探测水下声信号[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(1): 69-73.
- [6] Liu Wei, Zhang Jun. Experimental study on laser interferometry of underwater acoustic signals[J]. Optoelectronic Technology, 2013, 33(2): 141-144.
刘 伟, 张 骏. 水下声场激光相干探测的实验研究[J]. 光电子技术, 2013, 33(2): 141-144.
- [7] Miao Runcai, Xu Jiating, Xie Tian, *et al.* Detection of low-frequency underwater acoustic signal by laser[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 974-978.
苗润才, 许佳婷, 谢 甜, 等. 低频水下声信号的激光探测[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 974-978.
- [8] Zhang Xiaolin, Tang Wenyan, Sun Heyi. Laser interferometry of underwater acoustic signals[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 809-815.
张晓琳, 唐文彦, 孙和义. 水下声信号的激光干涉测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 809-815.

- [9] Zhang Lieshan, Zhang Xiaolin, Tang Wenyan, *et al.* Detection of water surface acoustic wave using laser interference based on wavelet ridge[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(1): 103-107.
张烈山, 张晓琳, 唐文彦, 等. 基于小波脊的水表面声波激光干涉探测[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(1): 103-107.
- [10] Cao Zenghui, Zheng Tiantian, Sun Tengfei, *et al.* Experiment research on underwater acoustic signal for laser detection [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(2): 17-21.
曹增辉, 郑田甜, 孙腾飞, 等. 激光探测水下声信号的实验研究[J]. *光电技术应用*, 2014, 29(2): 17-21.
- [11] Yu Yang, Zhang Xueliang, Sun Shilin, *et al.* Study on PGC demodulation system based on all-optical microfiber phase modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0710002.
于 洋, 张学亮, 孙世林, 等. 基于微纳光纤全光相位调制器的 PGC 解调系统[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0710002.
- [12] Hu Zhengliang, Jiang Peng, Ma Lina, *et al.* Suppression of polarization induced signal fading and phase noise utilizing orthogonal-polarization switching method[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0910001.
胡正良, 蒋 鹏, 马丽娜, 等. 利用正交偏振切换抗偏振衰落和抑制偏振噪声[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0910001.
- [13] Li Shuwang, Shao Shiyong, Mei Haiping, *et al.* Simulation of atmospheric aerosol particle absorption characters based on photo-thermal interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1101004.
李树旺, 邵士勇, 梅海平, 等. 光热干涉法测量大气气溶胶粒子吸收特性的仿真分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1101004.
- [14] Guo Zhen, Gao Kan, Zhou Shaoling, *et al.* Time domain crosstalk in fiber Bragg grating Fabry-Pérot interferometric hydrophone array system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0706001.
郭 振, 高 侃, 周少玲, 等. 光栅法布里-珀罗腔干涉型水听器阵列中的时域串扰[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0706001.
- [15] Dai Zhenhong, Sun Jinzuo, Sui Pengfei. Theoretical study on the water surface transversal mini-wave due to the underwater sound field[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2004, 26(1): 95-98.
戴振宏, 孙金祚, 隋鹏飞. 水下声源引起的水表面横向微波的理论研究[J]. *国防科技大学学报*, 2004, 26(1): 95-98.
- [16] Zhang L S, Zhang X L, Tang W Y. Amplitude measurement of weak sinusoidal water surface acoustic wave using laser interferometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(9): 091202.
- [17] 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.