

一种 Duffing 弱信号检测新方法及仿真研究

王永生 姜文志 赵建军 范洪达

(海军航空工程学院兵器科学与技术系, 烟台 264001)

(2007 年 4 月 12 日收到, 2007 年 8 月 28 日收到修改稿)

研究了利用混沌相变进行弱信号检测的理论及仿真试验. 对基于 Duffing 振子初值敏感性检测弱信号的方法分析后指出, 过渡过程会影响检测性能. 提出一种改进的弱信号检测方法. 对仿真输入噪声生成和仿真步长选择进行研究后建立了仿真模型. 在典型噪声背景下检测弱正弦信号. 实验结果表明: 所提出的方法有较好检测性能. 混沌临界态的 Duffing 系统对噪声敏感导致相变方法难以精确确定最小检测幅值. 指出了这类方法的局限性.

关键词: 混沌, 信号检测, 周期信号, 白噪声

PACC: 0545

1. 引言

弱信号的检测一直都是国内外学者研究的热点与难点, 尤其是对微弱正弦信号检测的研究不仅有重要的理论意义, 还在雷达、声呐、振动测量、故障诊断、通信、生物医学等领域有广泛的应用价值. 自 1992 年 Birk^[1]首次对混沌振子检测微弱信号进行尝试以来, 混沌振子检测理论得到了不断改进和发展, 利用混沌振子对未知信号参量进行估计从精度和信号识别能力上都比以往基于统计学理论所提出的频谱方法、高阶统计量等要好, 而传统处理方法检测弱信号能达到的最低检测信噪比只有 -10 dB. 所以近年来相关研究文献也越来越多, 很多研究结果都认为混沌检测方法具有极低的检测信噪比. 文献 [2—4] 认为, 这是时域内进行弱信号检测的新理论. 目前使用的这种方法是基于所谓混沌系统对任何零均值噪声均具有极强“免疫力”的理论分析结果, 是利用混沌动力学行为的相变进行微弱信号检测的方法^[5—8]. 已有的文献均缺少详细的仿真试验方法, 很多的研究结果难以重现. 就 Duffing 振子混沌检测系统, 本文在分析当前方法存在的问题基础之上, 提出了一种改进的弱信号检测方法, 并结合实验结果深入分析噪声对混沌系统的影响. 研究表明, 所提出的检测方法能够获得更低的检测信噪比. 同时, 本文的仿真试验方法可为研究噪声输入问题提供参考.

2. Duffing 振子弱信号检测理论

2.1. 基于初值敏感性的弱信号检测

噪声背景中的微弱周期信号会使系统状态由混沌态向大尺度周期 1 外轨转换发生相变, 这是当前混沌检测的主要依据, 也被认为是根据参数敏感性进行检测, 其原理方程就是 Holmes 型 Duffing 方程^[3]

$$\ddot{x} + k\dot{x} + (-x^3 + x^5) = r \sin(\omega t). \quad (1)$$

利用参数敏感性检测周期正弦信号采用模型为

$$\ddot{x} + k\dot{x} + (-x^3 + x^5) = r \sin(\omega t) + \{a \sin(\omega t) + n(t)\}, \quad (2)$$

式中 $n(t)$ 是白噪声, $a \sin(\omega t) + n(t)$ 为待检混合输入, $a \sin(\omega t)$ 是弱正弦信号(本文不讨论频率差和相位差). 文献 [9] 证明了 Duffing 方程对周期驱动信号 $r \sin(\omega t)$ 幅值参数敏感性与初始值敏感性之间是等价的, 可见这种检测方法实质上是以混沌对初始状态的极端敏感为理论基础进行的, 简称为方法一. 设初始值为 $[0, 0]$ 或邻近值, 在系统进入最终状态(混沌或大尺度周期态)之前都有一段过渡过程, 如图 1 所示. 虽然一定强度的背景噪声即使不会改变系统稳定周期运动状态, 但是检测背景噪声在过渡过程中会影响系统的最终运动状态, 更为重要的是过渡过程的存在将导致不能清楚地分析弱信号和噪声对系统相变的影响.

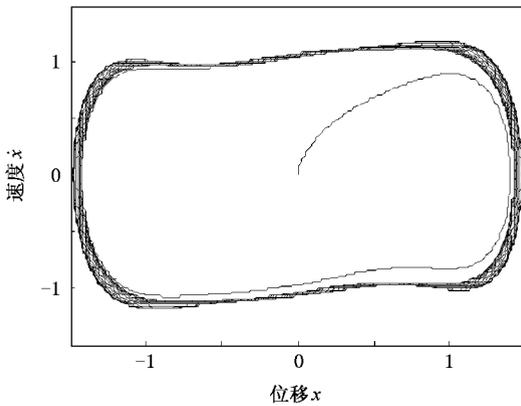


图1 初始态 $(0, 0)$ 转入周期态的过渡过程

2.2. 基于 Duffing 吸引子的弱信号检测

目前的文献大都是利用随机微分方程理论分析噪声对 Duffing 系统在周期 1 外轨上运动状态的影响,得到的结论是噪声不影响系统的周期运动轨道而只是产生扰动^[10],缺少当 Duffing 系统处于混沌态(尤其是混沌临界态)时噪声对运动状态影响的分析.本文提出一种新的 Duffing 弱信号检测方法.该方法通过直接调整 Duffing 方程处于混沌态来检测弱信号,目的是消除过渡过程的影响,提高检测性能.称之为基于 Duffing 吸引子检测的方法,简称方法二.方法二采用如下方程:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + k\dot{x} + (-x^3 + x^5) \\ = r_1 \sin(\omega t) + \{r_2 \sin(\omega t) \\ + [a \sin(\omega t) + n(t)]\}U(t - t_0), \quad (3) \end{aligned}$$

式中 $r_1 \sin(\omega t)$ 是基准周期驱动, $U(t - t_0)$ 是阶跃信号, $a \sin(\omega t) + n(t)$ 是待检混合输入信号, $r_2 \sin(\omega t)$ 与基准信号同频,用于检测弱信号.

下面给出具体的弱信号检测步骤.

1) 调节参数 r_1 确定系统混沌临界值.通过调节参数 r_1 使得系统进入混沌临界态,即系统刚好进入混沌态,如果稍微增大 r_1 值则系统进入大尺度周期态.

2) 选择使系统经历过渡过程稳定后的时间参数 t_0 .实验表明,系统过渡过程约为 220—230 s, 300 s 以后已处于稳定状态.如果系统过渡过程结束处于大尺度周期态,稳定后调整驱动 r_2 使得系统恢复混沌态,发现无论何时调整 r_2 使系统由大尺度周期态向混沌态跃迁的周期驱动阈值不改变,只是系统转

入混沌态的时间上有差别,所以选择 t_0 使得系统经过过渡过程后处于稳定运动.建议选择 t_0 为过渡过程的两倍以上时间.

3) 调节参数 r_2 再次确定系统的混沌临界值.确定 t_0 后调整 r_2 使经历过渡过程稳定后的系统再次处于混沌临界态.

4) 引入待检混合信号,判断弱正弦信号的存在.调整参数 r_1 和 r_2 完毕后重新在 t_0 时加入待检混合信号 $a \sin(\omega t) + n(t)$.如果待检信号中含有一定幅值的弱正弦信号,则会使得系统由临界的混沌态转为大尺度周期态,并进入下一步骤.

5) 通过调节 r_2 检测弱信号幅值.一旦确定含有弱正弦信号再逐渐减小 r_2 进行试验,当系统再次恢复到混沌态时,根据 r_2 的减小量可以估计被检弱正弦信号的幅值 a .

3. 弱信号检测仿真基础

3.1. 产生仿真输入噪声

方程(2)和(3)中的系统是输入噪声驱动的非线性连续系统,为了通过仿真研究混沌弱信号检测和噪声对混沌系统运动的影响,须考虑满足仿真要求的噪声输入.对时刻变化的输入白噪声进行积分是没有意义的,因为不满足积分条件,而求方程(2)和(3)的数值解时避不开积分环节.因此,在仿真计算时不能直接对驱动输入连续白噪声信号进行采样计算^[11].对于随机输入的连续系统,为了使仿真结果满足统计特性,通常采用定步长计算,研究定步长计算条件下的仿真噪声生成问题.

图2是仿真过程的示意图.假设要输入系统的连续白噪声信号 $\chi(t)$ 可以通过一个随机序列 $\hat{\gamma}_i$ 来近似,并满足

$$\hat{\gamma}_i = K_\sigma \hat{e}_i \quad (i = 1, 2, \dots), \quad (4)$$

式中 $\hat{\gamma}_i$ 是用于仿真的信号, \hat{e}_i 是服从 $N(0, 1)$ 的伪随机序列,常数 K_σ 可以看作白噪声信号的比例系数.如果要把 $\hat{\gamma}_i$ 作为仿真时的输入数据,就必须使其在每个计算步长内保持不变,所以信号可以表示为

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}(t) = \hat{\gamma}_i = K_\sigma \hat{e}_i \\ (i\Delta t \leq t \leq (i+1)\Delta t). \quad (5) \end{aligned}$$

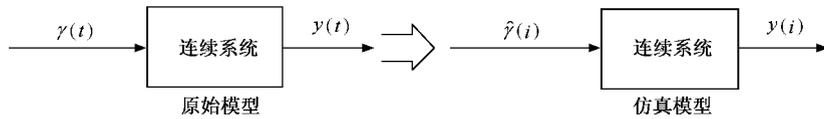


图2 仿真结构

由随机过程理论可知, $\tilde{\gamma}(t)$ 的相关函数为

$$\begin{aligned} R_{\tilde{\gamma}}(\tau) &= E[\tilde{\gamma}(t)\tilde{\gamma}(t+\tau)] \\ &= K_{\sigma}^2 E[\tilde{e}_i^2] \\ &= K_{\sigma}^2 \left(1 - \frac{|\tau|}{\Delta t}\right) \quad (|\tau| \leq \Delta t) \quad (6) \end{aligned}$$

式中 Δt 为采样周期. 由于 Δt 很小, 所以 $\tilde{\gamma}(t)$ 可以等效为图 3 中的三角形面积的严格白噪声^[10,11], 亦即

$$\begin{aligned} R_{\tilde{\gamma}}(\tau) &= \frac{1}{2} \times 2\Delta t \times K_{\sigma}^2 \delta(\tau) \\ &= K_{\sigma}^2 \Delta t \delta(\tau). \quad (7) \end{aligned}$$

连续白噪声 $\gamma(t)$ 的功率谱密度为常数 σ^2 , 方差为 σ^2 , 相关函数为

$$R_{\gamma}(\tau) = \sigma^2 \delta(\tau).$$

为了保证仿真用的伪随机信号 $\tilde{\gamma}(t)$ 和 $\gamma(t)$ 有相同的强度, 因此要求 $K_{\sigma}^2 \Delta t = \sigma^2$, 进一步得到

$$K_{\sigma} = \sigma \sqrt{\frac{1}{\Delta t}}. \quad (8)$$

仿真信号 $\tilde{\gamma}(t)$ 必须在每个计算步长内保持不变, 如果在一个步长时间内 $\tilde{\gamma}(t)$ 改变, 则比例系数 K_{σ} 就不再适用. 无论是编程计算, 还是采用其他工具, 输入的驱动噪声必须按照 (8) 式产生.

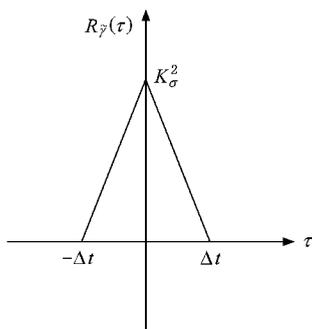


图3 伪噪声序列的自相关函数

3.2. 选择仿真步长

(8) 式说明实际产生的用于连续系统仿真的随

机信号与计算步长密切相关, 为了提高计算机仿真结果的精确性, 须选择合适计算步长. 从以上的推导可知, 仿真用随机信号的相关时间就是选择的计算步长. Matlab/Simulink 帮助中提示, 可以使用具有比系统最小时间常数更小的相关时间的随机序列模拟连续白噪声的效果, 进行较为精确的仿真. 通过指定相关时间为

$$\Delta t \approx \frac{1}{100} \frac{2\pi}{f_{\max}}, \quad (9)$$

式中 f_{\max} 是系统的带宽, 单位是 rad/s. 利用非线性动力学知识容易分析 Duffing 方程的系统带宽. 先求 Duffing 方程本身固有的振动频率. 由于用于混沌检测的 Duffing 方程是一个非线性方程, 而非线性方程一般不存在解析解, 故可通过求驱动输入为零时的数值解估计固有振动频率.

$$\ddot{x} + kx + (-x^3 + x^5) = 0,$$

$$(\dot{x}(t), x(t))|_{t=0} = (0, 2). \quad (10)$$

考虑到是利用 Duffing 系统由混沌态向大尺度周期 1 外轨转变检测弱信号, 令阻尼系数 $k = 0.5$, 求出方程 (10) 的数值解分析得到系统的固有振动周期 $T \approx 4.5$ s.

Duffing 方程 (1) 在 $k = 0.5, \omega = 1$, 初始值 $[\dot{x}(0), x(0)] = [0, 0]$ 条件下, 随 $r (0 < r \leq 1.0)$ 由小增大, 系统历经了围绕焦点的周期衰减、同宿轨道、周期分叉、混沌轨迹、大尺度周期 1 外轨. 当系统处于同宿轨道运动时周期为最小, 最小同宿轨道周期 $T_0 = 2\pi\omega$. 随着驱动 r 继续增大, 振荡周期依次成倍变大, $T_r = 2^n T_0, n = 2, 3, \dots$, 到 r 超过某一临界值后开始进入混沌态^[12]. 综合分析估计最大的系统带宽

范围 $\Delta f = 2 \frac{1}{T}$. 将上述结果代入 (9) 式, 计算得到仿真步长为 0.0225 s. 考虑到混沌系统对初值极端敏感的特点, 建议采用更小步长 $\Delta t = 0.01$ s. 同时, 四阶定步长 Runge-Kutta 法的截断误差为 $O(\Delta t^5)$, 即 10^{-10} , 保证了较高计算精度.

3.3. 弱信号检测模型

综合以上分析,构造依据方程(3)的弱信号检测 Simulink 模型,如图 4 所示.图 4 模型中每个模块的

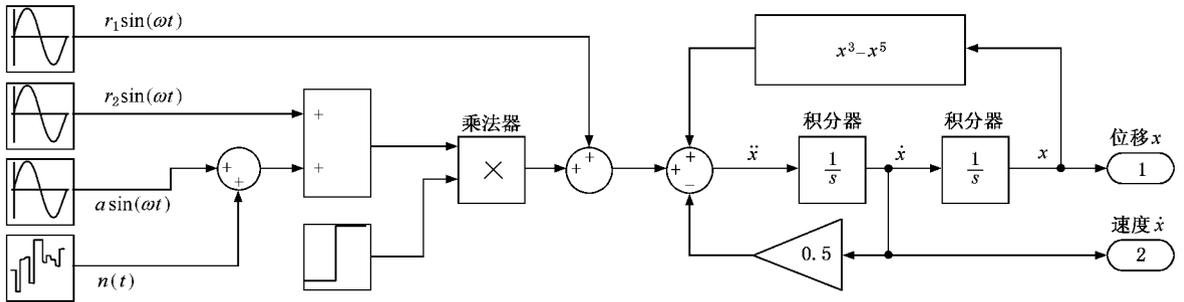


图 4 基于方法二的检测模型

应当注意的是,模型中带限白噪声(band-limited white noise)模块正是依据(8)式实现的,噪声功率参数值就等于连续白噪声的功率谱(或称连续白噪声方差) σ^2 ,输出数据不是带限噪声,而是满足(4)式的仿真用信号.进行弱信号检测试验时还必须把带限白噪声模块的种子数设为随机值,使得每次仿真产生的驱动噪声不重复,如可以设为“randseed”,得到一个在 $[31 \cdot 2^{17} - 1]$ 之间的随机种子数;如果不改变随机种子数则每次产生的噪声是相同的,这个噪声序列是确定的,那么在弱信号检测时就会得到极低的检测信噪比.因为显示二维数据相平面的“XY Graph”模块要绘制每个计算结果而导致占用大量机器内存和极大地延缓计算速度,故我们不使用该模块而利用仿真结束后保存在工作空间中的数据重构相图分析系统运动状态.

4. Duffing 相变检测弱信号的性能分析

4.1. 基于初值敏感性检测的性能

为了便于分析方程(2)构成的弱信号检测系统的性能,实际仿真中把驱动输入正弦信号和待检弱正弦信号看作合成后的驱动信号.在不引入噪声情况下,当 $r = 0.7256161183$ 时系统处于混沌态,当 $r = 0.7256161184$ 时系统处于大尺度周期态运动.仿真中观察到系统从起始点到运动状态出现明显分叉(转入混沌态或大尺度周期态)的时间(即过渡过程)约为 220 s,300 s 时系统已经处于稳定的状态,所以设定每次仿真时间为 1500 s.表 1 列出了不同典型

设置须满足连续系统仿真要求.类似地,不难构造方程(2)的仿真模型.参数选取均为 $k = 0.5, \omega = 1$,步长 $\Delta t = 0.01$ s,初始值 $[x(0), \dot{x}(0)] = [0, 0]$,采用四阶定步长 Runge-Kutta 算法.

背景噪声下不同驱动幅值 r 时系统的运动状态,其中理论输入噪声方差是指连续白噪声方差 σ^2 ,实际输入信号方差是指输入仿真系统的随机信号(即带限噪声模块的输出数据)的方差 $K_{\sigma}^2 = \sigma^2 / \Delta t$.

表 1 不同驱动幅值 r 时系统的最终状态

| 理论输入噪声方差 | 实际输入信号方差 | 周期驱动幅值 r | 系统状态 |
|------------|----------|------------|-------|
| 0.00001 | 0.001 | 0.725 | 不确定 |
| | | 0.724 | 基本混沌态 |
| | | 0.723 | 混沌态 |
| | | 0.726 | 基本周期态 |
| | | 0.727 | 基本周期态 |
| | | 0.728 | 周期态 |
| 0.000001 | 0.0001 | 0.7256 | 不确定 |
| | | 0.7255 | 基本混沌态 |
| | | 0.7251 | 混沌态 |
| | | 0.7257 | 不确定 |
| | | 0.7259 | 基本周期态 |
| | | 0.7260 | 周期态 |
| 0.00000001 | 0.000001 | 0.725580 | 基本混沌态 |
| | | 0.725579 | 基本混沌态 |
| | | 0.725575 | 混沌态 |
| | | 0.725659 | 基本周期态 |
| | | 0.725665 | 基本周期态 |
| | | 0.725670 | 周期态 |

注:表中每一项都是多次仿真后的统计结果.“不确定”指系统最终状态是混沌态或是周期态;“基本混沌态”指系统最终状态基本上是混沌态,很少出现大尺度周期态.在随机 100 次仿真试验结果中系统状态呈现混沌态的概率大于 95%;“基本周期态”指系统最终状态基本上是周期态,很少出现混沌态.

在典型白噪声背景下,通过比较使系统处于混沌态和大尺度周期态的驱动幅值,可以估算能够检测出的最小信号幅值.很大的驱动幅值范围内出现

最终系统状态不确定的现象,使得这种检测方法能够检测弱信号信噪比并不高,不是很理想.值得指出的是,在仿真中发现一旦过渡过程结束,系统的运动状态就确定了.这说明至少在表 1 中给定的驱动幅值精度条件下再延长仿真时间,系统都保持过渡过程结束时的混沌或大尺度周期运动状态.

4.2. 基于 Duffing 吸引子检测弱信号的性能

4.2.1. 前期分析

我们在同样仿真条件下分析改进方法的性能.方程(3)的系统在只有基准驱动的情况下,也是当 $r_1 = 0.7256161183$ 时处于混沌临界态.首先使系统进入混沌态后 300 s 时加入 r_2 (此时不加入待检混合信号),调整 r_2 观测系统状态,发现 $r_2 = 0.0076903$ 时系统仍处于混沌态, $r_2 = 0.0076904$ 时系统转变为大尺度周期态(10300 s 左右稳定).若是在 500 s 加入 r_2 ,发现 $r_2 = 0.007584898$ 时系统仍处于混沌态, $r_2 = 0.007584899$ 时系统转变为大尺度周期态(37990 s 左右稳定).应当注意以下两点:(1)在 300 和 500 s 调整时 r_2 值不同,验证了混沌轨道不重复.(2) $r_1 + r_2$ 不再是方程(2)中的阈值,说明 Duffing 系统的非线性特点,也可以认为是混沌吸引子特性导致的结果,这是提出本文方法的一个原因所在.具体试验方法如下:考虑到过渡过程通常超过 200 s 结束,选择在由初值 $(0, 0)$ 开始进入混沌态后 500 s 时再引入待检混合信号,即选择 $t_0 = 500$ s,重点考察几种典型强度背景噪声下的检测性能.为了研究方便,也将 r_2 和待检弱正弦信号看作一个合成信号,通过调整 r_2 观察相变情况以考察能被检测的弱正弦信号幅值.

4.2.2. 噪声影响分析

实验中发现:有些周期驱动 r_2 使系统状态在 1000—2000 s 内改变为大尺度周期态,而有的需要很长时间才使得系统状态改变为大尺度周期态,引起相变需要的时间非常不规则,这种情况多发生在同样强度的噪声(噪声方差相同)背景下周期驱动 r_2 较小时.例如在理论噪声方差为 0.00000001、驱动 $r_2 = 0.00744$ 、随机种子数为 46747 时,系统状态向大尺度周期态转变发生在 143050 s 左右.图 5 和图 6 分别是状态转变时刻的时序图和相平面图.由于不引入噪声时 $r_2 = 0.007584898$ 系统仍处于混沌态,显然这种情况不能再认为仅仅是由弱周期信号导致

的,而应该是弱正弦信号和噪声共同作用的结果.正弦信号的作用使得 Duffing 系统在混沌且极其临近大尺度周期态轨道运动,而噪声的影响引起系统运动发生突变分叉的现象.这是一种很奇特的现象,表明噪声对系统混沌运动状态的影响非常微妙.正是这种原因决定了所有基于相变进行弱信号检测的信噪比有一定范围的限制,目前还缺少这方面的深入研究.这正是通过相变精确检测弱信号幅值所难以克服的困难.

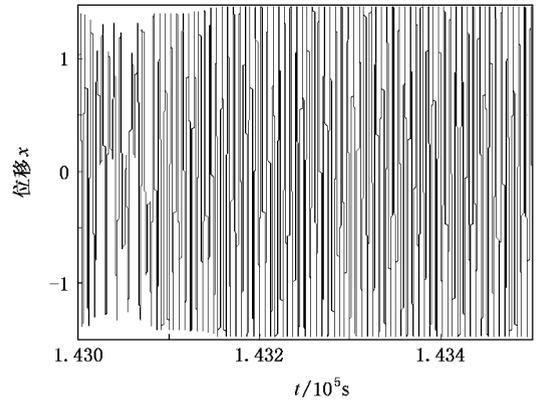


图 5 位移量的时序图

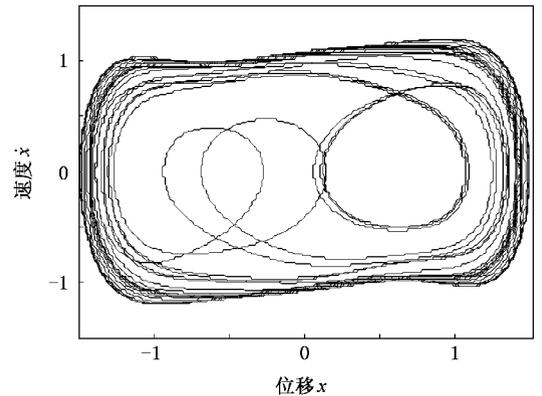


图 6 运动状态相平面图

4.2.3. 试验结果分析

虽然上述每次试验发生相变的时间差别很大,但只要足够长的仿真时间,在同一噪声强度下周驱动 r_2 相同通常都能观察到同样的仿真结果.在试验中设定仿真时间为 150000 s,对每个驱动 r_2 仿真 30 次(Matlab 每次仿真用时约为 1900 s),若出现大尺度周期态,认为在该驱动作用下能够使系统最终进入大尺度周期态.表 2 所列为不同典型背景噪声条件下不同驱动 r_2 值时系统的运动状态.

表 2 不同驱动幅值 r_2 时系统的最终状态

| 理论输入 噪声方差 | 实际输入 信号方差 | 周期驱动 幅值 r_2 | 系统状态 |
|--------------|--------------|------------------|------|
| 0.00001 | 0.001 | 0.00758 | 周期态 |
| | | 0.004 | 周期态 |
| | | 0.003 | 周期态 |
| | | 0.002 | 周期态 |
| | | 0.001 | 混沌态 |
| 0.000001 | 0.0001 | 0.00758 | 周期态 |
| | | 0.0068 | 周期态 |
| | | 0.0063 | 周期态 |
| | | 0.0060 | 周期态 |
| | | 0.0059 | 混沌态 |
| 0.00000001 | 0.000001 | 0.00758 | 周期态 |
| | | 0.00749 | 周期态 |
| | | 0.00743 | 周期态 |
| | | 0.00742 | 周期态 |
| | | 0.00741 | 混沌态 |

比较表 2 与表 1 可知,方法二能检测出的周期信号的幅值精度提高了约一个数量级.根据信噪比公式

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{A^2}{2\sigma^2},$$

表 1 和表 2 中给出的检测信噪比如表 3 所列.尽管表 1 和表 2 中的检测幅值精度可通过更多的试验得到进一步的提高,但从表 3 已可估计比较两种方法

的检测性能.

表 3 两种方法检测性能比较

| 理论输入 噪声方差 | 实际输入 信号方差 | 最小检测幅值 | | R_{SN}/dB | |
|--------------|--------------|---------|---------|-------------|----------|
| | | 方法一 | 方法二 | 方法一 | 方法二 |
| 0.00001 | 0.001 | 0.005 | 0.001 | 0.9691 | -13.0103 |
| 0.000001 | 0.0001 | 0.0009 | 0.0001 | -3.9254 | -23.0103 |
| 0.00000001 | 0.000001 | 0.00009 | 0.00001 | -3.9254 | -23.0103 |

5. 结 论

1) 过渡过程的存在影响基于初值敏感性进行弱信号检测的性能.提出了一种改进的弱信号检测方法.研究了混沌弱信号检测的试验仿真问题,推导出替代连续白噪声的输入信号模型,给出适合的仿真计算步长.

2) 研究了两种检测方法在典型背景噪声下弱信号检测的性能.实验结果表明,本文方法检测性能较好.深入分析了噪声对系统混沌态的影响,得出混沌运动并非对噪声都是免疫的,随机噪声对相变的影响是限制混沌弱信号检测性能的主要原因,新的检测方法必须能够避免通过穿越混沌临界态的相变检测弱信号幅值.

[1] Birx D L 1992 *IEEE Internation Joint Conference on Neural Networks* (Vol.2)(New York : IEEE Press) pp881—888

[2] Zhang J , Wang Z P , Lü N , Yu X Y , Chen D Y 2005 *Chin . J . Electron . Dev .* **28** 307 (in Chinese) [张 健、王竹萍、吕 宁、于晓洋、陈德运 2005 电子器件 **28** 307]

[3] Li Y , Yang B J , Lin H B , Liu X H 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 1994 (in Chinese) [李 月、杨宝俊、林红波、刘晓华 2005 物理学报 **54** 1994]

[4] Li Y , Lu P , Yang B J , Zhao X P 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 1672 (in Chinese) [李 月、陆 鹏、杨宝俊、赵雪平 2006 物理学报 **55** 1672]

[5] Yi W S , Shi Y W , Nie C Y 2006 *Acta Metrol . Sin .* **27** 156 (in Chinese) [衣文索、石要武、聂春燕 2006 计量学报 **27** 156]

[6] Li Y , Yang B J , Shi Y W , Xiang Y , Deng X Y 2003 *J . Chin . Commun .* **24** 25 (in Chinese) [李 月、杨宝俊、石要武、项 阳、邓小英 2003 通信学报 **24** 25]

[7] Wang G Y , Chen D J , Lin J Y , Chen X 1999 *IEEE Trans . Ind .*

Electron . **46** 440

[8] Li Y , Yang B J , Shi Y W 2003 *Acta Phys . Sin .* **52** 526 (in Chinese) [李 月、杨宝俊、石要武 2003 物理学报 **52** 526]

[9] Jiang W L , Zhang S Q , Wang Y Q 2005 *Chaos and Wavelet Based Fault Information Diagnosis* (Beijing : National Defence Industry Press) pp84—85 (in Chinese) [姜万录、张淑清、王益群 2005 基于混沌和小波的故障信息诊断(北京:国防工业出版社)第 84—85 页]

[10] Wang G Y , Chen D J , Lin J Y , Chen X 1998 *Acta Electron . Sin .* **26** 38 (in Chinese) [王冠宇、陈大军、林建亚、陈 行 1998 电子学报 **26** 38]

[11] Xue D Y 1992 *Ph . D . Thesis* (Sussex : University of Sussex) pp35—83

[12] Liu B Z , Peng J H 2004 *Nonlinear Dynamics* (Beijing : Higher Education Press) pp99—110 , 132—135 (in Chinese) [刘秉正、彭建华 2004 非线性动力学(北京:高等教育出版社)第 99—110 , 132—135 页]

A new method of weak signal detection using Duffing oscillator and its simulation research

Wang Yong-Sheng Jiang Wen-Zhi Zhao Jian-Jun Fan Hong-Da

(*Department of Armament Science and Technology ,Navy Aeronautical Engineering Institute ,Yantai 264001 ,China*)

(Received 12 April 2007 ; revised manuscript received 28 August 2007)

Abstract

The theory and simulation technique of weak signal detection using chaos state phase change is researched in this paper. The method of weak signal detection by using the Duffing oscillator's initial conditions sensitivity was firstly analyzed, the existing transition process would affect the detection capability. Then an improved method was presented. In order to compare these two methods, the input pseudo-noise expression and the calculating step selection in simulation were researched, and the simulation models were established. The new method was shown to have better capability through analyzing the signal detection experimental results under the condition of typical noise intensity background. The experiments showed that the Duffing oscillator in special critical chaos state is also sensitive to noise, which leads to the difficulty in exactly deciding the minimal detection limit by phase change, and the limitation of the phase change method was discussed.

Keywords : chaos , signal detection , periodic signal , white noise

PACC : 0545