

doi: 10.3788/gzxb20174607.0712001

基于 Hilbert 变换的水下多源声信号频率的相干探测

张晓琳¹, 李开琴^{1,3}, 刘刚², 张烈山¹, 唐文彦¹

(1 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

(2 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

(3 中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036)

摘 要:为实现水下中低频声信号的探测识别,通过研究水下多声源相干探测信号的特征,理论上给出了相干探测信号频谱混叠情况下的特征表达式,并提出了一种基于 Hilbert 变换的信号解调处理方法,实现了水下多声源相干探测信号频谱混叠情况下各声源发声频率的解调.该方法将探测信号经过滤波平滑处理之后进行 Hilbert 变换,得到信号的解析形式,然后对解析信号模值的平方进行二次滤波平滑等处理,分离混叠在一起的频带,将得到的信号进行频谱分析,根据频移值计算得到水下各个声源的发声频率.在光学暗室下搭建激光相干探测系统,对 2~6 kHz 的水下声信号进行实验,实验结果表明,该方法可以有效分离探测信号中混叠在一起的信号频带,并准确提取各水下声信号的发声频率,频率提取重复性不大于 2.5 Hz.

关键词:水下声信号;频谱分析;激光干涉;信号解调;Hilbert 变换;声光效应;声波传播

中图分类号: TB561; TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0712001-9

Coherence Detection of Frequency of Underwater Multi-source Acoustic Signals Based on Hilbert Transforms

ZHANG Xiao-lin¹, LI Kai-qin^{1,3}, LIU Gang², ZHANG Lie-shan¹, TANG Wen-yan¹

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

(2 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

(3 No. 10 Institute of China Electronic and Technology Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: In order to realize the detection and recognition of underwater acoustic signals, the characteristic expression of coherent detection signal under spectral aliasing was given theoretically, and a kind of signal demodulation method based on Hilbert transform was proposed by studying the characteristics of underwater multi-source coherence detection signals. Acoustic frequency demodulation of underwater multi-sources was realized in case of spectral aliasing. In this method, the Hilbert transform is carried out after filtering and smoothing processes to obtain the analytic form of the signal. Then, the second filtering and smoothing processes are carried out for the squares of the analytic signal modulo to separate the aliasing bands. After that, the spectrum of the obtained signal is analyzed. Frequency of each underwater acoustic signal can be calculated according to the frequency shift value finally. A laser coherence detection system was built in the optical darkroom, and the underwater acoustic signals of 2~6 kHz were experimented. The results show that the proposed method can effectively separate the signal bands that are mixed together in the detection signal, the accurately extract the frequency of each underwater acoustic signal, and the frequency extraction repeatability is not more than 2.5 Hz.

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 61108073)、上海航天科技创新基金(No. SAST2015029)和博士后研究人员落户黑龙江科研启动资助金(No. AUGA4120006016)资助

第一作者:张晓琳(1976-),女,副教授,博士,主要研究方向为空中探测水下目标的信息感知技术. Email: zhangxiaolin@hit.edu.cn

收稿日期: 2017-01-16; **录用日期:** 2017-03-11

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Underwater acoustics; Spectrum analysis; Laser interferometry; Signal demodulation; Hilbert transform; Acoustooptical effects; Acoustic wave propagation

OCIS Codes: 120.3180; 070.1060; 070.4790; 070.1675

0 引言

水下声信号的探测和特征识别一直是海洋工程和国防领域的热点研究问题之一,实现水下声信号的探测是突破对潜通信、水下目标定位等难题的基础^[1-3].水下声信号的频率特征是水下目标重要的可识别特征之一,潜艇、鱼雷等作战目标产生的辐射噪声因工况而不同,但1 kHz以上频段的螺旋桨空化噪声尤为显著,使之成为可被识别探测的水下声源^[4-5].很多军用声呐系统工作中低频段,如美国海军舰壳AN/SQS-53C、AN/SQS-56战术声呐分别在1~5 kHz和5~10 kHz频带发射脉冲^[6].水下声信号的频率特征提取一直备受学者们的关注. Antonelli和Walsh^[7-8]等利用激光多普勒振动计探测水气界面,成功探测到了水下声信号的发声频率;史广智^[9]等基于多分辨率分析提取了船舶辐射噪声的频率特征;贺岩等^[10-11]设计并实现了一套光纤结构的外差式激光多普勒振动计用于水表面声波的探测;张晓琳^[12-13]等利用激光干涉法,通过探测水表面波来研究水下声信号频率信息;苗润才等^[14-15]对低频水下声信号引起的水表面声波进行了一系列的研究;曹增辉^[16]等在实验室条件下搭建了全光纤的水下声信号相干探测系统,研究了不同频率、不同声源强度下,探测信号的信噪比.

激光-声联合探测技术在空中利用激光,在水下利用声波来分别传递信息,发挥各自优势,使得水下目标的检测更加灵活,激光相干法探测水下目标具有反应快、精度高等特点,是近年来水下目标探测备受关注的探测方法.激光相干法水下声信号频率提取主要针对两类声信号,一是单一频率的水下声信号频率提取,二是探测信号频带完全分离的多源水下声信号频率提取.对于多声源相干探测信号频谱混叠情况下的频率提取问题,至今未见公开报道.本文提出一种基于Hilbert变换的水下多声源相干探测信号频谱混叠情况下的频率解调方法,能够将混叠的频谱窄带化,从而分离多声源相干探测信号的频带,准确提取出多个声源频率信息.

1 基本探测原理

水下目标在不同的工作状态下会产生不同频率和强度的噪声,声信号通过水介质传播到水面将引起水表面横向微幅波动,即水表面声波,且水表面声波振动频率与水下声信号频率一致^[17-19].

当水下不存在声源时,水表面自由波动,可以用多个正弦信号的叠加来表示,即

$$y_n(t) = \sum_n a_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中, n 表示自然水表面波动的个数, a_n 、 ω_n 、 φ_n 分别表示自然水表面波振幅、频率和初始相位.

但水下存在声源时,水下声源引起的水表面声波表示为

$$y_m(t) = \sum_m A_m \sin(\Omega_m t + \psi_m) \quad (2)$$

式中, m 表示水下声源个数, A_m 、 Ω_m 、 ψ_m 分别表示水表面声波振幅、频率和初始相位.

激光器发出一束激光,入射到待测水表面,激光束被水表面波调制,其中包含水下声信号频率信息.令返回的激光束与预先设置的参考光进行干涉,干涉信号的光强表示为

$$I = I_1^2 + I_2^2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\{2k[\Delta L + y_n(t) + y_m(t)]\} \quad (3)$$

式中, I_1 、 I_2 为两束激光的光强, ΔL 为水面静止时两路光的初始光程差, k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光束的工作波长.

光电探测器接收干涉信号并将其转换成电信号,滤除直流分量后,探测信号表示为

$$U = U_0 \cos\{2k[\Delta L + \sum_n a_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) + \sum_m A_m \sin(\Omega_m t + \psi_m)]\} \quad (4)$$

为了便于表述,设 $\varphi = 2k[\Delta L + \sum_n a_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)]$, $\psi_m = 0$, $U_0 = 1$.利用三角函数和差化积公式与贝塞尔恒等式

$$\begin{cases} \cos(x\sin\theta) = J_0(x) + 2\sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(x)\cos(2n\theta) \\ \sin(x\sin\theta) = 2\sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(x)\sin((2n-1)\theta) \end{cases} \quad (5)$$

对式(4)进行展开可知,除了自然水表面波动引起的低频分量,在水下声信号一倍频附近相干信号分量的幅值最明显,形成了一个可识别的有用信号频带.因此,通常重点关心水下声信号频率一倍频处的相干信号特征,相干信号为

$$U_{\Omega} = 2J_1(2kA_i) \prod_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^m J_0(2kA_r) \sin\phi \sin\Omega_i t \quad (6)$$

式中, U_{Ω} 表示相干探测信号中频率为 Ω_i 的水下声信号一倍频处的信号幅值.

根据傅里叶变换性质可知,相干探测信号频谱图中,在水下声信号一倍频附近,相干探测信号以水下声信号频率为中心左右频移对称,频移宽度受自然水表面波频率和振幅的影响,幅值不均匀,由贝塞尔函数值决定,文献[12]就是基于此信号特征提取水下单一频率声信号的频率信息的.但当水下存在两个以上声信号,且发声频率接近时,水下声信号调制作用引起的相干探测信号频带混叠在一起,利用传统的谱分析方法无法提取两个以上声源发声频率.针对这个问题,本文提出一种基于 Hilbert 变换的处理方法.

结合 Hilbert 变换对 $H(\cos\omega t) = \sin\omega t$ 、 $H(\sin\omega t) = -\cos\omega t$ 和 Hilbert 调制性质,对相干探测信号进行 Hilbert 变换,得到信号的解析形式 $Z(t)$,对解析信号进行平滑滤波处理后,取其模值的平方,可以得到信号表达式为

$$|Z(t)|^2 = A + B\cos 2\phi + C\cos 2\phi \prod_{m=1}^N J_{|p_m|}(2kA_m) \cos\left(\sum_{m=1}^N p_m \Omega_m t\right) + D \prod_{n=1}^N J_{|q_n|}(2kA_n) \cos\left(\sum_{n=1}^N q_n \Omega_n t\right) \quad (7)$$

并满足约束条件

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^N p_m = 2i - 1 \\ \sum_{n=1}^N q_n = 2i \end{cases}$$

式中, i 为正整数, A 、 B 、 C 、 D 为常数,由各个水下声信号的贝塞尔函数共同决定, p_m 、 q_n 为水下声信号倍频数.

分析式(7),相干探测信号经过处理之后,其频谱结构特征为:

1) 低频段存在幅值明显的频带和谱线,频带主要由自然水表面波引起,带宽取决于贝塞尔函数 $J(2ka_n)$ 的有效阶数,谱线由水下声信号频率的差频分量引起,其幅值不受自然水表面波的影响,由水下声信号引起的水表面声波振幅决定的贝塞尔函数 $J(2kA_n)$ 决定.

2) 当 $\sum_{m=1}^N p_m = 2i - 1$, i 为正整数时,在信号差倍频数之和为奇数的频段出现频带,频带以信号差倍频为中心左右频移,频移带宽受自然水表面波影响,由于多个信号分量的叠加相消效果,频带会变得很窄,使得原来混叠的频带得以分离,但在频率轴上依然以信号差倍频为中心左右对称.根据贝塞尔函数各阶宗量值的大小分布特点,在各个信号一倍频处频带幅值最为明显.

3) 当 $\sum_{n=1}^N q_n = 2i$, i 为正整数时,在信号差倍频数之和为偶数的频段出现谱线,且谱线幅值不受自然水表面波影响,而是取决于由水下声信号引起的水表面声波振幅决定的贝塞尔函数 $J(2kA_n)$.存在谱线的地方同时也存在频带,但频带幅值不仅由贝塞尔函数 $J(2kA_n)$ 决定,还受自然水表面波的影响,由于 $\cos 2\varphi \ll 1$,使得 $C\cos 2\varphi \ll D$,所以频带幅值较谱线幅值极小,在处理时将其忽略掉.

经本文方法处理后的相干探测信号在水下声信号频率一倍频处各信号频带相互分离,幅值明显且频带在频率轴上关于水下声信号频率左右对称,因此可以通过频移值计算提取中心频率,即水下声信号发声频率.

2 仿真分析

为方便分析水表面声波相干探测信号的一般特征,假设自然水表面含有三种不同频率的波动,水下存在两个不同频率的声源.其他参数见表 1.

表 1 仿真参数设置
Table 1 Simulation parameter settings

Parameter	Value
Laser operating wavelength λ/nm	1064
Initial optical path difference $\Delta L/\text{nm}$	1000000
Sampling rate	51200
Amplitude of water surface acoustic wave A/nm	$A_1 = 40$ $A_2 = 30$
Frequency of underwater source $\Omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Omega_1 = 6000\pi$ $\Omega_2 = 6200\pi$
Amplitude of natural water surface wave a_n/nm	$a_1 = 2000$ $a_2 = 1500$ $a_3 = 1100$
Frequency of natural water surface wave $\omega/(\text{rad}^{-1} \cdot \text{s})$	$\omega_1 = 6\pi$ $\omega_2 = 16\pi$ $\omega_3 = 30\pi$

图 1 为仿真干涉信号的时域分布图和频谱分布图.由于自然水表面波动振幅远远大于水下声信号引起的水表面波动振幅(纳米量级),因此时域图中整体疏密相间的曲线是由自然水表面波动引起的,在曲线上出现的载波,即短时间高频相位的变化是由水下声信号激发水表面波动引起的.频域分布图中,除去低频段由自然水表面波引起的频带以外,可以观察到在水下声信号频率一倍频处存在明显频带分布,但该探测信号中由两个水下声信号相位调制引起的信号频带完全混叠在一起,无法直接识别并提取出水下两个声源的发声频率.

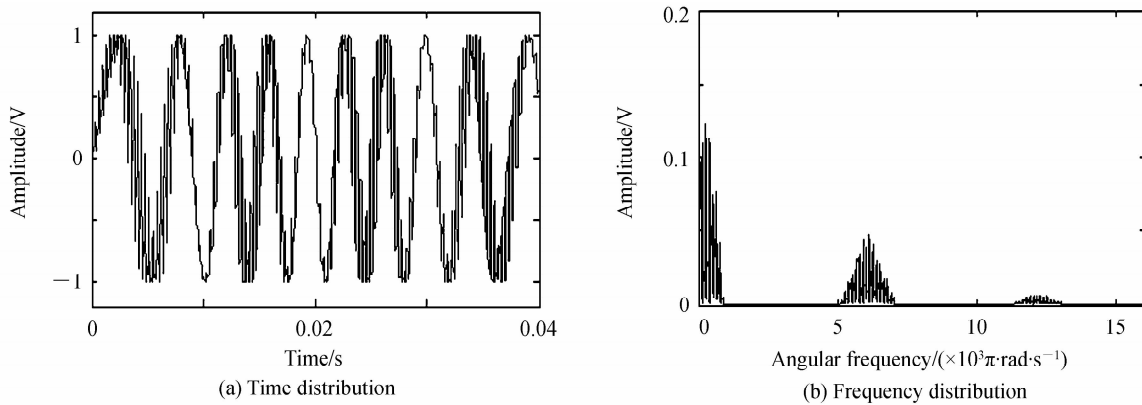


图 1 仿真干涉信号的时域分布和频域分布

Fig. 1 Time domain distribution and frequency domain distribution of simulation inference signal

利用本文方法对仿真信号进行处理,得到处理后的信号频谱分布图和信号频率一倍频处局部放大图如图 2.从信号频率一倍频处局部放大图可以清晰地看到两个明显分离且很窄的频带,在频率轴上分别关于两个水下声信号频率左右对称.

对两个以上水下声源的相干探测信号仿真分析可知,这样的处理同样可以提取出多个声源的发声频率.图 3 为水下存在三个声源时信号处理前后的对比图,其信号频率分别为 3.0 kHz、3.1 kHz 和 3.3 kHz.从仿真频谱分布图来看,仿真结果与理论推导相一致.

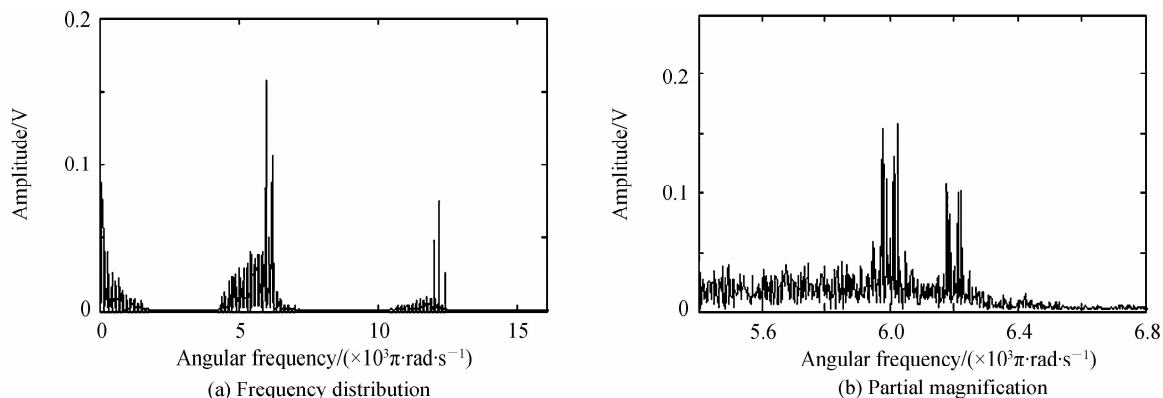


图 2 处理后的仿真干涉信号频域分布

Fig. 2 Simulation inference signal frequency distribution after processing

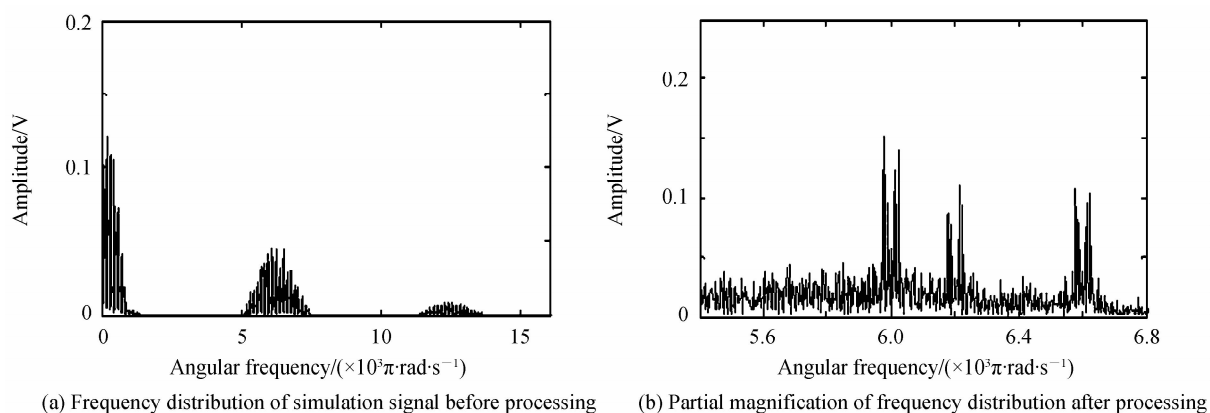


图 3 水下三声源仿真干涉信号频域分布

Fig. 3 Simulation inference signal frequency distribution of three underwater acoustic signals

3 实验装置

搭建如图 4 所示的实验装置. 信号发生器输出标准信号经功率放大器放大之后驱动水下扬声器发声, 模拟水下声信号. 带尾纤激光器输出工作波长为 1 064 nm 的激光束, 经过光隔离器后, 被光纤耦合器分为测量光和参考光, 测量光经过光纤准直器和定焦透镜之后入射到待测水面上, 受到水表面声波的调制后, 测量光的后向散射光通过光纤准直器又回到系统中. 在光纤耦合器中, 测量光和参考光汇合发生干涉, 干涉信号经光电探测器和数据采集卡处理后得到干涉电信号, 计算机接收信号进行进一步的处理.

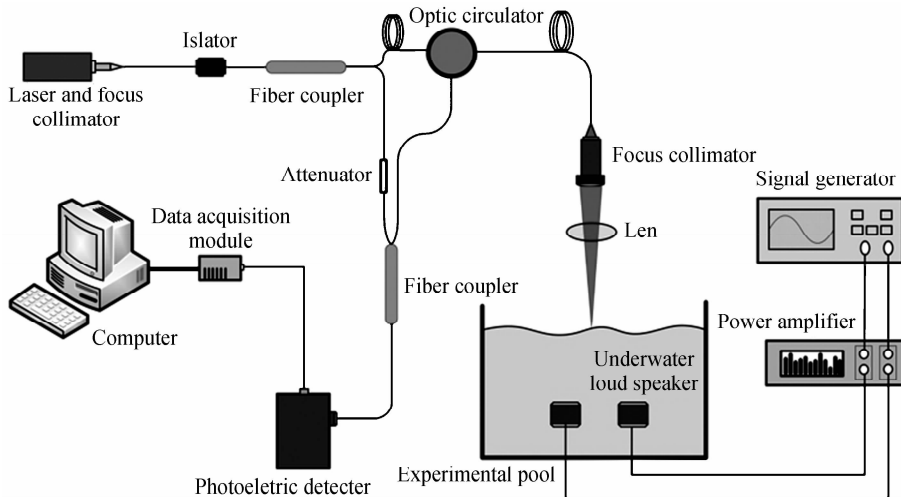


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

4 实验结果与分析

用图 4 搭建的实验装置进行实验,以水下两个声信号为例.信号发生器设置频率为 3.0 kHz 和 3.1 kHz,图 5 为探测得到的信号时域分布图和频域分布图,由于自然水表面的波动频率和波幅都具有较大的随机性,实测信号的时域分布不像仿真信号那么规律,但其基本分布特征仍与理论设想一致.频谱分布图中,水下声信号频率的一倍频附近存在明显的信号频带,但无法直接从中提取出两个水下声信号的频率.图 6 为经过本文方法处理后得到的相干信号频域分布图和水下声信号频率一倍频处局部放大图.可观察到处理结果与理论分析和仿真结果相一致.利用软件编程提取出水下声信号频率为 3.0015kHz 和 3.0992kHz,与信号发生器设置频率基本一致.

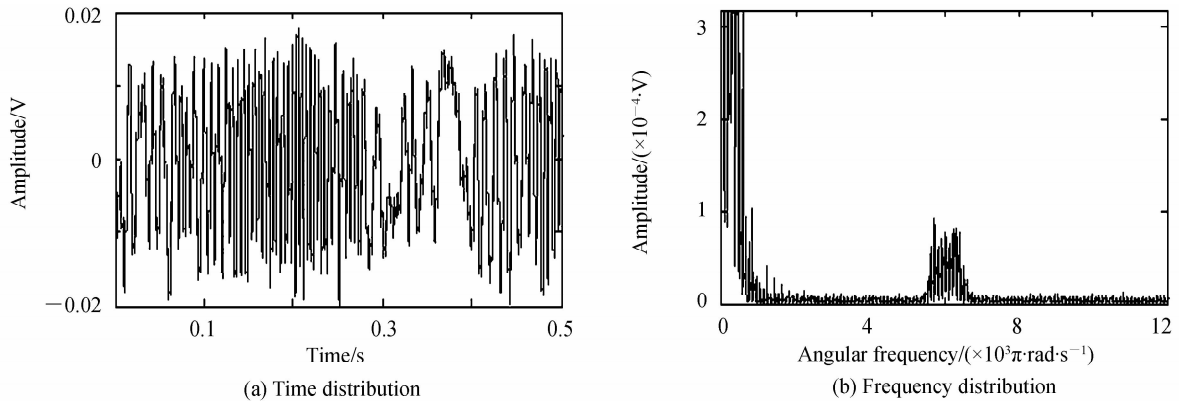


图 5 水下双声源实测信号时域分布和频域分布

Fig. 5 Time domain distribution and frequency domain distribution of detection signal of two underwater acoustic sources

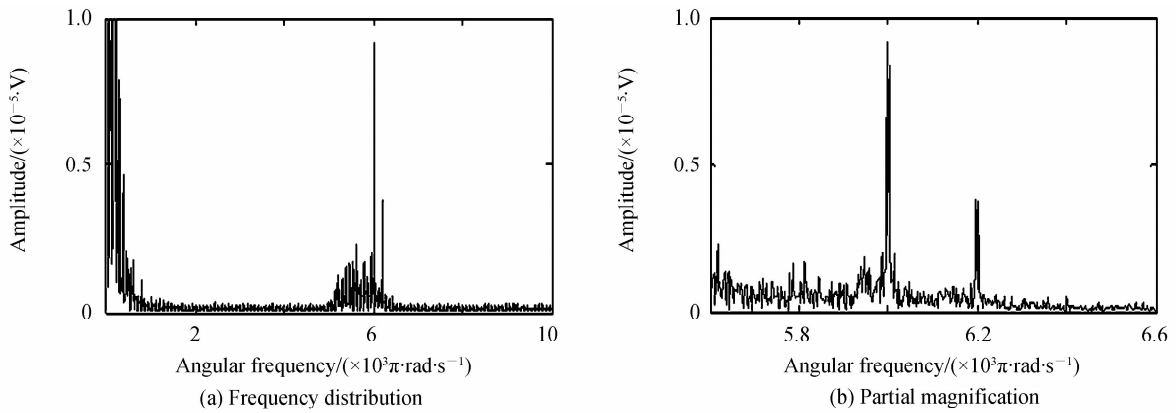


图 6 水下双声源实测信号经处理之后的频域分布

Fig. 6 Frequency distribution of detection signal of two underwater acoustic sources after processing

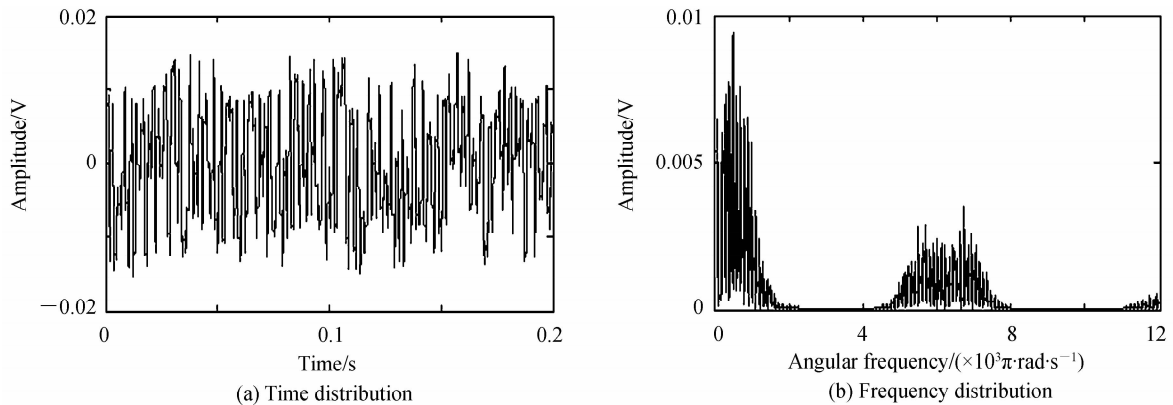


图 7 水下三声源实测信号时域分布和频域分布

Fig. 7 Time domain distribution and frequency domain distribution of detection signal of three underwater acoustic sources

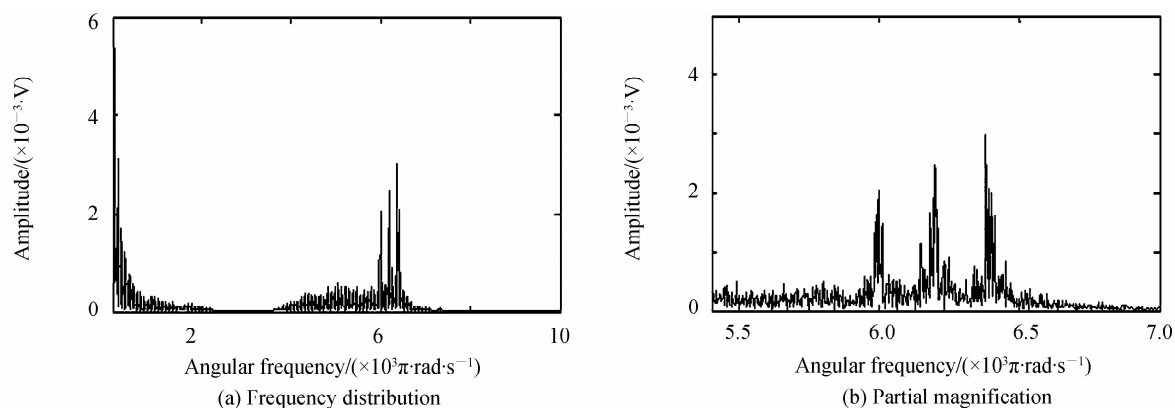


图 8 水下三声源实测信号经处理之后的频域分布

Fig. 8 Frequency distribution of detection signal of three underwater acoustic sources after processing

当水下存在三个声信号时,设置声信号频率为 3.0 kHz、3.1 kHz 和 3.2 kHz,探测得到的信号时域分布图和频域分布图如图 7,图 8 为经本文方法处理之后得到的相干信号的频域分布图和水下声信号频率一倍频处局部放大图,其信号特征与理论设想一致,频率解调结果为 3.0009 kHz、3.0993 kHz 和 3.2021 kHz,与设置频率基本一致.实验验证了本文方法的可行性.

为了验证解调得到的水下声信号频率和信号发生器输出的标准信号频率的一致性,进行了多组对比实验,对每种频率组合的水下声信号的频率进行了 10 次重复性提取,取其平均值作为测量值.水下双声源实验结果见表 2,水下三声源实验结果见表 3.水下双声源实验结果最大标准偏差为 2.13 Hz,与频率发生器设置

表 2 水下双声源实验结果

Table 2 Experimental results for two underwater acoustic sources

No.	Setting frequency/kHz	Frequency demodulation result/kHz	Standard deviation/Hz	Maximum relative error
1	$f_1=2.0$	2.0003	1.81	0.010%
	$f_2=2.1$	2.0998	1.53	-0.052%
2	$f_1=3.0$	3.0005	1.82	0.012%
	$f_2=3.1$	3.0984	1.71	0.036%
3	$f_1=4.0$	4.0000	2.13	0.048%
	$f_2=4.1$	4.1005	0.93	0.034%
4	$f_1=5.0$	4.9996	1.54	-0.031%
	$f_2=5.1$	5.0991	1.83	-0.039%
5	$f_1=6.0$	5.9992	1.92	-0.036%
	$f_2=6.1$	6.0988	1.73	-0.048%

表 3 水下三声源实验结果

Table 3 Experimental results for three underwater acoustic sources

No.	Setting frequency/kHz	Frequency demodulation result/kHz	Standard deviation/Hz	Maximum relative error
1	$f_1=2.0$	2.0008	1.78	0.021%
	$f_2=2.1$	2.0986	2.05	0.017%
	$f_3=2.3$	2.3009	1.57	0.032%
2	$f_1=3.0$	2.9984	1.84	-0.038%
	$f_2=3.1$	3.0979	2.21	0.061%
	$f_3=3.3$	3.3012	1.66	0.036%
3	$f_1=4.0$	4.0014	1.76	0.024%
	$f_2=4.1$	4.1002	1.52	-0.042%
	$f_3=4.3$	4.3008	1.83	0.033%
4	$f_1=5.0$	5.0011	1.65	-0.040%
	$f_2=5.1$	5.0985	2.07	0.058%
	$f_3=5.3$	5.2994	1.52	-0.039%

的信号频率进行对比,最大相对误差为 0.05%。水下三声源实验结果最大标准偏差为 2.21 Hz,与频率发生器设置的信号频率进行对比,最大相对误差为 0.061%。对水下存在四个声源的情况也进行了同样的实验,均能准确提取出水下声信号发声频率,四声源解调结果最大标准偏差为 2.28 Hz。实验证明该方法能有效提取水下多声源声信号的频率。

5 结论

本文对水下多声源相干探测信号频谱混叠情况下的声源频率解调问题进行了研究,提出了一种基于 Hilbert 变换的信号解调方法。理论上推导出了水下多声源相干探测信号的特征表达式;在光学暗室下搭建了一套激光多普勒相干探测系统,对频率在 2~6 kHz 内的水下声源进行了大量的探测实验,并利用本文方法进行了水下多声源发声频率的提取。实验结果表明,该方法可以有效分离探测信号中多个混叠在一起的频带,并准确提取出水下声信号发声频率,验证了本文方法的可行性。分别对两个水下声信号和三个水下声信号进行了探测实验和信号解调,水下声源频率解调结果最大标准偏差不大于 2.5 Hz。对于小于 2 kHz 的水下声信号没有得到较好的解调结果,这是由于自然水表面晃动太大,使自然水表面波动的频带完全淹没了信号频带,另外,由于实验中用到的水下扬声器自身频响特性的影响,更高频的水下声信号探测效果不是很理想,有待进一步研究。该方法可为水下目标探测的信号频率解调提供新的思路。

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]. *IEEE Applications of Computer Vision*, 2014:909-916.
- [2] BUSKENESJ I, ASEN J P, NILSEN C C, *et al.* An optimized GPU implementation of the MVDR beam former for active sonar imaging[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, **40**(2):441-451.
- [3] CHO H, GU J, JOE H, *et al.* Acoustic beam profile-based rapid underwater object detection for an imaging sonar[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2015, **20**(1):1-18.
- [4] XIE Jun, DA Liang-long, HU Jun-chuan. Waveform simulation of low frequency line spectrum on near field radiated propeller cavitation noise[J]. *Technical Acoustics*, 2011, **30**(4):364-368.
谢骏,笄良龙,胡均川. 舰船螺旋桨空化低频辐射噪声时域仿真[J]. *声学技术*, 2011, **30**(4):364-368.
- [5] XIE Jun, DA Liang-long, TANG Shuai. Modeling and simulation of vessel propeller cavitation noise[J]. *Acta Armamentaria*, 2013, **34**(3):294-300.
谢骏,笄良龙,唐帅. 舰船螺旋桨空化噪声建模与仿真研究[J]. *兵工学报*, 2013, **34**(3):294-300.
- [6] ZHAO Pei-cong. Study status and development trend of foreign sonar technology[J]. *Modern Radar*, 2016, **38**(8):20-24,69.
赵培聪. 国外声呐技术研究现状与发展趋势[J]. *现代雷达*, 2016, **38**(8):20-24,69.
- [7] ANTONELLI L, WALSH K, ALBERG A. Laser interrogation of the air-water interface for in-watersound detection: initial feasibility tests[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, **106**(4).
- [8] ANTONELLI LT, KISTEINS I P. Empirical acousto-optic sonar performance versus water surface conditions[C]. *Proceedings of OCEANS 2001, Honolulu*; IEEE Computer Society, 2001, **3**:1546-1552.
- [9] SHI Guang-zhi, HU Jun-chuan, CHENG Yu-sheng. Frequency feature extraction of ship radiated noise based on multi-resolution analysis[J]. *Journal of Qindao University*, 2003, **16**(4):44-48.
史广智,胡均川,程玉胜. 基于多分辨率分析的舰船辐射噪声频域特征提取[J]. *青岛大学学报*, 2003, **16**(4):44-48.
- [10] HE Yan, SHANG Jian-hua, LIU Dan, *et al.* Heterodyne laser Doppler vibrometer for underwater acousto-optic communication[J]. *China Journal of Lasers*, 2009, **36**(1):189-192.
贺岩,尚建华,刘丹,等. 用于水下声光通信的外差式激光多普勒振动计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1):189-192.
- [11] HE Yan, WANG Wen-kui, XIA Wen-bing, *et al.* Laser Doppler vibrometer for acousto-optic communication[J]. *China Journal of Lasers*, 2007, **34**(5):703-706.
贺岩,王文奎,夏文兵,等. 激光多普勒振动计用于水下声光通信[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):703-706.
- [12] ZHANG Xiao-lin, TANG Wen-yan, SUN He-yi. 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.
- [13] ZHANG Xiao-lin, TANG Wen-yan, SUN He-yi. Frequency identification of underwater acoustic signals based on Morlet wavelet[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **21**(12):1839-1841.
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]. *光电子·激光*, 2010, **21**(12):1839-1841.
- [14] MIAO Run-cai, WANG Yu-ming, MENG Feng, *et al.* Detection of underwater low-frequency acoustic signal and wave attenuation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4):432-436.

- 苗润才,王玉明,孟峰,等. 水下低频声信号的激光探测及波的衰减[J]. 光子学报, 2013, **42**(4):432-436.
- [15] WANG Yu-ming, MIAO Run-cai, MA Jing, *et al.* Detection of diffraction light field of low-frequency underwater signal[J]. *Laser Technology*, 2013, **37**(5):686-689.
王玉明,苗润才,马静,等. 低频水下声信号衍射光场的探测[J]. 激光技术, 2013, **37**(5):686-689.
- [16] CAO Zeng-hui, ZHENG Tian-tian, SUN Teng-fei, *et al.* Experiment research on underwater acoustic signal for laser detection[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2014, **29**(2):17-22.
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):17-22.
- [17] DAI Zhen-hong, SUN Jing-zuo, SUI Peng-fei. 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.
- [18] DAI Zhen-hong, SUN Jing-zuo, SUI Peng-fei. Theoretical study on transverse microwave one-dimensional model of water surface[J]. *Journal of Yantai University (National Science and Engineering Editon)*, 2003, **16**(1):23-28.
戴振宏,孙金祚,隋鹏飞. 水表面横向微波一维模型的理论研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2003, **16**(1):23-28.
- [19] ZHANG Xiao-lin. Study of water surface acoustic detection technique based on laser interference[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
张晓琳. 基于激光干涉的水表面声波探测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.