

•激光技术•

激光探测水下振动特征的多尺度变换与时频分析

赵 龙, 张 骏, 杨海梅, 王庆娥

(烟台大学 光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 由于水下振动特征极其微弱, 利用激光相干探测水表面信息, 采用传统频谱分析的方法从水面信息反演出水下振动的特征是一项艰苦的工作。故在传统频谱分析的基础上, 采用短时傅里叶变换和小波多尺度变换联合, 可有效地增强从水表面信息中获取水下振源振动特征。通过对1 000 Hz振源放置水下80 cm处振动实验的分析。结果表明, 水下振源的振动特征得到增强, 有利于目标特征的提取。

关键词: 水下声源; 相干探测; 激光; 短时傅里叶分析; 多尺度变换

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-05-0008-04

Multi-scale Transform and Time-frequency Analysis of Underwater Vibration Characteristic for Laser Detection

ZHAO Long, ZHANG Jun, YANG Hai-mei, WANG Qing-e

(Institute of Science and Technology for Opto-electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: Due to the extremely weak underwater vibration characteristics, with the water surface information detected through laser coherence method, it is a hard work to obtain the underwater vibration characteristics from the water surface information by using traditional spectral analysis. Therefore, on the basis of the traditional spectrum analysis, the underwater vibration characteristics obtained from water surface information can be enhanced effectively with short-time Fourier transform (STFT) and wavelet multi-scale transform. Through analyzing the vibration experiment of a vibration source with 1 000 Hz placed underwater 80 cm, the results show that the underwater vibration characteristics are enhanced, which is useful to extract the target characteristics.

Key words: underwater acoustic source; coherent detection; laser; short-time Fourier transform (STFT) analysis; multi-scale resolution transform

传统的水下目标探测技术是利用声纳进行探测, 发展较为成熟的是船载声纳技术^[1-3], 但由于舰船的速度比较慢, 限制了搜索速度, 使得大区域的快速搜索难以进行, 从而影响了探测效率。因此, 发展非接触式的实现从空中远程探测水下目标的方法具有重要的现实意义^[4-5]。

1997年, Anthony D Matthews 和 Lisa L Arrieta^[6]进行了从液体表面提取声能的探索, 尝试通过合成孔径声纳技术形成水下目标的声音波形。2001

年, 崔桂华等^[7]进行了激光遥感探测水下声信号的实验研究, 并从进入光接收器小孔的光通量变化的角度出发, 导出了光通量变化的表达式。2004年, Lynn Antonelli and Fletcher Blackmon^[8]在静态和动态条件下通过探测水面振动进行了声光传感器遥感探测水下声信号的可行性研究, 并提出了声光传感器与表面跟踪系统集成来改善信号丢失的情况。2005年, 秦慧平等^[9]对100 Hz左右的水下声信号进行了原理性实验, 初步论证了这一技术的可行性。

收稿日期: 2016-09-22

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2011FM007)和中国科学院空间主动光电技术重点实验室开放基金资助

作者简介: 赵龙(1988-), 男, 山东省临沂人, 烟台大学光电信息学院硕士研究生, 主要从事光传输特性的研究。

2009年,张晓琳等^[10-11]对中高频水下声信号探测进行研究,设计并实现了一套空中探测水下声源的实验装置。实验结果表明,水下发声目标引起水表面波动的振幅在纳米级,系统可以实时探测出4~15 kHz的水下声信号。

目前,国内外很多研究所都在进行激光探测水下声信号的研究。但是在室外水面或者海洋表面,由于重力波、表面张力波和非线性波的相互作用等的影响,水下声信号特征往往比较微弱或者淹没在背景中,这就给目标特征的提取带来了困难。因此,通过激光相干探测水面信息,利用多尺度变换和短时傅里叶分析等方法,来增强目标特征。

1 实验

实验所用激光为波长632 nm的红色光,激光通过直径约10 μm 的光纤进行传输。采用光纤传输,不仅能减少外界环境的干扰,而且能使光路简化。

信号发生器产生的信号,经放大后传到水下声源。除了水表面自然波动,水下声源会引起水波振动,形成表面波。水表面的反射光与参考光发生干涉,干涉信号经光纤传到探测器,经过示波器显示和计算机处理。

实验使用一个长和宽为120 cm \times 120 cm,高为105 cm的水箱,声源放置在水下80 cm处。探头固定在水箱的一端,如图1所示。分别如图中1,2,3和4探测位置采集水下振动信息。

光电探测器型号:DET02AFC。DET02AFC高速光纤耦合探测器设计用于400~1 100 nm光谱范围。它们使用基于FDS02光电二极管的硅探测元件,带宽是1.2 GHz。

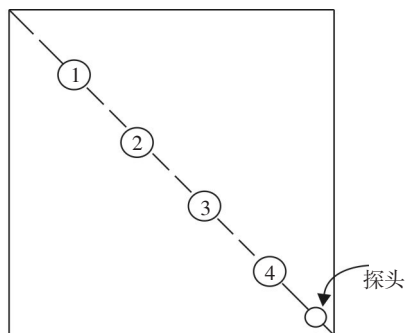
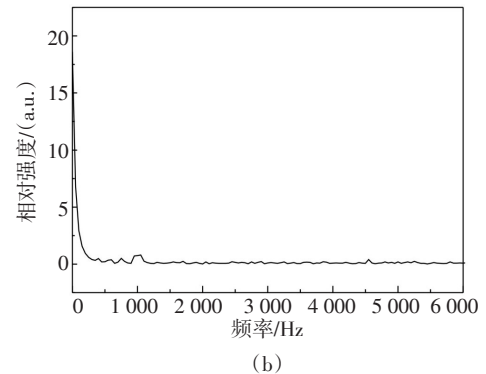
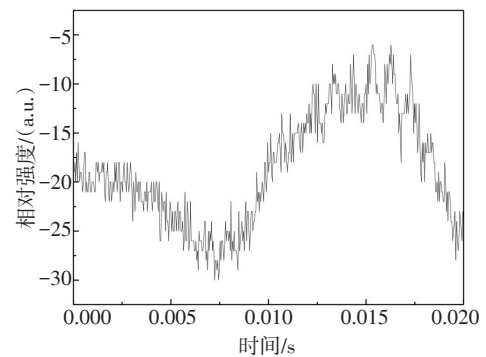
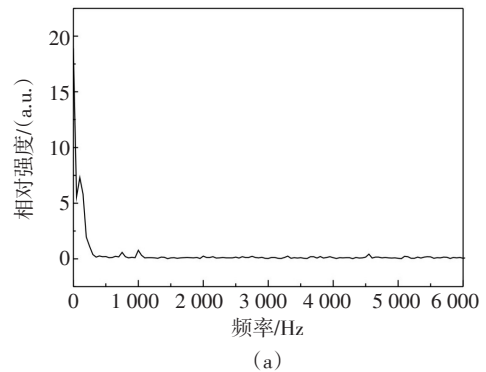
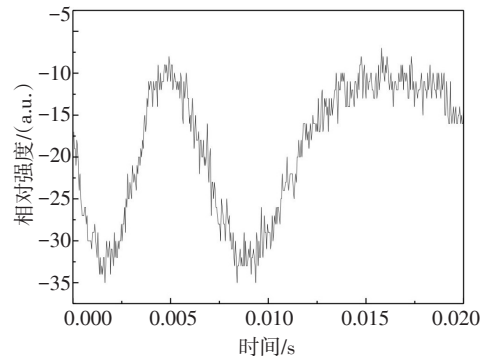
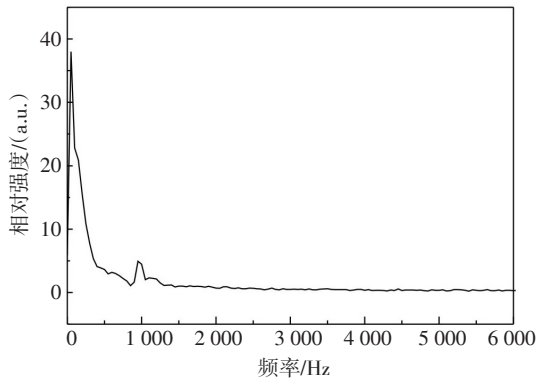
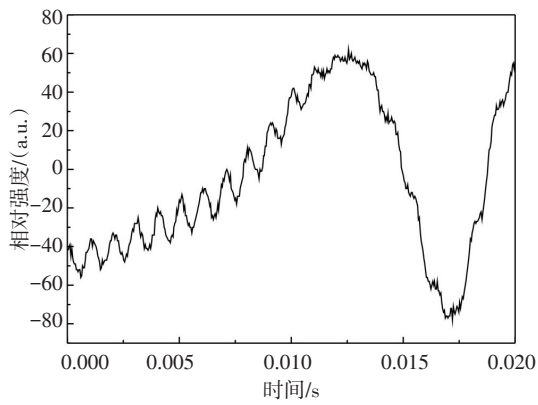


图1 测量点分布

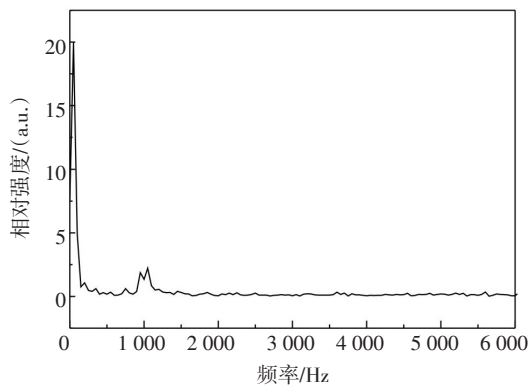
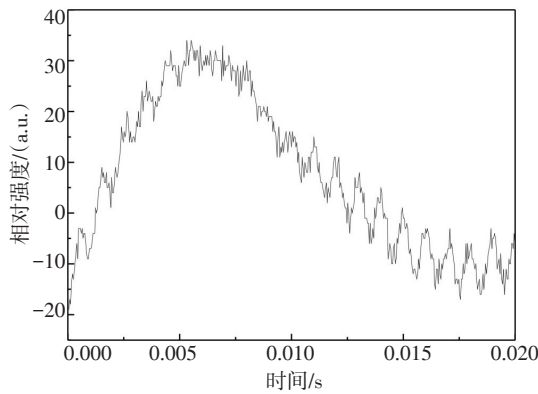
2 实验结果与分析

水下声源的输出振幅为1 V,振动频率为1 000 Hz。不同位置处探测到的信号及对应的频谱分析如图2所示。图2a、图2b、图2c和图2d四组数据分别对应图1的1,2,3和4四个位置。从图中频谱分析结果可知,振源越远,能探测到的振动频率的特征越小。





(c)



(d)

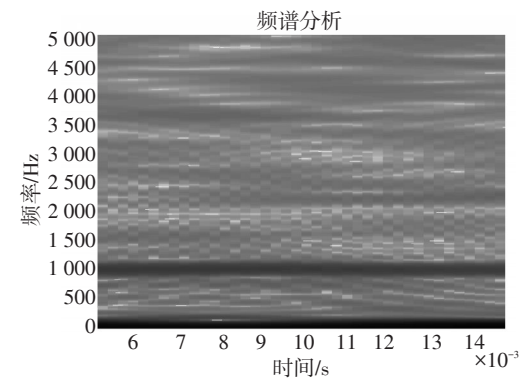
图2 水下振源不同位置,激光相干探测的实验数据,与之对应的频谱

3 特征增强

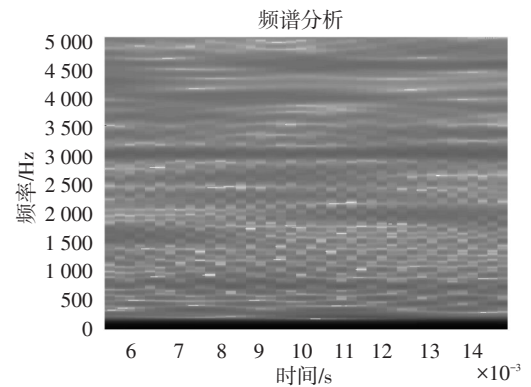
为了更好的提取振动特征,在分析实验数据时,采用了短时傅里叶变换。短时傅里叶变换(ST-FT)是一种动态分析方法。它是在离散傅里叶变换的基础上,通过引入一个可以随时间变化的窗函数来实现的,如下所示

$$F(k; \tau) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)w(\tau-n)e^{-i\frac{2\pi}{N}nk} \quad (1)$$

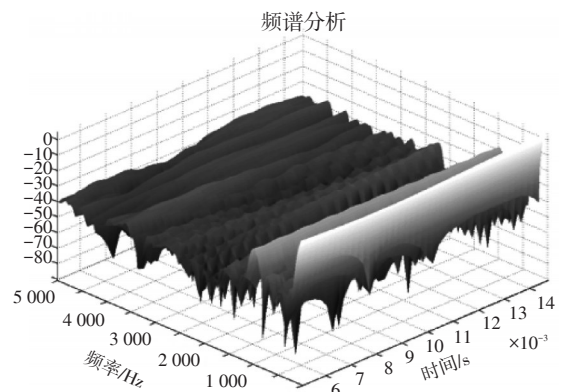
通过对实验数据进行短时傅里叶变换,结果如图3所示。



(a) 1 000 Hz



(b) 3 000 Hz



(c) 1 000 Hz

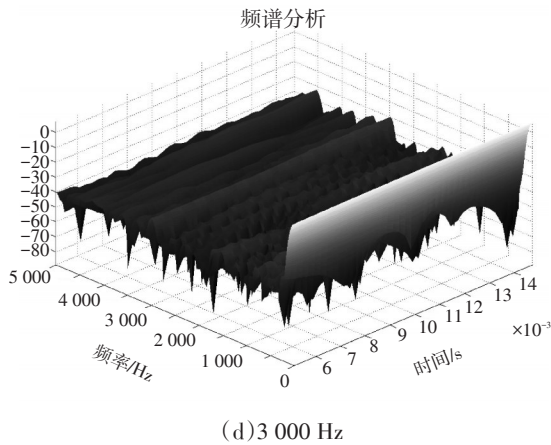
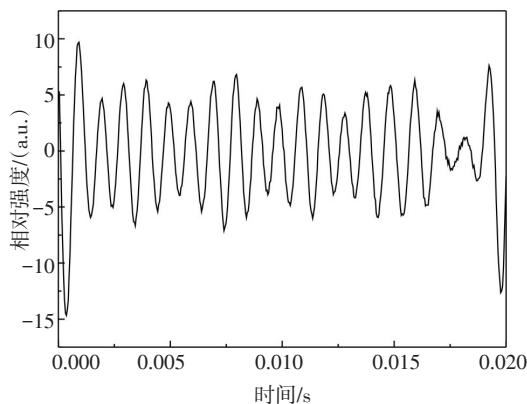


图3 短时傅里叶变换结果

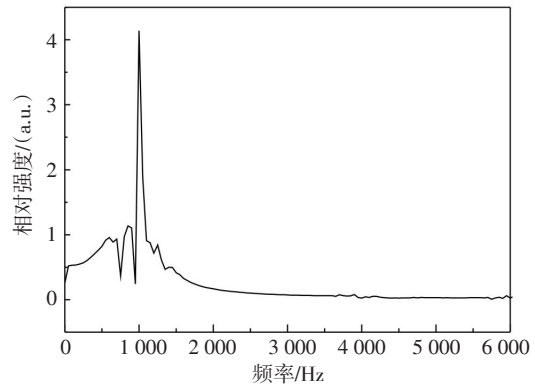
从图3a~图3b中可以看到,两个振动特征的特征频率分别集中在1 000 Hz和3 000 Hz附近。这和信号发生器的输出频率,即水下扬声器的输出频率一致。另外,低频部分属于水表面自然波动。图3c和图3d显示的是STFT的三维变化,可以看到,随时间增加,振动的特征频率一直存在。

另外,为了更好地增强目标特征,对实验数据进行多尺度的小波变换,从复杂的信号中分离出目标的振动特征。由于在不同的尺度下对信号进行小波变换,可以增强不同尺度下的频率特征,分析结果如图4所示。

图4a是在特定尺度下,从激光相干探测的水表面实验数据中分离出的水下振源的振动特征。经过快速FFT变化,图4b清楚地显示出其振源振动的频率,即水下振源以1 000 Hz的振动频率在振动。因此,经过一系列特征增强的处理,目标的特征得到有效地增强。



(a)选择合适的尺度



(b)频谱分析

图4 多尺度变换后得到的振源振动特征数据和频谱分析结果

4 结 论

激光相干探测水的表面,可以获得水下振源的振动信息。要从特征信息微弱的的数据中反演出水下振源的振动特征,采用了短时傅里叶变换和多尺度变换方法,可有效地增强其目标特征,为后续特征的提取打下了良好的基础。通过对比实验,结果证实,所建立的短时傅里叶变换和多尺度变换联合处理方法,对水下振源的振动特征的增强非常有效,为目标特征的提取提供了方便。

参考文献

- [1] LIU Guan-ling, LING Guo-min, YAN Qi. Review and prospect of active sonar detection techniques [J]. Technical Acoustics, 2007, 26(2):335-340.
- [2] Lourens JG, Preez JAD. Passive sonar ML estimator for ship propeller speed [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1998, 23(4):448-453.
- [3] HOU Peng, XU Wen-hai, WANG Jun-sheng, et al. Time delay estimation of the shortest path in real-time monitoring of water depth with oblique incidence sonar [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(8):1634-1639.
- [4] 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): 17-21.
- [5] DUAN Hai-peng, TANG Wen-yan, LIU Li-hua, et al. Me-

(下转第16页)

- cations, 2015, 63(9):3363-3376.
- [4] Jakubisin D, Buehrer R M. On the complexity- performance trade-off in code-aided frame synchronization[C]// IEEE, International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2014:364-368.
- [5] Chen Z, Yuan J. A code-aided soft frame synchronization algorithm for quasi-cyclic LDPC coded system[C]// International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, IEEE, 2009:1-4.
- [6] Imad R, Houcke S. Theoretical analysis of a MAP based blind frame synchronizer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(11):5472-5476.
- [7] Bastaki E, Tan H H, Shi Y, et al. Frame synchronization based on multiple frame observations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(3):1097-1107.
- [8] Wymeersch H, Moeneclaey M. Iterative code-aided ML phase estimation and phase ambiguity resolution[J]. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, 2005, 2005(6):981-988.
- [9] Zhang H, Huang W, Wang Z, et al. Code-aided frame synchronization and phase ambiguity resolution[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(7):2747-2757.
- [10] Herzet C, Wymeersch H, Simoens F, et al. MAP-based code-aided hypothesis testing[J]. Wireless Communications IEEE Transactions, 2008, 7(8):2856-2860.
- [11] 易湘, 岳鹏, 刘增基, 等. 基于分集接收技术的相干大气激光通信系统性能分析[J]. 光电子·激光, 2012, 23(9):1743-1748.
- [12] YAO Qing-han, DANG An-hong, REN Yong-xiong, et al. Theoretical and experimental studies of turbo product code with time diversity in free space optical communication[J]. Optics Express, 2010, 26(18):26978-26988.
- [13] Theodoros A Tsiftsis, Harilaos G Sandalidis, George K Karagiannidis. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2009, 8(2):951-957.
- [14] NIU Ming-bo, CHENG Ju-lian, Jonathan F Holzman. Exact error rate analysis of equal gain and selection diversity for coherent free-space optical systems on strong turbulence channels[J]. Optics Express, 2010, 18(13):13915-13926.

(上接第7页)

- 2006, 73(4):047201-4.
- [8] Rogister F, Roy R. Spatiotemporal chaos synchronization in a large array of locally coupled nonidentical lasers[J]. Laser Phys, 2005, 15(2):313-319.
- [9] Aviad Y, Reidler I, Kinze W, et al. Phase synchronization in mutually coupled chaotic diode lasers[J]. Phys Rev E, 2008, 78(2):025204-4.
- [10] Haken H. Analogy between higher instabilities in fluids and lasers[J]. Phys Lett A, 1975, 53(1):77-78.

(上接第11页)

- dium and low frequency underwater acoustic signals detecting with laser interferometry[J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2009, 20(9):1189-1192.
- [6] Anthony D Matthews, Lisa L Arrieta. Acoustic optic hybrid (AOH) sensor [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(3):1089-1093.
- [7] CUI Gui-hua, LI Rong-fu, TIAN Zuo-xi. Study on laser-based remote sensing of underwater acoustic signals[J]. Ship and Marine Science & Technology, 2002, 24(1):46-50.
- [8] Antonelli Lynn, Blackmon Fletcher. Experimental demonstration of remote, passive acousto-optic sensing[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(6):3393-3403.
- [9] QIN Hui-ping, ZHOU Tian-hua, ZHANG De-kun. Study on laser-based underwater acoustic signal detection technologies[J]. Infrared, 2005, 26(8):25-28.
- [10] ZHANG Xiao-lin, TANG Wen-yan, DUAN Hai-peng. Under-water acoustic signals detecting with laser interferometry[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2009, 35(1):53-56.
- [11] 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.