

文章编号 1004-924X(2018)11-2623-09

## 干涉测量低频水下声源频率的改进算法

张晓琳\*, 毛红杰, 唐文彦

(哈尔滨工业大学 电气工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**为了实现低频段水下发生目标频率的准确识别,搭建了一套激光干涉测量系统。在相位生成载波解调技术的基础上,提出了一种改进的基于相位生成载波反正切算法的解调方式。在光学暗室下利用分立光学元件搭建了一套干涉实验系统,在参考光路引入水面波动作为高频载波,利用水表面漫反射的主反光与参考光干涉获得干涉信号。以相位生成载波解调技术的反正切算法为基础,引入高频载波信号的一倍和二倍正弦混频。通过功率比较的算法在两组正交信号当中筛选功率较强的一组进行解调,避免了载波初相位导致的正交信号消隐引起的解调失真。最后,在模拟的低频大幅度海浪扰动情况下进行了探测实验,取得了良好的解调效果。实验结果表明:水下声源的低频探测下限约为 30 Hz; 100 Hz 以上频段的频率探测精度优于 1 Hz。改进的反正切解调算法能够避免解调失真,具有很强的抗干扰能力。

**关键词:**激光干涉;水下声源;频率测量;相位生成载波

**中图分类号:**TH691.9;TP394.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182611.2623

## Improved algorithm for interferometric measurement of low-frequency underwater acoustics

ZHANG Xiao-lin\*, MAO Hong-jie, TANG Wen-yan

(School of Electrical Engineering and Automation,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangxiaolin@hit.edu.cn

**Abstract:** A laser interferometry system was built to accurately realize the frequency identification of low-frequency underwater targets. An improved algorithm was proposed based on the Phase-Generated Carrier (PGC) demodulation technology using the arctangent demodulation algorithm. First, a set of interference experiment systems was built using discrete optical elements under an optical darkroom. Water surface waves were introduced into the reference optical path as a high-frequency carrier, and the interference signal was obtained by interference with the main reflector of measuring and reference light. Next, sine mixing of the carrier signal is introduced based on the arctangent algorithm of the PGC demodulation technique. Using the power comparison algorithm, the group with stronger power was selected between two groups of orthogonal signals for demodulation, so as to avoid demodulation distortion caused by the initial carrier phase. Finally, the anti-interference ability was demonstrated by experiments under substantial mechanical disturbance. Experimental

**收稿日期:**2018-03-26;**修订日期:**2018-05-24.

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 61108073);上海航天科技创新基金资助项目(No. SAST2015029);博士后研究人员落户黑龙江科研启动基金资助项目(No. AUGA4120006016)

results show that the lower detection limit of the underwater sound source is approximately 30 Hz, and the frequency detection accuracy obtained by multiple detections is better than 1 Hz at frequencies above 100 Hz. The improved arctangent demodulation algorithm can effectively avoid demodulation distortion and has a strong anti-interference ability.

**Key words:** laser interference; underwater acoustic source; frequency detection; phase-generated carrier

## 1 引言

水下声源信息的探测和特征识别是国防和海洋工程领域的热点问题<sup>[1-2]</sup>。在军事方面,潜艇等水下声源目标的侦查一直以来是海洋防务的关键问题。我国有约 300 万平方公里的“蓝色国土”,发展尖端的海洋探测技术有利于保卫和合理利用这些“蓝色国土”。因此,在现代化技术竞争日益激烈的今天,提高水下目标的探测能力是发展海上军事力量的基础和动力之一,也是迅速提高国防力量的突破口。

作为海洋探测的重要技术手段,“光-声”联合,在空中实现水下目标的实时探测及特征识别,不仅具有较强的实际应用背景,同时又具有重要的理论意义和学术价值。“激光-声”联合探测技术在空中利用激光探测,水下用声波传递信息,发挥声光各自优势,把激光技术与声学、电子学有机结合,能够克服声呐技术和机载蓝绿激光雷达海洋探测技术的不足,所以越来越受到国内外学者的重视<sup>[3-5]</sup>。目前这一方向的研究尚处于实验室阶段,学者们尝试不同的方法实现水下声源信息的探测,但不论是散射光斑法、激光通量法、光线分析法还是光衍射法<sup>[6-8]</sup>,均是利用光电接收器件直接接收水面的反射光,在反馈信号提取上是对光强信号的直接处理。本课题组提出了基于激光干涉的水下目标空中探测方法,在反馈信号获取方式上是一种全新的尝试<sup>[9-10]</sup>。该方法利用水表面声波对探测激光束的相位调制作用探测水下声信号,从干涉信号中解调出水表面的声波信息,从而实现水下目标的探测。

本课题组围绕水下目标的空中实时探测及水下复杂声场信号有效提取技术进行了较大量的研究工作,并取得了一定进展<sup>[11-13]</sup>,实现了小波分析、变相点局部数据分析、干涉信号频谱分析等关键技术的突破,但 500 Hz 以下的低频段信号解调一直是一个技术难点。采用频谱分析解调技术

时,由于水面扰动引起的噪声信号占据较宽的低频段,淹没了需要探测的低频水下声源频率信息。我们尝试用相位生成载波解调技术中的微分交叉相乘(Differential Cross Multiplication, DCM)算法来解调这部分信号<sup>[14]</sup>,但微分环节对高频信号敏感,导致高频噪声增加;积分环节由于积分误差累计以及积分初值不固定而引起的信号跳变会导致信号失真。DCM 算法对 200 Hz 以下低频信号的解调效果不理想,水面存在较大扰动的情况下,有时不能准确解调出水下声源的频率信息。另一方面,DCM 算法得到的解调信号幅值受到光电系统增益系数的影响,在水面波动导致回光不能完全进入到探测系统的情况下,该参数不能进行有效地估计。这就导致 DCM 解调方式不能实现振幅的解调,不利于进一步的研究。要得到水下声源的频率和振幅等全部特征,用来实现后续的水下目标定位等功能,显然文献<sup>[14]</sup>当中的方法是不可行的。因此,本文利用反正切算法解调并对解调方式进行改进,以实现低频段水下声源频率的准确识别,从而为进一步的研究提供可行的理论基础。

## 2 干涉系统的 PGC 解调原理

水下发声目标能够激励水表面产生与该声源波动频率一致的微幅波<sup>[15]</sup>,称之为水表面声波。水表面声波振幅极其微弱,而水表面存在自然频大幅度的波动,因此水表面声波会淹没在自然波动当中。本文采用激光干涉法来探测水面波动,通过改进反正切算法解调出低频水下声源的频率信息。

水表面声波由两部分振动组成,假设水表面自然波动的振幅为  $A_n$ ,角频率为  $\omega_n$ ,初相位为  $\varphi_n$ ;水下声源引起的水表面微幅波振幅为  $A_s$ ,角频率为  $\omega_s$ ,初相位为  $\varphi_s$ 。在参考光路当中引入高频载波,使得干涉信号中产生高频相位。假设引入的高频载波调制度为  $C$ ,角频率为  $\omega_c$ ,初相位

$\varphi_0$ 。利用 Michalson 干涉系统探测水表面振动,测量光受到水表面的调制作用,与参考光发生干涉,被光电转化器件转换为电信号。在滤除直流分量之后,探测信号可以表示为:

$$V(t) = A \cos\{C \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{4\pi}{\lambda} [A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) + A_s \sin(\omega_s t + \varphi_s)]\}, \quad (1)$$

式中:  $A$  为探测信号的增益,其值由光功率以及光电转换模块性能决定;  $\lambda$  为激光波长。设水表面的振动引起的相位为  $\varphi(t)$ , 即有:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} [A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) + A_s \sin(\omega_s t + \varphi_s)]. \quad (2)$$

根据反正切解调算法的基本原理,对携带高频载波的干涉信号进行一倍载波信号  $\cos(\omega_0 t)$  和二倍载波信号  $\cos(2\omega_0 t)$  混频。然后经过低通滤波之后得到两路正交信号<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} U_{1c} = -AJ_1(C) \cos(\varphi_0) \sin[\varphi(t)] \\ U_{2c} = -AJ_2(C) \cos(2\varphi_0) \cos[\varphi(t)] \end{cases} \quad (3)$$

这两路正交信号相除,即可得到最终的解调信号如式(4)所示,水表面的振动  $\varphi(t)$  包含了水表面低频的自然波动和 underwater 声源引起的水表面声波。对  $\varphi(t)$  进行高通滤波滤除低频扰动之后,对信号进行频谱分析即可得到水下声源的频率信息:

$$\varphi(t) = \arctan\left[\frac{1}{B} \cdot \frac{U_{1c}}{U_{2c}}\right], \quad (4)$$

其中:

$$B = \frac{J_1(C) \cos(\varphi_0)}{J_2(C) \cos(2\varphi_0)}. \quad (5)$$

分析式(5)可知,高频载波的调制度  $C$  和初相位  $\varphi_0$  对解调结果产生直接影响。在确定了这两个参数之后,就能够得到准确的相位解调结果,即水表面波的振幅和频率信息。在频率解调当中,由于  $\arctan$  函数是一个单调函数,水下声源频率解调结果与高通滤波之后的  $\varphi(t)$  频率相同,即频率解调结果不受系数  $B$  的影响。所以当探测水下声源的频率信息时,不需要满足初相位和调制度的精确控制。

### 3 改进的解调方式及实验系统设计

#### 3.1 改进的解调方式原理

这种反正切算法存在一个问题,当初相位取得某些值时,会发生正交信号的消息,从而导致解

调结果失真。初相位达到或者接近  $\pi/4 + K\pi/2$  时,  $\cos(\varphi_0)$  或  $\cos(2\varphi_0)$  会接近 0,这就导致其中一路正交信号的消息。可以通过引入四路正交信号的方法,选择信号功率较强的两路正交信号避免消息失真。同时对反正切结果进行值域拓展,获得水下声源频率的准确信息。

改进反正切算法原理如图 1 所示。原始信号经过初步滤波处理之后,对它进行高频载波一倍和二倍的正余弦混频。经过  $\sin(\omega_0 t)$ 、 $\cos(\omega_0 t)$ 、 $\sin(2\omega_0 t)$ 、 $\cos(2\omega_0 t)$  混频后( $\omega_0$  为高频载波的圆频率),通过低通滤波器获得了  $U_{1s}$ 、 $U_{1c}$ 、 $U_{2s}$ 、 $U_{2c}$  四路正交信号。其中  $U_{1s}$ 、 $U_{2s}$  两路信号或  $U_{1c}$ 、 $U_{2c}$  两路信号分别正交,可以通过以上两组信号中的一组解调出水下声源的频率信息。

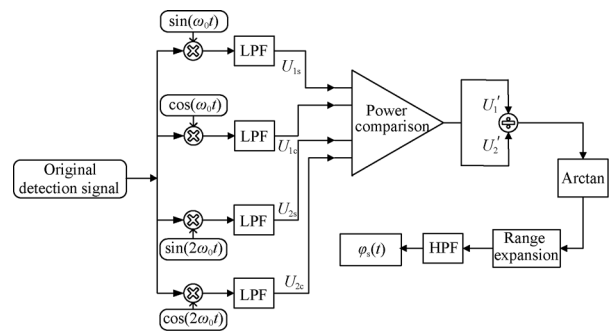


图 1 改进的 PGC 解调方式原理图

Fig. 1 Overview of improved PGC demodulation algorithm

由余弦混频获得的  $U_{1c}$ 、 $U_{2c}$  两路正交信号与常规反正切算法相同,如式(3)所示,获得的正交信号为:

$$\begin{cases} U_{1s} = -AJ_1(C) \sin(\varphi_0) \sin[\varphi(t)] \\ U_{1c} = -AJ_1(C) \cos(\varphi_0) \sin[\varphi(t)] \\ U_{2s} = -AJ_2(C) \sin(2\varphi_0) \cos[\varphi(t)] \\ U_{2c} = -AJ_2(C) \cos(2\varphi_0) \cos[\varphi(t)] \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出,初相位  $\varphi_0$  不可能造成两组正交信号的同时消息。因此选择功率较大的一组正交信号就能够在避免正交信号消息的情况下,准确解调出水表面波动的频率信息。最终水下声源的解调结果可以表示为:

$$\varphi'(t) = \arctan\left[\frac{1}{B'} \cdot \frac{\text{MAX}(U_{1c}, U_{1s})}{\text{MAX}(U_{2c}, U_{2s})}\right], \quad (7)$$

其中  $B'$  与最大功率信号的选择有关,形如式(5)与高频载波的调制度  $C$  和初相位  $\varphi_0$  相关,不影响频率的解调结果。由于反正切函数的值域范围在  $(-\pi/2, \pi/2)$  区间内,但实际上待测信号往往超

出这个范围,因此需要对解调结果进行反正切函数的值域拓展。对采样的离散数据点进行反正切计算,获得在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 区间内的值域。随后利用解相信号的连续性,在判断跳变的方向之后进行周期延拓。输出更新的 $\varphi'(t)$ 即为值域拓展之后干涉信号的真实相位。

### 3.2 仿真分析

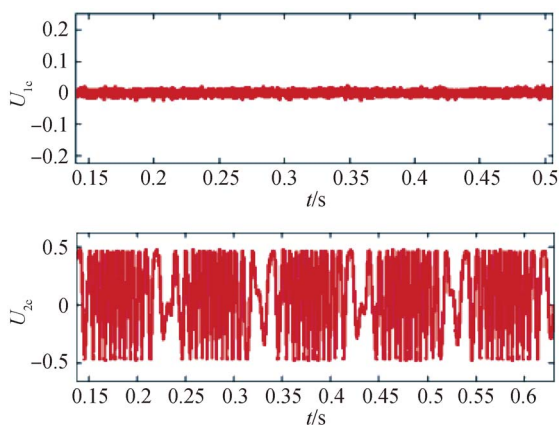
用上述改进的解调算法对水下声信号频率解调进行仿真,水表面自然波动、水下声源以及高频载波等参数设置如表 1 所示。

表 1 水下声信号频率解调仿真参数设置

Tab.1 Parameter setting for simulation of underwater acoustic frequency demodulation

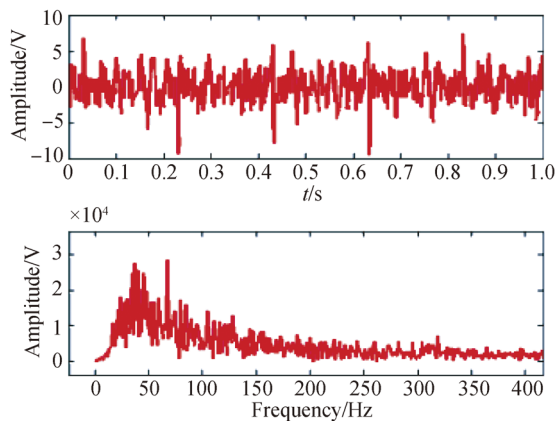
类别	振幅	频率	初相位
自然扰动	$A_n=2\ 000\ \text{nm}$	$f_n=5\ \text{Hz}$	$\varphi_n=0$
水表面声波	$A_s=20\ \text{nm}$	$f_s=100\ \text{Hz}$	$\varphi_s=0.3\pi$
高频载波	$C=2.63\ \text{rad}$	$f_0=10\ \text{kHz}$	$\varphi_0=0.5\pi$
激光波长		$\lambda=632.8\ \text{nm}$	
增益		$A=1\ \text{V}$	
采样率		$f_s=100\ \text{kS/s}$	

利用常规的反正切算法解调,得到图 2(a)所示的两路正交信号。因为在初相位的影响下第一路正交信号 $U_{1c}$ 已经发生了消隐,幅值几乎衰减到零。使用这两路正交信号进行反正切算法相位解调,获得图 2(b)所示解调结果的时域信号及其频谱。可见信号已经完全失真,在频谱中已经完全失去了水下声源 100 Hz 的频率信息。



(a) 正交信号

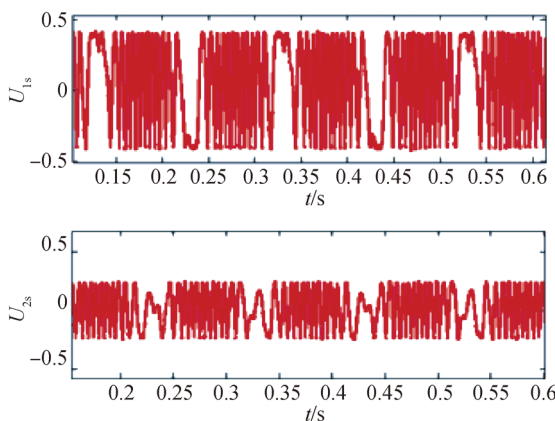
(a) Orthogonal signals  $U_{1c}$  and  $U_{2c}$



(b) 解调信号及其光谱

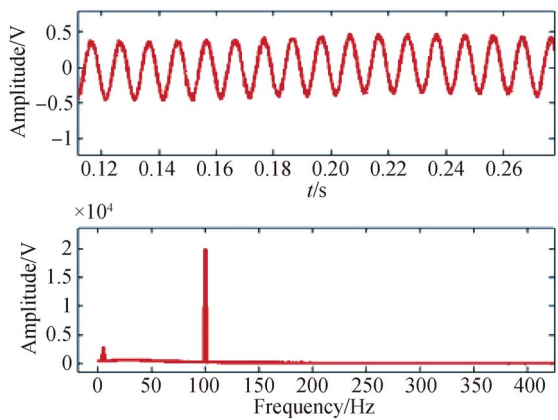
(b) Demodulation signal and its spectrum

图 2 常规反正切算法选取的正交信号及解调结果  
Fig. 2 Original signals and demodulation result of arctangent algorithm



(a) 正交信号

(a) Orthogonal signals  $U_{1s}$  and  $U_{2s}$



(b) 解调信号及其光谱

(b) Demodulation signal and its spectrum

图 3 改进的解调算法选取的正交信号及解调结果  
Fig. 3 Original signals and demodulation result of the improved demodulation algorithm

虽然  $U_{1c}$  在载波初相位的影响下,已经衰减到几乎为零,但是仍然可以通过另外两路正弦混频信号进行下一步的相位解调。通过改进解调方式的功率遴选获得两路正交信号  $U_{1s}, U_{2s}$ , 如图 3(a) 所示,进一步解调得到解调结果的时域信号及其频谱,如图 3(b) 所示。从频谱图中可以准确地反映出水下声源的频率信息为 100 Hz, 可见改进反正切算法能够修正载波初相位引起的信号解调失真。

由于频谱分辨率是 1 Hz, 并且频率解调结果是从最终的频谱当中获取, 因此单次测量呈现的解调结果是间隔为 1 Hz 的整数频率值。理论上单次测量结果的最大误差不会超过 0.5 Hz。

### 3.3 干涉实验系统设计

为了验证理论和仿真结果的准确性,搭建基于激光干涉的水下声源频率探测实验系统,如图 4 所示。氦氖激光器发出的激光分为两束,分别经过参考光路和测量光路之后,回光在光电探测器处发生干涉。信号发生模块一路通道产生高频正弦信号,驱动参考光路水下扬声器振动,从而激励出水面波动做为高频载波。另一路通道产生低频正弦信号,驱动测量光路水下扬声器模拟水下发声目标。该系统的优势在于,一方面由于参考光路和测量光路的部分随机扰动相同,随机扰动得以通过差分的方式给予减弱,进一步提高光路的抗干扰能力;另一方面两路光路都采用水面反射,光强相近从而干涉信号稳定。由于参考光路引入了水面作为载波,水面的自然扰动会引起高频载波调制度的变化。但大量的仿真和实验表明,这种变化不影响水下声源的频率解调。

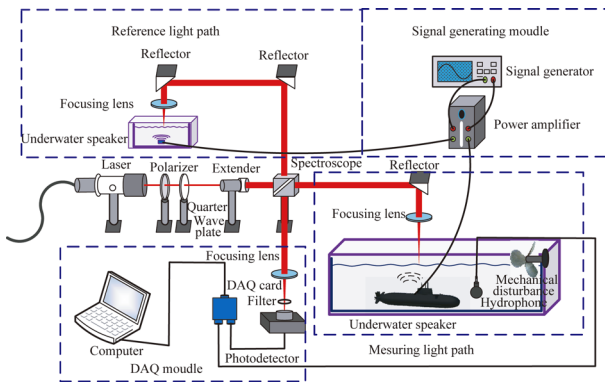


图 4 水下声源频率探测实验系统图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system for underwater acoustic frequency detection

## 4 实验结果及误差分析

### 4.1 水下声源频率探测实验

让信号发生器一路产生 10 kHz 的正弦信号作为高频载波,另一路产生 200 Hz 的低频正弦信号作为水下目标发声频率,实验探测的 200 Hz 水下声源的干涉信号及其频谱如图 5 所示。频谱高频段均匀分布在 10 kHz 附近,这由参考光路产生的高频载波引起,低频段占据 0~800 Hz 的频带。可以看出 200 Hz 水表面声波信号已经完全湮没在低频段,无法使用频谱分析法对信号实施频率解调。

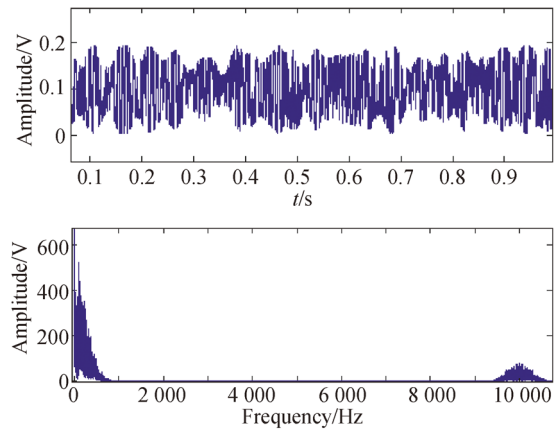


图 5 实测 200 Hz 水下声源干涉信号及其频谱

Fig. 5 Detected interference signal of 200 Hz underwater acoustic source and its spectrum

采用改进的解调算法对信号进行处理,经过四路电子混频得到的四路正交信号如图 6 所示。从图 6 中可以看出,四路信号当中信号  $U_{2c}$  衰减严重。

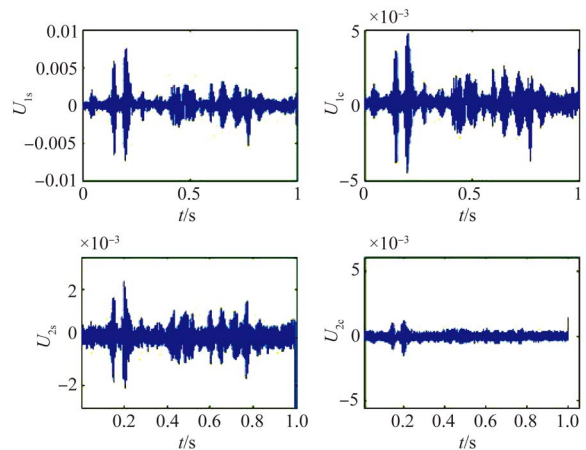
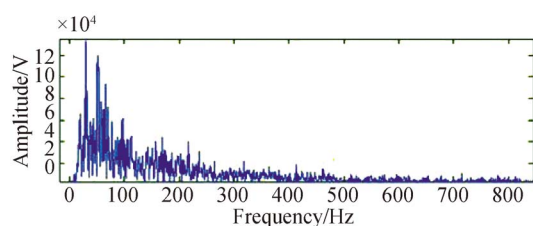


图 6 获得的四路正交信号

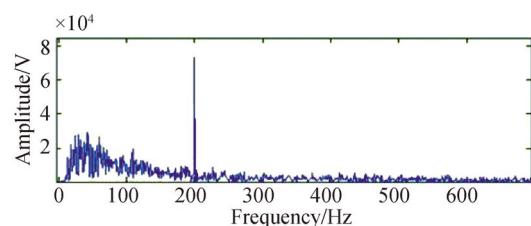
Fig. 6 Four orthogonal signals

如果采用常规的反正切算法,利用的是  $U_{1c}$ ,  $U_{2c}$  两路正交信号进行相位解调,解调结果如图 7(a)所示。因为  $U_{2c}$  信号大幅度衰减,导致最终解调结果出现严重失真。在改进的解调算法中利用功率遴选过程选择出  $U_{1s}$ ,  $U_{2s}$  两路正交信号进行相位解调,解调结果如图 7(b)所示,可以实现低频水下声源频率的准确提取。



(a) 常规算法

(a) Classic algorithm



(b) 改进算法

(b) Improved algorithm

图 7 200 Hz 水表面声波信号解调结果

Fig. 7 Demodulation results of 200 Hz water surface acoustic signal

实验测得 100~2 000 Hz 水下声源频率的解调结果如表 2 所示。理论上单次测量结果的误差不超过 0.5 Hz,实际测量结果的误差较理论值偏大但不仍超过 1 Hz,这是系统当中信号发生器输出频率的误差以及扬声器的响应不稳定造成的。每组进行 10 次测量,将 10 次测量结果的平均值作为频率的解调结果,这样进一步降低了解调结果的误差。从表 2 中可以看出,本组实验测得的最大绝对误差仅为 0.5 Hz;虽然解调结果受到频谱分辨率的影响只能取间隔 1 Hz 的整数,但是多次测量取平均值作为测量结果能够降低测量误差。所以实验条件下,本文采用的改进反正切频率解调方法精度优于 1 Hz。

实验进行了 10 Hz~2 kHz 的多组探测,根据水下声源发声强度和扰动环境的不同,可探测的最低频率也不同,实验条件下解调频率下限约

为 30 Hz。这是因为一方面水表面存在的自然低频扰动引起低频段噪声,另一方面算法也受到数字高通滤波器的性能限制。高频探测上限主要受到高频载波的限制,高频载波频率越高可探测频率上限也就越高。实验表明,改进的反正切算法能够实现低频到高频较宽频率范围的探测,尤其是对于几十赫兹到几百赫兹的低频段具有很强的解调能力。

表 2 实测水下声源频率解调结果

Tab. 2 Experimental demodulation results of underwater acoustic source

$f_0/\text{Hz}$	解调结果 $f_i/\text{Hz}$	均值/Hz	误差/Hz
100	99,100,100,100,99, 100,101,99,99,99	199.5	-0.5
150	150,150,149,151,150, 150,151,150,151,150	150.2	0.2
200	200,200,200,199,200, 199,199,200,199,200	199.4	-0.4
250	251,250,250,250,249, 250,249,249,250,249	249.7	-0.3
300	300,300,300,300,300, 300,300,301,300,300	300.1	0.1
350	350,350,350,349,350, 351,351,351,350,351	350.3	0.3
400	400,401,401,399,399, 400,400,401,401,401	400.3	0.3
450	450,450,450,450,450, 450,449,449,450,450	449.8	-0.2
500	499,500,500,500,500, 500,500,501,501,501	500.2	0.2
1 000	1 000,1 000,1 000,999, 1 000,1 000,1 000	999.9	-0.1
2 000	2 000,1 999,2 000,2 000, 2 000,2 000,2 000	1 999.9	-0.1

#### 4.2 模拟海浪扰动下的探测实验

海面是一个复杂的表面,根据风速、海面起伏等不同海况下,海浪的频谱范围有所差别,但都在几赫兹的范围<sup>[17]</sup>;潜艇同样是一个复杂的噪声源,潜艇产生的噪声几乎覆盖整个频带,并且不同

工况下噪声的强度和分布都有区别。但是潜艇噪声的大部分能量集中在  $10\sim 1\,000$  Hz 的低频段,尤其  $10\sim 200$  Hz 范围内的辐射噪声有很高的能量,且比其他高频噪声传播得更远<sup>[18]</sup>。以往的研究方式不能探测到如此低频的信号,文献[14]也不能取得较理想的解调效果以及解调下限。因此,在实验室环境下模拟海面的大幅度扰动,并且使用本文方法对 200 Hz 以下的低频段频率进行了探测。

模拟海浪扰动下的探测实验,在图 4 实验系统的基础上,使用机械装置在探测水表面增加频率为 2 Hz 的大幅度机械扰动,以模拟海表面的大幅海浪。信号发生器产生 300 Hz 以下的正弦信号驱动水下发声装置模拟潜艇的低频段噪声,光电探测器探测到的干涉信号如图 8 所示。由于被测水表面的大幅度波动,测量回光产生大幅度波动,获得的干涉信号强度随时间变化十分明显。测量回光有时甚至不能与参考光发生干涉,时域波形表现为干涉信号时有时无。此时利用原始 PGC 解调算法,只有少部分信号能够从解调结果中获得正确频率信息,多数信号被淹没在巨大的低频噪声中,且由于选择了功率较小的正交信号,信号解调计算引入了较大误差,得到的结果十分不理想,无法获得正确的解调结果。

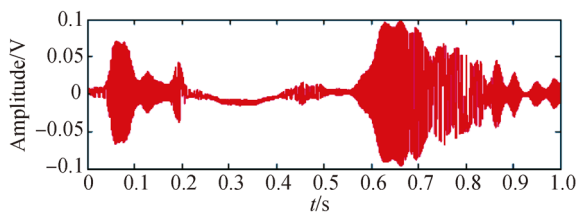


图 8 模拟大幅海浪下的干涉信号

Fig. 8 Interference signals under simulated sea waves

利用改进的 PGC 反正切解调方式对模拟实验的干涉信号进行频率解调,  $60\sim 300$  Hz 的解调结果如图 9 所示。从图中可以看出,即使水表面存在模拟大幅度海浪,但是解调效果仍然十分显

著,解调算法表现出很强的抗干扰能力。实验表明,只要探测时间段内探测到干涉信号,解调算法就能够实现水下模拟潜艇的频率解调,且探测频率越高在频谱上就越容易识别出目标频率。

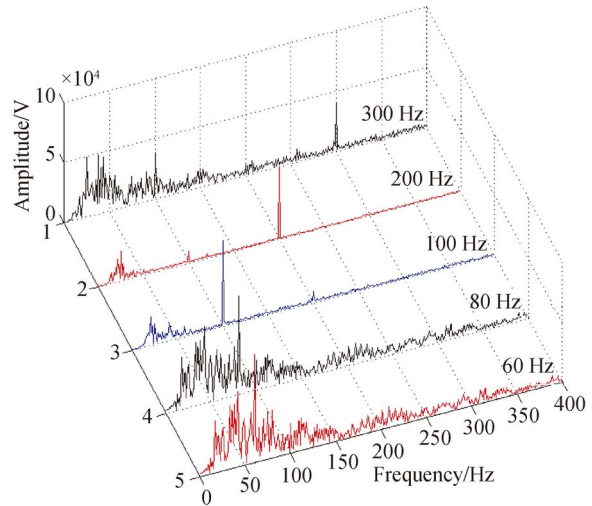


图 9 不同频率模拟探潜的解调结果

Fig. 9 Demodulation results of interference signals of different frequencies in simulation experiment

## 5 结 论

本文针对低频水下声源频率识别的问题,在相位生成载波解调技术的基础上提出了一种改进的 PGC 反正切解调方式,用于实现对高频载波调制信号的相位解调,以获得低频水下声源的频率信息。该方法利用一倍正余弦、二倍正余弦与原始信号进行电子混频,通过功率比较遴选出功率较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引起的相位解调失真问题。低频水下声源探测实验表明,改进的 PGC 反正切解调方式能够准确地实现水下声源频率的解调,在 100 Hz 以上频段的探测频率精度优于 1 Hz,可探测频率的下限约为 30 Hz。最后进行了模拟海浪扰动下的探测实验,验证了系统具有很强的抗干扰能力。

## 参考文献:

[1] SPEARS A, HOWARD A M, WEST M, *et al.*. Determining underwater vehicle movement from sonar data in relatively featureless seafloor tracking

missions [C]. *Proceedings of 2014 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Springs: IEEE*, 2014:909-916.

[2] 张飞飞,赵申东,刘朝晖.基于潜艇运动规律的声呐浮标使用深度研究 [J]. *指挥控制与仿真*, 2017, 39

- (6):30-34.  
ZHANG F F, ZHAO SH D, LIU C H. Depth of sonar buoy based on law of submarine movement [J]. *Command Control and Simulation*, 2017, 39(6):30-34. (in Chinese)
- [3] 陈世哲, 张晓琳, 王波, 等. 激光-声联合探测中水表面声波检测方法进展 [J]. *海洋技术学报*, 2016, 35(3):1-7.  
CHEN SH ZH, ZHANG X L, WANG B, *et al.*. Review on the progress of water surface acoustic wave inspection for the laser-acoustic detection technique [J]. *Ocean Technology*, 2016, 35(3):1-7. (in Chinese)
- [4] 赵龙, 张骏. 激光探测水下声源特征的时频分析 [J]. *激光与红外*, 2017, 47(8):930-936.  
ZHAO L, ZHANG J. Time-frequency analysis of underwater sound source feature with laser interferometry [J]. *Laser and Infrared*, 2017, 47(8):930-936. (in Chinese)
- [5] 董杰. 空间差分干涉的光纤分布式水下声波测量 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9):2317-2323.  
DONG J. Measurement of underwater acoustic wave using optical distributed acoustic sensing based on space difference [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9):2317-2323. (in Chinese)
- [6] 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):69-74.  
WANG Y, FANG E ZH. Underwater acoustic detection utilizing laser luminous flux variation method [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science*, 2009, 33(1):69-74. (in Chinese)
- [7] 苏晓明, 任耀, 陈华, 等. 基于激光衍射法的水下低频声源的深度探测 [J]. *陕西师范大学学报:自然科学版*, 2016, 44(5):53-57.  
SU X M, REN Y, CHEN H, *et al.*. Detection of the underwater low-frequency sound source depth by the laser diffraction [J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science*, 2016, 44(5):53-57. (in Chinese)
- [8] 张骏, 王庆斌, 亓洪兴. 水下声信号激光相干探测的仿真与实验 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(4):449-453.  
ZHANG J, WANG Q E, QI H X. Coherent detection and simulation of the vibration characteristics of underwater acoustic signal [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(4):449-453. (in Chinese)
- [9] 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.  
ZHANG X L, TANG W Y, SUN Y H. Laser interferometry of underwater acoustic signals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):809-815. (in Chinese)
- [10] 张晓琳, 唐文彦, 孙和义. 基于 Morlet 小波的水下声信号频率识别 [J]. *光子学报*, 2010, 21(12):1839-1841.  
ZHANG X L, TANG W Y, SUN Y H. Frequency identification of underwater acoustic signals based on Morlet wavelet [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(12):1839-1841. (in Chinese)
- [11] 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):091202-091206.
- [12] 张晓琳, 李开琴, 刘刚, 等. 基于 Hilbert 变换的水下多源声信号频率的相干探测 [J]. *光子学报*, 2017, 46(7):119-127.  
ZHANG X L, LI K Q, LIU G, *et al.*. Coherence detection of frequency of underwater multi-source acoustic signals based on Hilbert transforms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7):119-127. (in Chinese)
- [13] ZHANG L SH, ZHANG X L, TANG W Y. Detection of water surface capillary wave by analysis of turning-point local signal data using a laser interferometer [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(7):40-45.
- [14] 张烈山, 张晓琳, 刘刚, 等. 基于改进相位生成载波解调的水表面声波激光相干探测 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9):218-226.  
ZHANG L SH, ZHANG X L, LIU G, *et al.*. Laser interferometric detection of water surface acoustic wave based on improved phase-generated carrier wave demodulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9):218-226. (in Chinese)
- [15] 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.  
DAI ZH H, SUN J Z, SUI P F. 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. (in Chinese)
- [16] 倪畅, 张鸣, 朱煜. 采用相位调制方法的光纤干涉仪 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4):288-294.

- NI CH, ZHANG M, ZHU Y. Fiber interferometer based on phase generated carrier method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4):288-294. (in Chinese)
- [17] 吴东, 张小雪, 阎逢旗, 等. 基于星载激光雷达数据的海面风速探测 [J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 251-257.
- WU D, ZHANG X X, YAN F Q, *et al.*. Sea surface wind speed detection by using the data of CALIPSO lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8):251-257. (in Chinese)
- [18] 吕帅, 杨学猛, 张学刚. 基于标准潜艇模型的潜艇机械噪声影响因素分析 [J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(S1):85-89.
- LÜ S, YANG X M, ZHANG X G. The analysis of the influence factors of submarine mechanical noise, based on the standard Benchmark submarine model [J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(S1):85-89. (in Chinese)

#### 作者简介:



张晓琳(1976—),女,吉林人,博士,副教授,2000年于浙江大学获得学士学位,2006年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光干涉测量方面的研究。E-mail: zhangxiaolin@hit.edu.cn



毛红杰(1995—),男,四川乐至人,硕士研究生,2016年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事水表面声波检测与感知方面的研究。E-mail: xiaomaolv2hao@163.com