

微弱周期脉冲信号的取样积分—混沌系统联合检测方法¹

李 月 杨宝俊* 谭 力** 卢 金 李世哲*

(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

*(吉林大学地球探测科学与技术学院 长春 130026)

** (吉林大学机械学院 长春 130025)

摘 要: 为提高混沌系统检测微弱周期脉冲信号的能力, 提出把取样积分与混沌系统相结合的检测方案。仿真结果表明在相同系统实验背景下, 相结合的检测方案优于不加取样积分的检测方法; 周期脉冲信号占比变小, 使检测到的最小脉冲幅度变大; 输入噪声强度的降低可使检测系统临界相态简化。

关键词: 取样积分, 混沌系统, 信号检测, 周期脉冲信号, 信噪比

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1653-05

The United Detecting Method of Sampling Integral and Chaotic System for the Weak Periodic Pulse Signals

Li Yue Yang Bao-jun* Tan Li** Lu Jin Li Shi-zhe*

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

*(College of Geo-exploration Sci. and Tech., Jilin University, Changchun 130026, China)

** (College of Mechanics, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract In order to improve the ability of chaotic system detecting weak periodic pulse signals, this paper proposes the detecting scheme uniting sampling integral with chaotic system. The simulation results indicate that the united detecting scheme precedes the detecting method without sampling integral under the same experimental background. Because occupied space ratio of the periodic pulse signals diminishes, the detected minimum amplitude increases. The intension decrease of input noise can simplify the critical phase state of detecting system.

Key words Sampling integral, Chaotic system, Signal detection, Periodic pulse signals, Signal to Noise Ratio(SNR)

1 引言

对于弱信号检测而言, 混沌测量系统采用的是一种信号提取技术, 而常规测量方法采用的是噪声抑制技术。混沌测量以信号提取能力见长, 常规测量则在噪声抑制方面作用显著^[1-3]。如何将二者有机地结合起来, 充分发挥这两种测量方法在信号提取和噪声抑制方面各自所具备的优势, 组成一个性能更加优良的混沌测量系统, 是混沌测量技术发展的趋势。混沌测量是一种时域测量方法; 在信号进入混沌测量系统之前, 采用常规测量方法中的行之有效的时域信号处理, 如相关检测、取样积分、预滤波^[4,5]等方法加以预处理, 对噪声进行一定的压制。本文是文献[6]工作的延续, 首先对含有强噪声的信息进行取样积分, 然后将处理后的输出信号引入混沌检测系统。理论分析及仿真实验证明两种方法结合的检测系统对噪声抑制能力强, 信噪比提高较大。

¹ 2003-02-21 收到, 2003-07-17 改回

吉林省科技发展计划资助项目(自然科学基金类)(20020626)

2 取样积分技术

对淹没于强白噪声中的周期信号所进行的等间隔取样, 应符合取样定理的要求。取样积分可由电容实现。设有效信号为 $s(t)$, 噪声信号为 $n(t)$, 取样周期为 T , 经过 N 次积累平均, 则输出为

$$u(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(t+kT) \approx s(t) \quad (1)$$

对于强噪声背景下周期脉冲信号的恢复有两个步骤, 即信号波形的周期取样及积累平均(用电容为积累元件时, 为积分过程)。经过 N 次取样值积累平均后, 信号 $u(t)$ 满足 (1) 式; 采用平均功率 (σ^2) 的均方根度量白噪声振幅大小 (η), 则近似地存在

$$\eta = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

由此可得, 经过取样积分, 对 t_0 时刻的信噪比提高程度满足取样积分器的 \sqrt{N} 法则^[1], 它表示增加积累次数 N , 可以更充分地抑制噪声, 达到提高检测微弱信号信噪比的目的。

3 混沌检测

3.1 混沌检测模型

混沌检测是目前国内外很多学者极为关注的研究领域。特定的混沌系统对周期信号的敏感性以及对噪声免疫力使它成为微弱信号检测的一个重要手段。本文以文献 [6] 的检测模型作为混沌检测系统, 建立的混沌检测系统仿真实验模型如图 1 所示。

将取样积分输出作为混沌检测系统的输入脉冲信号。在白噪声背景下, 调节放大器中的增益, 可以检测不同频率的微弱脉冲信号。通过观测相平面 X - Y 相位仪, 根据混沌检测系统相平面轨迹的相变, 检测出微弱脉冲信号的存在。

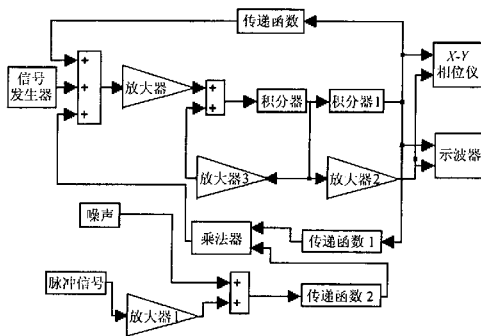


图 1 混沌检测系统仿真模型

3.2 混沌系统对噪声的抑制作用

混沌系统对噪声具有较强的抑制能力。尤其是系统进入周期态后, 噪声不但对系统状态无影响, 系统对噪声还有强烈的抑制作用。图 2 是白噪声时间序列经过 FFT 处理的结果。图 3 是将白噪声加入混沌系统中, 输出的时间序列经过 FFT 处理后得到的结果。可见白噪声的能量连续且较均匀分布在整個频域, 同时幅值范围为 0-25; 相比之下, 从混沌系统出来后的时间序列

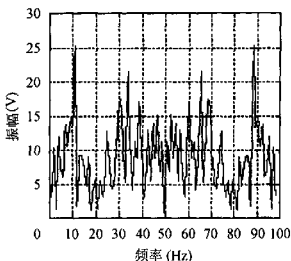


图 2 白噪声的振幅谱

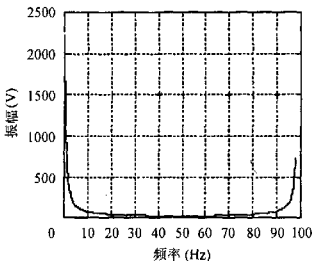


图 3 混沌系统加入白噪声振幅谱

的能量，主要集中在 (0-1) 之间很窄的频带内，而且尽管幅值分布连续，但变化十分剧烈 (0-2000)。因此，从能量分布频带的宽窄、幅值差距的大小这些方面可证明混沌系统充分抑制了宽频带的噪声。

4 基于取样积分的混沌检测分析与仿真

基于取样积分的混沌检测的思路为：首先将混有噪声的微弱脉冲信号输入到取样积分环节进行取样积分，通过前面的理论分析得知输出的信号已得到了一定的抑制。但是由于积累次数有限，待测信号中仍有部分噪声。将其作为混沌检测系统的周期小信号，引入混沌检测系统，由于混沌检测系统对周期信号的敏感性，因此混沌系统动力学行为会发生根本的变化，根据此变化可得知微弱脉冲信号的存在。基于取样积分的混沌检测基本原理框图如图 4。

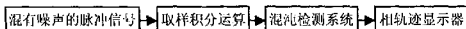


图 4 基于取样积分的混沌检测原理框图

根据上述方案进行仿真实验。令内置信号的角频率 $\omega=1\text{rad/s}$ ，待测脉冲信号 $\delta_T(t)$ 周期 0.1s, 占空比 0.1, 其波形如图 5 所示：

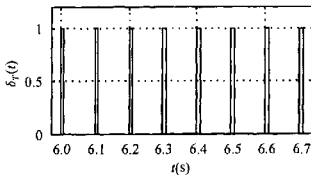


图 5 $T=0.1\text{s}$, 占空比 0.1, 脉冲信号 $\delta_T(t)$ 波形

对系统加入高斯白噪声，其噪声功率为 10^{-2}W 。将混沌检测系统内置信号的幅度置为临界值，待测脉冲信号幅度为 10^{-9}V ，系统的状态发生了改变，由临界混沌状态 (如图 6(a) 所示) 跃变为大尺度周期状态 (如图 6(b) 所示)。

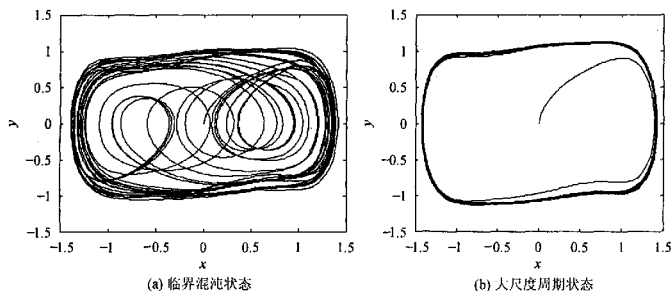


图6 混沌检测系统相变前后的相轨迹变化

信号的检测下限为: $20\lg(1 \times 10^{-9}) = -180\text{dB}$ (3)

信噪比检测下限为:

$$\text{SNR} = 10\lg \frac{\text{周期信号功率}}{\text{噪声方差}} = 10\lg \left\{ \frac{0.5 \times (1 \times 10^{-9})^2}{1 \times 10^{-2}} \right\} = -163\text{dB} \quad (4)$$

在文献[6]中,强噪声中的脉冲周期信号直接引入混沌检测系统,待测脉冲信号幅值为 10^{-7}V ,噪声功率为 10^{-6}W ,信噪比检测下限约为 -83dB 。可见,将取样积分与混沌检测相结合,对微弱脉冲信号的检测可以达到很低的检测下限及信噪比门限。

为证明将取样积分与混沌系统二者结合的检测方案(简记为S-C)具有较好的检测效果,进行了变占空比仿真实验。实验参数取噪声平均功率 10^{-4}W ,脉冲周期 0.1s 。仿真结果:临界混沌相态如图7所示,SNR随占空比变化结果见表1。分析图7和表1可得:(1)S-C检测方案中噪声平均功率取为 10^{-2}W ,占空比实验中噪声平均功率为 10^{-4}W ,比较图6(a)和图7可知,

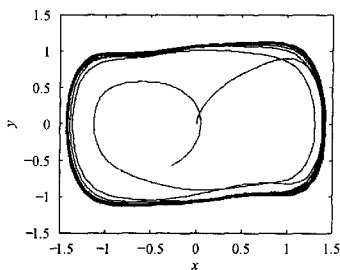


图7 不加取样积分的临界混沌相态

噪声强度的降低使临界相态变简单。(2)随着占空比的增大,SNR变好(即模值变大);这可能由于占空比越小,周期脉冲信号的复杂性相对增大(频率成份),引起检测到的最小脉冲幅度变大。(3)占空比由0.1增加6倍至0.7(占空比再增加,其SNR基本不变(表1)).并且噪声平均功率降低,仿真效果仍然达不到S-C(占空比为0.1)的SNR(即 -159.1dB 与 -163dB);说明取样积分处理在S-C方案中起一定作用。

表 1 变占空比仿真实验结果 (噪声平均功率 $10^{-4}W$, 信号周期 0.1s)

占空比	临界值 (V)	检测到的最小脉冲幅度 (V)	SNR(dB)
0.01	0.7311666447	3×10^{-8}	-113.5
0.05	0.7311666548	5×10^{-9}	-138.9
0.1	0.7311665547	4×10^{-9}	-139.1
0.2	0.7311668018	2×10^{-9}	-139.7
0.3	0.7311666553	1×10^{-9}	-140.3
0.4	0.7311665847	9×10^{-10}	-158.4
0.5	0.7311665641	7×10^{-10}	-158.6
0.6	0.7311665847	6×10^{-10}	-158.7
0.7	0.7311666554	4×10^{-10}	-159.1
0.8	0.7311668020	4×10^{-10}	-159.1
0.9	0.7311665517	4×10^{-10}	-159.1
0.99	0.7311666447	4×10^{-10}	-159.1

5 结 论

本文提出了将取样积分与混沌系统二者结合起来的一种时域信号检测方案。理论分析及仿真实验均表明该方案对噪声有较强的抑制能力且具有较低的信噪比工作门限; 同时具有时域方法简单、直观、硬件易实现等优点。预计该方法对实现高精度微弱信号检测仪器的研究有所补益。

参 考 文 献

- [1] 戴逸松. 微弱信号检测方法及仪器. 北京: 国防工业出版社, 1994: 268-275.
- [2] X. D. Zhang, Y. C. Liang. Prefilter-based ESPRIT for estimating parameters of sinusoids in non-Gaussian noise. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 45(1): 349-353.
- [3] Swami A, Mendel J M. Cumulant-based approach to the harmonic retrieval problem. In: Proc. ICASSP-88[C], New York, 1988: 2264-2267.
- [4] Ferri A, Alengrin G. Estimation of the frequencies of a complex sinusoidal noisy signal using fourth order statistics, Proc. ICASSP-91[C], Toronto, Canada, 1991: 3457-3460.
- [5] Roorda B, Heij C. Global total least squares modeling of multivariable time series. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1995, 40(1): 50-63.
- [6] Li Yue, Yang Bojun. The chaotic detection of periodic short-impulse signals under strong noise background. *Journal of Electronics (China)*, 2002, 19(4): 431-433.

李 月: 女, 1958 年生, 教授, 博士, 研究方向为微弱信号检测。
 杨宝俊: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字信号处理。
 谭 力: 女, 1963 年生, 讲师, 研究方向为机电一体化。
 李世哲: 男, 1970 年生, 硕士生, 研究方向为数字信号处理。