

基于 Hilbert 变换及间歇混沌的水声微弱信号检测方法研究

陈志光 李亚安 陈晓

Underwater acoustic weak signal detection based on Hilbert transform and intermittent chaos

Chen Zhi-Guang Li Ya-An Chen Xiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 200502 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.200502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.200502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于滚动时域估计的飞行器姿态估计及三轴磁强计在线校正

Attitude estimation and three-axis magnetometer on-line calibration based on moving horizon estimation

物理学报.2015, 64(21): 210502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210502>

单稳系统的脉冲响应研究

Pulse response of a monostable system

物理学报.2015, 64(21): 210503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210503>

电压控制正极性输出罗变换器的改进平均模型建模及稳定性分析

Improved averaged model and stability analysis of voltage-mode controlled positive output super-lift Luo converter

物理学报.2015, 64(21): 210506 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210506>

基于 Hilbert 变换及间歇混沌的水声微弱信号检测方法研究

Underwater acoustic weak signal detection based on Hilbert transform and intermittent chaos

物理学报.2015, 64(20): 200502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.200502>

三稳系统的动态响应及随机共振研究

Dynamic response and stochastic resonance of a tri-stable system

物理学报.2015, 64(20): 200503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.200503>

基于 Hilbert 变换及间歇混沌的水声微弱信号检测方法研究*

陈志光 李亚安[†] 陈晓

(西北工业大学航海学院, 西安 710012)

(2015 年 1 月 28 日收到; 2015 年 5 月 27 日收到修改稿)

利用 Duffing 振子从混沌到间歇混沌的相变及其对策动力和待检测信号频差较小的周期信号的敏感性, 研究了强海洋背景噪声下微弱周期信号的检测. 通过构造混沌振子列的方法对频率未知信号进行扫频, 从而提取待检测信号的频率范围, 最后利用希尔伯特变换, 实现对间歇混沌的包络检测, 并计算出待检测信号的频率. 计算机仿真与实测水声信号处理结果表明, 利用基于希尔伯特变换的间歇混沌振子对水声微弱信号检测, 其检测信噪比比一般的间歇混沌振子提高了至少 4.4 dB, 验证了所提方法的有效性.

关键词: Duffing 振子, 间歇混沌, Hilbert 变换, 包络检测

PACS: 05.45.-a, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.64.200502

1 引言

微弱信号检测是指在强噪声背景下检测微弱信号的某些参数, 如信号的频率、幅值、相位等^[1]. 通常情况下, 当信噪比低于 -10 dB 时, 使用常规的检测方法将很难从噪声背景中提取出信号的特征参数^[2]. 另外, 当背景噪声出现非平稳、非高斯时, 传统的微弱信号检测, 如匹配滤波、相干累积、最优检测等方法便很难对其进行有效的检测^[3-5]. 利用混沌振子检测极其微弱的周期信号是近年来信号检测领域的一个研究热点^[6], 特别是当待检测信号具有一定的周期分量时, 混沌检测具有更大的优势.

混沌振子检测微弱周期信号的基本原理是利用混沌振子对极其微弱周期信号的敏感性以及对任意分布背景噪声的免疫性来实现微弱周期信号的检测^[7]. 理想情况下, 利用混沌振子检测白噪声背景下的正弦信号, 其检测信噪比可达 -60 dB, 对于方波信号, 在色噪声背景下的检测信噪比可

达 -48 dB^[8]. 虽然混沌振子对微弱周期信号具有很高的检测信噪比, 但是, 由于混沌振子对频率已知的待检测信号有效, 因此, 这种方法也仅限于检测频率已知的微弱信号, 给实际应用带来了很大的不便. 实际应用中, 由于待检测信号的频率参数大多未知, 这时对频率参数的估计便成为混沌振子检测的首要问题^[9]. 近年来, 李月等^[8]利用 Duffing 振子实现了对微弱信号的检测; 范剑等^[10]围绕 Duffing 振子的混沌检测方法, 对系统在不同状态的容噪性进行了分析; 针对 Duffing 振子在临界参数上的不稳定问题, 赖志慧等^[9]提出了一种新的变尺度的方法; 丛超等^[11]在此基础上构造适应性的混沌振子列对舰船线谱做了进一步的研究. 这些方法的提出使得混沌振子在微弱信号检测上更加稳定, 但是依然没有解决未知频率的参数问题.

基于此, 本文在 Duffing 混沌振子检测的基础上, 首先从理论上分析了 Duffing 混沌系统动力学的基本特性; 其次, 通过构造混沌振子列对未知频率的信号进行频率扫描, 产生间歇混沌振荡; 最后, 利用希尔伯特变换对间歇混沌进行包络检测, 使得

* 国家自然科学基金 (批准号: 51179157, 51409214, 11574250) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liyaan@nwpu.edu.cn

待检测信号的频率可以被直接计算, 从而使得混沌振子列对于检测未知频率信号的问题得到解决.

2 间歇混沌检测原理

Duffing 检测模型下的运动方程为

$$\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) + dU(x)/dx = F(t). \quad (1)$$

当外场力 $F(t)$ 为角频率 ω , 幅值 γ 的周期驱动力为 $\gamma \cos(\omega t)$ 时, 方程 (1) 变为

$$\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) - x(t) + x^3(t) = \gamma \cos(\omega t), \quad (2)$$

(2) 式称为 Holmes 型 Duffing 系统方程^[12], 其中, k 为阻尼比, $-x(t) + x^3(t)$ 为非线性恢复力. 由于非线性项的存在, Duffing 方程具有丰富的非线性动力学特性^[13], 是研究混沌运动的常用模型之一. 当阻尼比 k 固定时, 周期策动力幅值 γ 从 0 逐渐增加, 当 γ 增加到某一临界值时就会出现同宿轨道, 产生混沌运动. 当 γ 进一步增加超过阈值 γ_c 时系统进入大周期状态, 实现了系统状态的变化, 即所谓的相变.

在临界混沌状态下, 策动力幅值的微小变化可能引起系统状态的变化, 且 Duffing 系统对噪声具有很强的免疫力^[14]. 混沌检测正是利用 Duffing 振子的这些特性来实现对微弱周期信号的检测. 对于未知频率的微弱信号, 目前则利用系统的间歇混沌特性实现对信号频率的检测.

假设输入到系统的强噪声背景下的待测信号为 $S(t) = s(t) + n(t)$, 其中 $s(t) = A \cos((\omega + \Delta\omega)t + \varphi)$, $\Delta\omega$ 为待检测信号与系统的周期策动力之间的频率差, 且 $\Delta\omega \ll \omega$; φ 是两者的相位差, $n(t) \sim N(0, \delta^2)$ 为背景噪声. 将包含噪声的待检测信号作为周期策动力输入混沌系统, 这时的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega y, \\ \dot{y} = \omega(-k \cdot y + x - x^3 + \gamma \cos(\omega t) + S(t)). \end{cases} \quad (3)$$

令 $\gamma = \gamma_c$, 使系统处于临界混沌状态, 此时系统的周期策动力变为

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= \gamma_c \cos(\omega t) + A \cos((\omega + \Delta\omega)t + \varphi) + n(t) \\ &= \gamma_c \cos(\omega t) + A \cos(\omega t) \cos(\Delta\omega t + \varphi) \\ &\quad - A \sin(\omega t) \sin(\Delta\omega t + \varphi) + n(t) \\ &= \gamma'(t) \cos(\omega t + \theta(t)) + n(t), \end{aligned} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} \gamma'(t) &= \sqrt{\gamma_c^2 + 2A\gamma_c \cos(\Delta\omega t + \varphi) + A^2}, \\ \theta(t) &= \arctan \frac{A \sin(\Delta\omega t + \varphi)}{\gamma_c + A \cos(\Delta\omega t + \varphi)}, \end{aligned}$$

γ_c 为系统处于混沌临界状态时的阈值. 一般 $A \ll \gamma_c$, 所以 $\theta(t)$ 就非常小, 它对系统动力学的影响可以忽略. 因此, 我们可以得到以下结论:

1) 如果 $\Delta\omega = 0$, 对系统的运动起决定性作用的是 φ , 当 $\pi - \arccos(A/(2\gamma_c)) \leq \varphi \leq \pi + \arccos(A/(2\gamma_c))$ 时, $\gamma'(t) \leq \gamma_c$, 系统仍处于混沌状态, 当 φ 不在这个区间时, 系统状态将由混沌状态迅速向周期状态转变;

2) 如果 $\Delta\omega \neq 0$, $\gamma(t)$ 将以 $T = 2\pi/\Delta\omega$ 周期性地大于或小于 γ_c , 因此系统的状态将进入规则的间断性混沌状态, 即混沌状态和大尺度周期状态以稳定的规则周期性地交替出现, 利用这一规则可以实现对微弱周期信号的频率进行检测;

3) 如果 $\Delta\omega$ 较大时, 系统策动力的变化使系统不能及时做出反应, 对于与策动力信号频率的频差较大的待测信号, 系统对其具有一定的免疫性, 即使施加足够大的信号, 系统也不一定能发生相变, 使系统不能产生规则的间歇混沌运动.

由以上分析可知, 间歇混沌可以检测与策动力的频差较小的外界微弱周期信号, 而对于频差较大的信号, 系统对其具有免疫性. 根据这一结果可以利用混沌振子列扫描的方法来实现低信噪比的信号检测.

3 利用混沌振子列求解信号的未知频率

Duffing 系统呈现有规则的间歇混沌现象的条件是 $|\Delta\omega/\omega| \leq 0.03$ ^[15]. 利用间歇混沌检测信号, 其具体步骤为: 将待测信号所在的频段以 $h(h \in (0.97 - 1.03))$ 为公比划分为一个频率数列, 根据频率数列中的每一频点设定一组系统参数, 然后将待测数据分别加入到各组参数对应的检测系统中, 并观察系统的时域输出.

当把信号输入到这个混沌振子列之后, 稳定的间歇混沌状态将会出现, 且仅出现在相邻的混沌振子 k 和 $k+1$ 之间 (有可能碰巧出现了大尺度周期状态), 而其他振子将处于不稳定间歇混沌状态, 这就说明待测信号的频率位于 ω_k 与 ω_{k+1} 之间. 基于以

上分析, 采用间歇混沌振子列模型可以实现对实际舰船信号的检测.

为了验证混沌振子列对实际舰船信号的检测效果, 我们选取一组实测的舰船信号作为样本数据, 实测检测信号的时域波形如图 1 所示, 频域波形如图 2 所示, 它的频率参数未知, 且含有一定的海洋背景噪声.

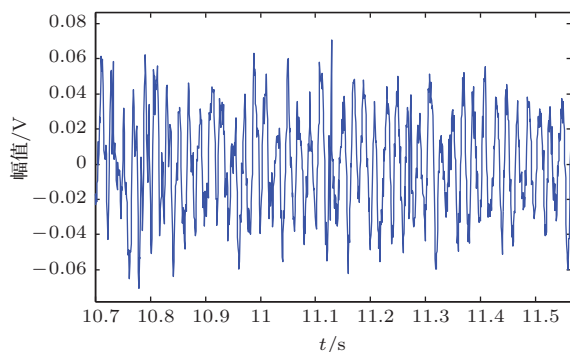


图 1 实测水声信号

Fig. 1. Real underwater acoustic signal.

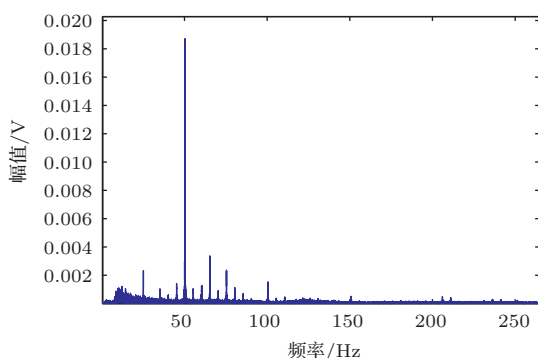


图 2 实测水声信号频谱

Fig. 2. Spectrum of the real underwater acoustic signal.

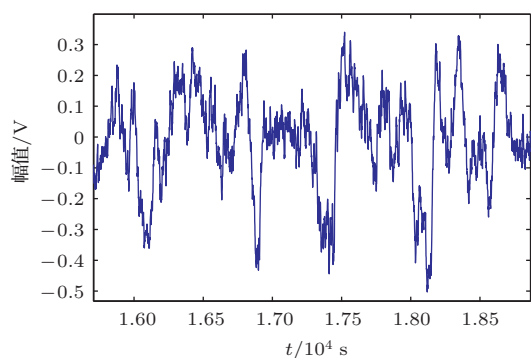


图 3 海洋背景噪声下实测水声信号

Fig. 3. Real underwater acoustic signal with ocean background noise.

从信号的时域波形可以看出, 此样本数据的信噪比很高, 采用混沌振子列对其检测可以很容易地得到检测结果. 为了突出混沌振子列对微弱周期

信号检测的优势, 我们对图 1 所示的实测舰船信号叠加海洋背景噪声, 即在待测信号 $s(t)$ 中加入归一化的海洋背景噪声 z_s (频段分布在 1 Hz—100 kHz 之间), 并对信号乘以系数 0.015, 这时待检测信号变为 $S = 0.015s(t) + z_s$, 时域波形如图 3 所示, 频域波形如图 4 所示. 由图所示在信噪比较低的情况下, 直接利用快速傅里叶变换 (FFT) 进行分析并不能检测到待测的水声信号. 使用间歇混沌振子列的方法对未知信号 S 进行检测, 图 5 和图 6 分别为策动力频率在 49.4896 和 50.9743 Hz 时的检测情况. 从图 5 和图 6 可以看到稳定的间歇混沌现象, 从而判断待测信号存在, 且待检测信号的频率介于 49.4896 和 50.9743 Hz 之间. 此时, 检测信号的信噪比为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\sum(s^2)/N}{\sum(z_s^2)/N} = -18.4 \text{ dB}.$$

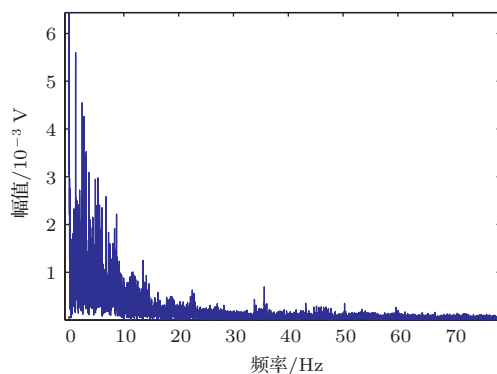


图 4 海洋背景噪声下实测水声信号频谱

Fig. 4. Spectrum of the real underwater acoustic signal with ocean background noise.

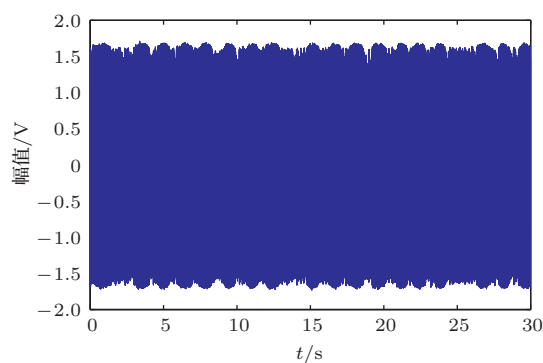


图 5 策动力为 49.4896 Hz 时的间歇混沌

Fig. 5. Intermittent chaos when the driving signal is 49.4896 Hz.

从以上的检测结果可以看出, 采用混沌振子列可以检测出淹没在强海洋背景噪声干扰中的舰船信号, 检测信噪比可达 -18.4 dB.

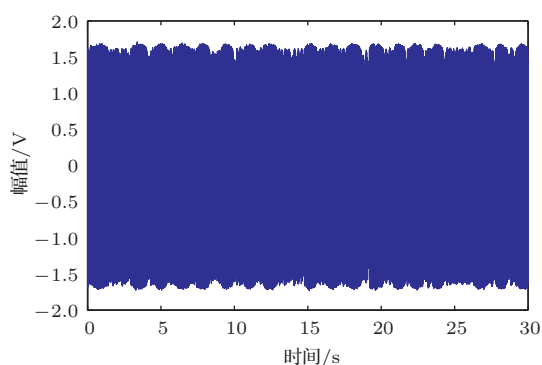


图6 策动力为 50.9724 Hz 时的间歇混沌

Fig. 6. Intermittent chaos when the driving signal is 50.9724 Hz.

4 基于 Hilbert 变换包络检测的未知信号频率的计算

通过间歇混沌构造混沌阵子列的方法, 已经可以对未知频率的信号进行初步的检测, 但是并不能准确得到间歇混沌包络的频率, 也就无法对待测信号的频率进行精确的检测. 为了能够对待检测信号的频率进行检测, 提出了利用 Hilbert 变换的方法对间歇混沌进行包络分析, 首先提取出间歇混沌的周期 T , 从而实现对待测信号频率的精确检测.

由于间歇混沌的输出是一个典型的窄带信号, 因此, 可以利用以下模型表示:

$$x(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)), \quad (5)$$

可以得到它的包络为

$$|a(t)| = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)}. \quad (6)$$

根据间歇混沌包络频率的计算公式

$$\frac{2\pi}{\Delta\omega} = \frac{2\pi}{2\pi\Delta f} = \frac{1}{\Delta f} = T = \frac{1}{f} \quad (7)$$

即可得到待测信号的真实频率, f 为策动力频率与真实频率之差的绝对值, 即间歇混沌包络的频率值.

为验证 Hilbert 变换的包络检测效果, 使用频率分别为 10 和 20 Hz 的待测正弦信号进行检测. 对于频率为 10 Hz 的正弦信号将策动力频率调制为 9.7 Hz, 对于频率为 20 Hz 的正弦信号将策动力频率调制为 19.5 Hz. 并对其由于频差产生的间歇混沌包络使用希尔伯特变换的方法检测频率. 检测效果如图 7 和图 8 所示.

由图 7 可知, 间歇混沌包络频率为 0.293 Hz, 由图 8 可知间歇混沌包络频率为 0.4944 Hz. 根据

(7) 式可以计算出经实验测量得到的信号频率分别为 9.993 Hz 和 19.9944 Hz, 可得出相对误差分别为 0.07% 和 0.028%, 与理论设定的信号频率值相比具有优良的检测效果.

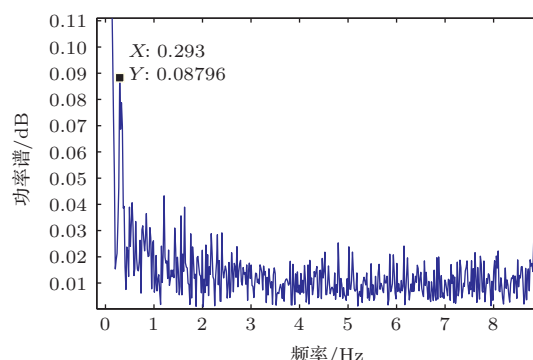


图7 10 Hz 正弦信号 Hilbert 包络检测频谱

Fig. 7. Spectrum of Hilbert envelope at 10 Hz sine signal.

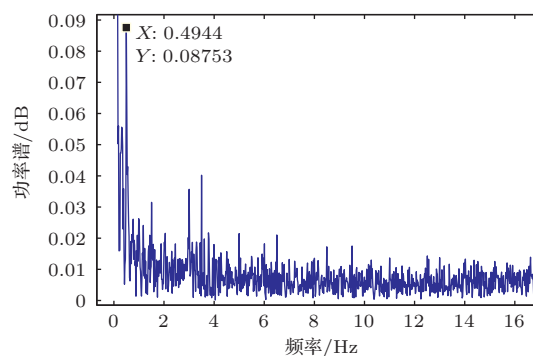


图8 20 Hz 正弦信号 Hilbert 包络检测频谱

Fig. 8. Spectrum of Hilbert envelope at 20 Hz sine signal.

对之前的实测海洋水声信号进行检测, 如图 9—图 12 所示, 分别为策动力在 $\omega = [48.04, 49.49, 50.97, 52.50]$ 下的检测效果.

由实验测得包络频率并根据 (7) 式计算得到待测信号频率分别为 50.256, 50.276, 50.274, 50.266 Hz. 可见 Hilbert 变换对真实信号的间歇混沌包络也有良好的提取效果.

进一步给之前的真实信号加上噪声, 并给信号乘以一个系数, 用 Hilbert 变换方法进行包络检测. 则待测信号为 $s = 0.01s(t) + z_s$.

由于信噪比的降低, 离待测信号频率较远的混沌振子已不能很好地进行检测, 这里只选取和待测信号频率相邻的振子进行检测. 图 13 和图 14 分别为策动力信号频率为 49.45 和 50.97 Hz 时信号包络检测结果.

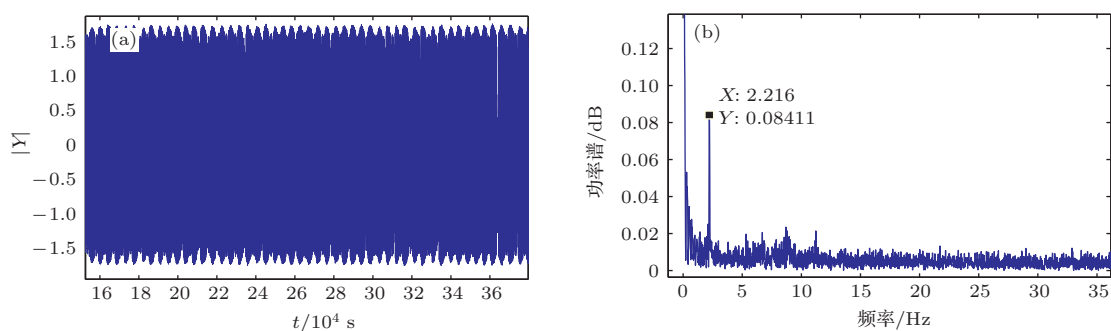


图9 策动力频率为48.04 Hz时实测水声信号检测 (a) 间歇混沌检测; (b) Hilbert 变换包络检测

Fig. 9. Driving signal frequency at 48.04 Hz for real underwater acoustic signal: (a) Intermittent chaos detection; (b) spectrum of Hilbert envelope.

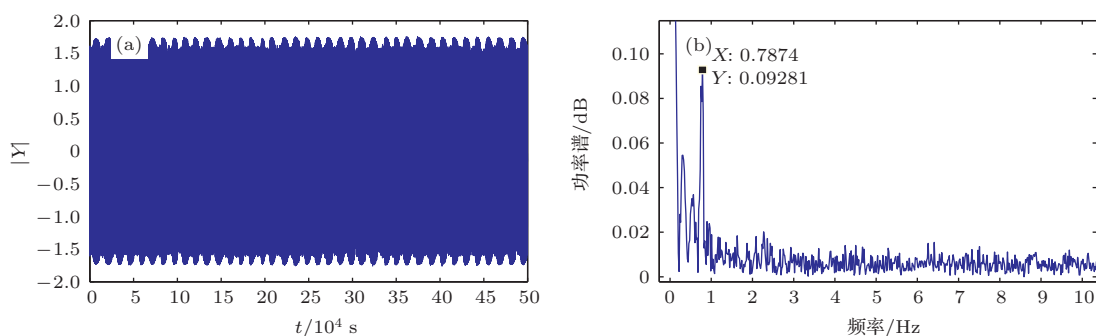


图10 策动力频率为49.49 Hz时实测水声信号检测 (a) 间歇混沌检测; (b) Hilbert 变换包络检测

Fig. 10. Driving signal frequency at 49.49 Hz for real underwater acoustic signal: (a) Intermittent chaos detection; (b) spectrum of Hilbert envelope.

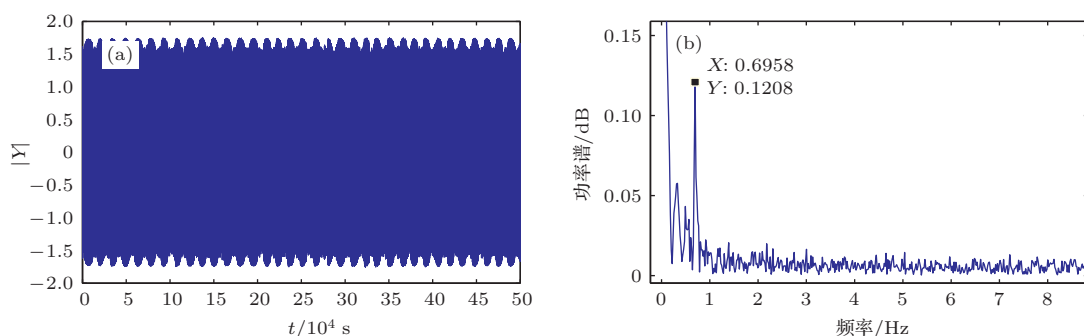


图11 策动力频率为50.97 Hz时实测水声信号检测 (a) 间歇混沌检测; (b) Hilbert 变换包络检测

Fig. 11. Driving signal frequency at 50.97 Hz for real underwater acoustic signal: (a) Intermittent chaos detection; (b) spectrum of Hilbert envelope.

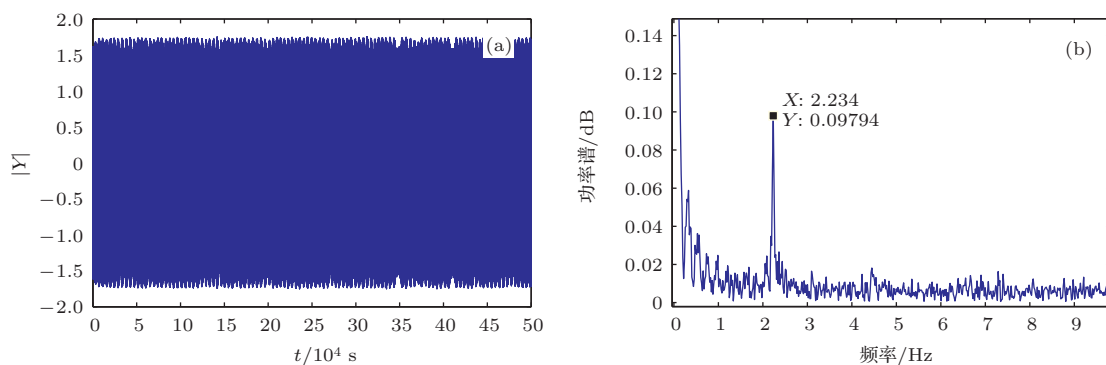


图12 策动力频率为52.50 Hz时实测水声信号检测 (a) 间歇混沌检测; (b) Hilbert 变换包络检测

Fig. 12. Driving signal frequency at 52.50 Hz for real underwater acoustic signal: (a) Intermittent chaos detection; (b) spectrum of Hilbert envelope.

由图 13 和图 14 可知, 当策动力信号频率为 50.97 Hz 时, 包络检测效果较好, 进一步降低了信号幅值. 图 15 为策动力信号频率在 50.97 Hz 时, 信号幅值乘以系数 0.009, 信号包络检测结果. 此时 $s = 0.009s(t) + z_s$.

可以看出, 在间歇混沌已经不能明显对信号做

出检测时, 用 Hilbert 变换的方法依然可以得到较为清晰的包络检测. 如图 12 所示, 实测得间歇混沌包络频率为 0.6958 Hz, 根据 (7) 式对待测信号频率进行计算, 为 50.274 Hz. 此时的检测信噪比为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\sum(s^2)/N}{\sum(z_s^2)/N} = -22.8 \text{ dB}.$$

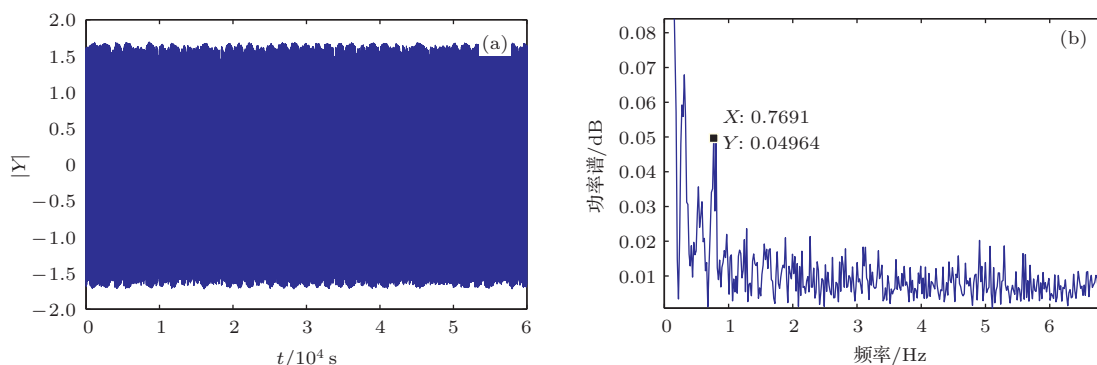


图 13 策动力频率为 49.49 Hz 时实测水声信号检测 (a) 间歇混沌检测; (b) Hilbert 变换包络检测

Fig. 13. Driving signal frequency at 49.49 Hz for real underwater acoustic signal: (a) Intermittent chaos detection; (b) spectrum of Hilbert envelope.

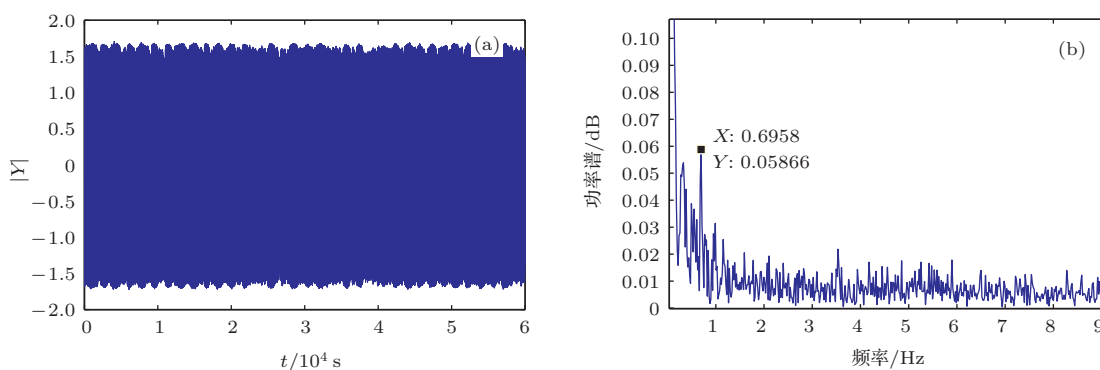


图 14 策动力频率为 50.97 Hz 时实测水声信号检测 (a) 间歇混沌检测; (b) Hilbert 变换包络检测

Fig. 14. Driving signal frequency at 50.97 Hz for real underwater acoustic signal: (a) Intermittent chaos detection; (b) spectrum of Hilbert envelope.

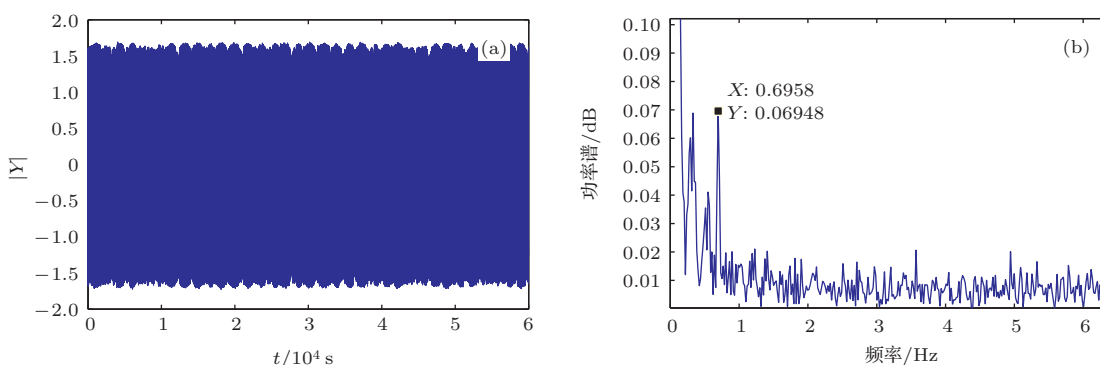


图 15 策动力频率为 50.97 Hz 时实测水声信号检测 (a) 间歇混沌检测; (b) Hilbert 变换包络检测

Fig. 15. Driving signal frequency at 50.97 Hz for real underwater acoustic signal: (a) Intermittent chaos detection; (b) spectrum of Hilbert envelope.

对频率未知的待测实测舰船信号利用混沌振子列进行检测时, 信噪比可以达到 -18.4 dB, 但是只能通过肉眼对系统状态进行分辨, 不够精确且不能实现自动检测; 但通过希尔伯特包络检测的方法可以对系统状态实现自动检测, 解决了混沌振子列不能对待测信号精确求解的问题, 同时信噪比也得到了降低, 达到 -22.8 dB.

5 总 结

本文通过对混沌振子的基本动力学模型进行分析, 研究了利用间歇混沌原理构造混沌阵子列进而实现对极其微弱的水下未知频率信号进行有效检测的方法. 对于间歇混沌检测, 由于目前还没有一个有效的方法对待检测信号的频率进行估计, 只能凭借经验方法加以判断, 存在较大的人为误差, 影响了间歇混沌振子检测的效果, 也给实际应用带来了较大的困难. 本文首次提出了利用 Hilbert 变换方法检测间歇混沌的包络, 进而通过包络计算待检测信号的频率. 通过对仿真和实测水声信号的检测处理, 表明本文提出的检测方法具有较好的检测效果, 并且在强背景噪声干扰下待检测微弱信号的频率可以被直接计算出来, 从而解决了目前存在的利用混沌振子检测未知频率信号时的频率估计问题, 且检测信噪比得到了一定的改善, 比一般的间歇混沌振子提高了 4.4 dB, 为混沌振子检测水下微弱目标信号的实际应用奠定了很好的基础.

参考文献

- [1] Xia J Z, Liu Y H, Leng Y G, Ge J T 2011 *Noise and Vibration Control* **31** 156 (in Chinese) [夏均忠, 刘远宏, 冷永刚, 葛纪桃 2011 噪声与振动控制 **31** 156]
- [2] Li Y, Yang B J 2004 *Chaotic Oscillator Detection Introduction* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p29 (in Chinese) [李月, 杨宝俊 2004 混沌振子检测引论 (北京: 电子工业出版社) 第 29 页]
- [3] Gao J Z 2005 *Weak Signal Detection* (Beijing: Tsinghua University Press) p2 (in Chinese) [高晋占 2005 微弱信号检测 (北京: 清华大学出版社) 第 2 页]
- [4] Zhou K B, Dou C Q, Chen T 2007 *J. Wuhan Univ. Technol.* **29** 53 (in Chinese) [周凯波, 豆成权, 陈涛 2007 武汉理工大学学报 **29** 53]
- [5] Nie C Y 2009 *Chaotic Systems with Weak Signal Detection* (Beijing: Tsinghua University Press) p38 (in Chinese) [聂春燕 2009 混沌系统与微弱信号检测 (北京: 清华大学出版社) 第 38 页]
- [6] Birx D L 1992 *IEEE International Joint Conference on Neural Networks* Baltimore, MD, USA, June 7–11, 1992 881
- [7] Qin H L, Sun X L, Jin T 2010 *10th International Conference on Signal Processing* Beijing, China, October 24–28, 2010 p2501
- [8] Li Y, Shi Y W, Ma H T, Yang B J 2004 *Acta Electron. Sin.* **32** 87 (in Chinese) [李月, 石要武, 马海涛, 杨宝俊 2004 电子学报 **32** 87]
- [9] Lai Z H, Leng Y G, Sun J Q, Feng S B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 050503 (in Chinese) [赖志慧, 冷永刚, 孙建桥, 范胜波 2012 物理学报 **61** 050503]
- [10] Fan J, Zhao W L, Wang W Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 180502 (in Chinese) [范剑, 赵文礼, 王万强 2013 物理学报 **62** 180502]
- [11] Cong C, Li X K, Song Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 064301 (in Chinese) [丛超, 李秀坤, 宋扬 2014 物理学报 **63** 064301]
- [12] Li Y, Yang B J 2007 *Chaotic Vibration Subsystem (L-Y) and Detection* (Beijing: Science Press) p57 (in Chinese) [李月, 杨宝俊 2007 混沌阵子系统 (L-Y) 与检测 (北京: 科学出版社) p57]
- [13] Liu B Z, Peng J H 2004 *Nonlinear Dynamics* (Beijing: Higher Education Press) p143 (in Chinese) [刘秉正, 彭建华 2004 非线性动力学 (北京: 高等教育出版社) p143]
- [14] Zhu L P, Zhang L Y, Xie W F, Li N 2012 *Radio Engineering* **42** 17 (in Chinese) [朱来普, 张陆勇, 谢文凤, 李楠 2012 无线电工程 **42** 17]
- [15] Wang Y, Chen D J 1999 *Trans. Industrial. Electron.* **46** 440

Underwater acoustic weak signal detection based on Hilbert transform and intermittent chaos^{*}

Chen Zhi-Guang Li Ya-An[†] Chen Xiao

(School of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710012, China)

(Received 28 January 2015; revised manuscript received 27 May 2015)

Abstract

In the paper, we analyse the basic dynamical model of the chaotic oscillator by using the theory of intermittent chaos to construct the column of the intermittent chaos, and present an effective method to detect the weak underwater acoustic signal with an unknown frequency. Duffing oscillator is sensitive to phase transformation from chaos to intermittent chaos, whose frequency difference is slightly different from that between the driving force signal and the signal to be detected. By employing this theory, we detect the frequency of the ship signal in ocean background noise. For the detection by using the intermittent chaos, there exists no effective way to estimate the frequency of the signal to be detected, which can only be judged by empirical methods and therefore the man-made error will exist. All of these will affect the consequence of the intermittent chaos and make the practical application difficult. To solve this problem, in this paper, we first study the basic theory of the chaotic system, then construct the simulated signal to examine the system, and finally detect the ship signal. To make the detection feasible, a chaotic oscillator column is considered to sweep through the unknown frequency of the signal. By using this method, we can obtain the frequency range. Finally Hilbert transform is used to detect the envelope of the intermittent chaos followed by measuring the frequency of the envelope through using Fourier spectrum. Thus the frequency of the signal can be calculated by using the function describing the relationship among the driving force signal, ship signal and the envelope. The simulations and the detection processing of the measured acoustic signal are carried out by using the proposed method, which can effectively detect the frequency of the ship signal embedded within strong background noise and also the frequency of the signal to be detected can be calculated, which is conducive to solving the presently existing problem about frequency estimation. Signal-to-noise ratio can be enhanced by 4.4 dB based on the method by using the Hilbert transform compared with by using the method just through using an intermittent chaotic oscillator column, which verifies the effectiveness of the method in this paper.

Keywords: Duffing oscillator, intermittent chaos, Hilbert transform, envelope detection

PACS: 05.45.-a, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.64.200502

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51179157, 51409214, 11574250).

[†] Corresponding author. E-mail: liyaan@nwpu.edu.cn