

微弱电磁脉冲信号低失真度实时检测的 FPGA 实现

曹保锋¹, 郑毅¹, 李鹏¹, 张雪芹¹, 李欣¹, 李小强¹, 胡森²

(1. 防化研究院, 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205; 2. 杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江杭州 310018)

摘要: 为了实时检测宽带噪声背景中的微弱电磁脉冲信号, 研究了基于强耦合 Duffing 振子的微弱脉冲信号检测算法及其 FPGA(Field Programmable Gate Array)实现技术. 利用脉冲信号在强耦合 Duffing 振子间引起的广义“阱内失同步”现象, 使用变量差分原理进行微弱脉冲信号检测与识别. 首先, 利用具有最大稳定域和最小截断误差的实时四阶 Runge-Kutta 算法求解 Duffing 微分方程; 其次, 设计了适合在 FPGA 上运行的流水线结构并进行了优化; 为了提高检测速度, 设计了数据分段并行算法; 通过增加 FIFO 存储器将阈值检测过程与波形恢复过程分离, 解决了数据分段带来的波形失真问题. 最后, 闪电电磁脉冲实时检测实验表明系统最小可探测信噪比可达 -18dB, 同时也证明了系统的有效性.

关键词: 耦合 Duffing 振子; 微弱脉冲信号; 实时检测; 现场可编程门阵列

中图分类号: O415.5; TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2019)08-1797-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.08.025

FPGA Implementation of Real-Time Detection for Weak Electromagnetic Pulse Signal with Low Distortion

CAO Bao-feng¹, ZHENG Yi¹, LI Peng¹, ZHANG Xue-qin¹, LI Xin¹, LI Xiao-qing¹, HU Miao²

(1. Research Institute of Chemical Defense, State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China;

2. School of Communication Engineering, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: In order to detect weak electromagnetic pulse signals in wideband noise at a real-time rate, the detection algorithm and FPGA implementation were researched. According to the phenomenon of general "in-well out-of-synchronization" in the strongly coupled Duffing oscillators caused by the pulse signal, the original weak pulse signal could be detected through the principle of variable difference. The Duffing differential equations were solved by a real-time algorithm named fourth-order Runge-Kutta, which has the advantage of maximum stability domain and minimum truncation error. We devised a pulse detection pipeline structure that was suitable for running on the FPGA. In order to improve the detection rate, a data parallel structure was designed to calculate 73 segments of data simultaneously. To avoid the problem of waveform distortion caused by parallel computing, we separated the threshold detection process from the waveform extraction process by adding a FIFO memory. Experimental results show that the minimum detectable signal-to-noise ratio can reach -18dB in the detection of weak lightning electromagnetic pulses.

Key words: coupled Duffing oscillators; weak pulse signal; real-time detection; FPGA(Field Programmable Gate Array)

1 引言

近年来, 利用混沌理论进行微弱信号检测的研究取得了较大进展, 尤其是检测微弱周期信号的理论和方法已较为成熟, 并出现了一些工程应用的例子^[1-3].

实际应用中还存在大量需要检测的非周期信号, 如远距离闪电电磁脉冲、电力系统局部放电、静电放电等, 已经有学者开始研究利用混沌系统进行非周期信号的检测. 例如, 吴勇峰^[4]发现脉冲信号能激励耦合 Duffing 振子运动轨迹间出现瞬态同步突变现象, 并利用该现象

研究了从噪声背景中检测微弱局部放电信号;曾喆昭^[5]使用广义时间尺度变换扩展了 Duffing 振子的频率检测范围,并仿真计算了该模型检测单次局部放电信号的情况.张悦^[6]通过改进双耦合 Duffing 振子,得到了一种适用于瞬态信号检测的自适应算法.曹保锋^[7]构建了一种新的强耦合 Duffing 振子,并分析了其检测脉冲信号时的性能.目前上述研究还处于理论探索和仿真验证阶段,未见到有利用 FPGA 进行脉冲信号实时检测的相关报导.

本文研究基于强耦合 Duffing 振子的微弱电磁脉冲信号 FPGA 实时检测技术.首先简述了强耦合 Duffing 振子工作原理,然后利用实时四阶 Runge-Kutta 算法 (Real-Time Fourth Order Runge-Kutta Algorithm, RTRK4) 求解了强耦合 Duffing 振子方程,其次设计了适合 FPGA 的流水线结构和快速并行算法,通过将阈值检测与波形恢复分离,解决了数据分段带来的波形失真问题,最后使用该装置对闪电电磁脉冲 (Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP) 进行了实时检测,验证了该方法的可行性和系统的有效性.

2 强耦合 Duffing 振子检测微弱脉冲信号原理

强耦合 Duffing 振子检测系统表达式如下^[7]

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \omega\xi\dot{x}_1 + \omega^2\xi k(x_1 - x_2) + \omega k(x_1' - x_2') - \omega^2(x_1 - x_1^3) \\ = \omega^2(F\cos(\omega t) + s(t) + n(t)) \\ \ddot{x}_2 + \omega\xi\dot{x}_2 + \omega^2\xi k(x_2 - x_1) + \omega k(x_2' - x_1') - \omega^2(x_2 - x_2^3) \\ = \omega^2F\cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中,下标 1、2 分别表示振子 1 和振子 2, $(x_1 - x_2)$ 为恢复力耦合项, $(x_1' - x_2')$ 为阻尼力耦合项, k 为耦合系数, ξ 为阻尼系数, $F\cos(\omega t)$ 为周期策动力, $s(t)$ 为待测非周期脉冲信号, $n(t)$ 为噪声, $s(t)$ 和 $n(t)$ 只输入到振子 1 中.

强耦合 Duffing 振子检测原理为广义的“阱内失同步”,即通过较大的“恢复力”和“阻尼力”的共同耦合,使脉冲对振子 1 的作用可以传递至振子 2,但两振子的“瞬时突变”方向并不相同,这样通过比较振子间相轨迹的差异,如 $(x_1' - x_2')$,即可实现脉冲信号检测.

3 强耦合 Duffing 振子的实时计算

3.1 实时 Runge-Kutta 算法

在 FPGA 中求解微分方程需要使用实时 Runge-Kutta 法,蒋珉^[8]给出了一种具有最大稳定域和最小截断误差的 RTRK4 方法:

$$v_{n+1} = v_n + h(c_1K_1 + c_2K_2 + c_3K_3 + c_4K_4 + c_5K_5) \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} K_1 = f[t_n, v_n, u(t_n)] \\ K_2 = f[t_n + \frac{1}{5}h, v_n + b_{21}hK_1, u(t_n + \frac{1}{5}h)] \\ K_3 = f[t_n + \frac{2}{5}h, v_n + b_{31}hK_1 + b_{32}hK_2, u(t_n + \frac{2}{5}h)] \\ K_4 = f[t_n + \frac{3}{5}h, v_n + b_{41}hK_1 + b_{42}hK_2 + b_{43}hK_3, u(t_n + \frac{3}{5}h)] \\ K_5 = f[t_n + \frac{4}{5}h, v_n + b_{51}hK_1 + b_{52}hK_2 \\ + b_{53}hK_3 + b_{54}hK_4, u(t_n + \frac{4}{5}h)] \end{cases}$$

其系数值列在表 1 中:

表 1 公式(2)系数值

$c_1 = -0.3896$	$c_2 = 2.0167$	$c_3 = -2.2958$	$c_4 = 1.6000$	$c_5 = 0.0687$
$b_{21} = 0.2000$	$b_{31} = 0.1166$	$b_{32} = 0.2834$	$b_{41} = -0.1064$	$b_{42} = 0.4694$
$b_{43} = 0.2370$	$b_{51} = -0.1189$	$b_{52} = 7.0763$	$b_{53} = -11.023$	$b_{54} = 4.8659$

3.2 RTRK4 解强耦合 Duffing 方程

下面利用式(2) RTRK4 算法求解强耦合 Duffing 振子方程(1),首先将式(1)用一阶微分方程组形式表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega y_1 - \omega k(x_1 - x_2) \\ \dot{y}_1 = -\omega\xi y_1 + \omega(x_1 - x_1^3) + \omega(F\cos(\omega t) + s(t) + n(t)) \\ \dot{x}_2 = \omega y_2 - \omega k(x_2 - x_1) \\ \dot{y}_2 = -\omega\xi y_2 + \omega(x_2 - x_2^3) + \omega F\cos(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

其向量形式为:

$$\mathbf{v}'(t) = f[t, \mathbf{v}(t), \mathbf{u}(t)] = \mathbf{A}_1 \mathbf{v}_1(t) + \mathbf{A}_2 \mathbf{v}_2^3(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{v}(t)$ 为系统状态向量, $\mathbf{u}(t)$ 为外部输入向量, \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 为系统矩阵, \mathbf{B} 为控制矩阵,各向量的表达式为:

$$\mathbf{v}'(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{v}_1(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{v}_2(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ 0 \\ x_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{u}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ F\cos(\omega t) + s(t) + n(t) \\ 0 \\ F\cos(\omega t) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}_1 = \omega \begin{pmatrix} -k & 1 & k & 0 \\ 1 & -\xi & 0 & 0 \\ k & 0 & -k & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -\xi \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \omega \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \omega \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

对式(4)进行离散后用式(2)求解,迭代公式为:

$$v_{n+1} = v_n + h(c_1 K_1 + c_2 K_2 + c_3 K_3 + c_4 K_4 + c_5 K_5) \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} K_1 = A_1 v_1(n) + A_2 v_2^3(n) + Bu(n) \\ K_2 = A_1 [v_1(n) + b_{21} h K_1] \\ \quad + A_2 [v_2(n) + b_{21} h K_1]^3 + Bu(n + \frac{1}{5}) \\ K_3 = A_1 [v_1(n) + b_{31} h K_1 + b_{32} h K_2] \\ \quad + A_2 [v_2(n) + b_{31} h K_1 + b_{32} h K_2]^3 + Bu(n + \frac{2}{5}) \\ K_4 = A_1 [v_1(n) + b_{41} h K_1 + b_{42} h K_2 + b_{43} h K_3] \\ \quad + A_2 [v_2(n) + b_{41} h K_1 + b_{42} h K_2 + b_{43} h K_3]^3 \\ \quad + Bu(n + \frac{3}{5}) \\ K_5 = A_1 [v_1(n) + b_{51} h K_1 + b_{52} h K_2 + b_{53} h K_3 + b_{54} h K_4] \\ \quad + A_2 [v_2(n) + b_{51} h K_1 + b_{52} h K_2 + b_{53} h K_3 + b_{54} h K_4]^3 \\ \quad + Bu(n + \frac{4}{5}) \end{cases}$$

其中 n 表示迭代步数。

4 微弱脉冲信号实时检测算法的 FPGA 实现

4.1 算法流程预处理

方程(5)求解 $K_1 \sim K_5$ 的计算过程是一样的,只是变量系数不同,因此将其标准化以降低算法复杂度,设:

$$\begin{cases} C_1 = v_1(n), D_1 = v_2^3(n) \\ C_2 = v_1(n) + b_{21} h K_1, D_2 = [v_2(n) + b_{21} h K_1]^3 \\ C_3 = v_1(n) + b_{31} h K_1 + b_{32} h K_2, \\ D_3 = [v_2(n) + b_{31} h K_1 + b_{32} h K_2]^3 \\ C_4 = v_1(n) + b_{41} h K_1 + b_{42} h K_2 + b_{43} h K_3, \\ D_4 = [v_2(n) + b_{41} h K_1 + b_{42} h K_2 + b_{43} h K_3]^3 \\ C_5 = v_1(n) + b_{51} h K_1 + b_{52} h K_2 + b_{53} h K_3 + b_{54} h K_4, \\ D_5 = [v_2(n) + b_{51} h K_1 + b_{52} h K_2 + b_{53} h K_3 + b_{54} h K_4]^3 \end{cases} \quad (6)$$

这里变量 C_i 和 D_i ($i=1 \sim 5$) 省略了表示迭代步数的 n , 设 K_i 的系数为: $a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}, a_{5j}$ ($j=1 \sim 5$), 那么 C_i 和 D_i 可表示为:

$$\begin{cases} C_i = v_1(n) + a_{1j} K_1 + a_{2j} K_2 + a_{3j} K_3 + a_{4j} K_4 + a_{5j} K_5 \\ D_i = [v_2(n) + a_{1j} K_1 + a_{2j} K_2 + a_{3j} K_3 + a_{4j} K_4 + a_{5j} K_5]^3 \end{cases} \quad (7)$$

$a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}, a_{5j}$ 不同阶段的取值列在表 2 中:

系数标准化后,使用一条流水线以不同的参数运行 5 次即可得到 1 个数据点的结果,而不需要 5 条流水线,可以节省 FPGA 系统资源,算法流程如图 1 所示:

表 2 公式(7)中系数 a_{ij} ($i, j=1 \sim 5$) 不同阶段取值

j	a_{1j}	a_{2j}	a_{3j}	a_{4j}	a_{5j}
1	$c_1 h$	$c_2 h$	$c_3 h$	$c_4 h$	$c_5 h$
2	$b_{21} h$	0	0	0	0
3	$b_{31} h$	$b_{32} h$	0	0	0
4	$b_{41} h$	$b_{42} h$	$b_{43} h$	0	0
5	$b_{51} h$	$b_{52} h$	$b_{53} h$	$b_{54} h$	0

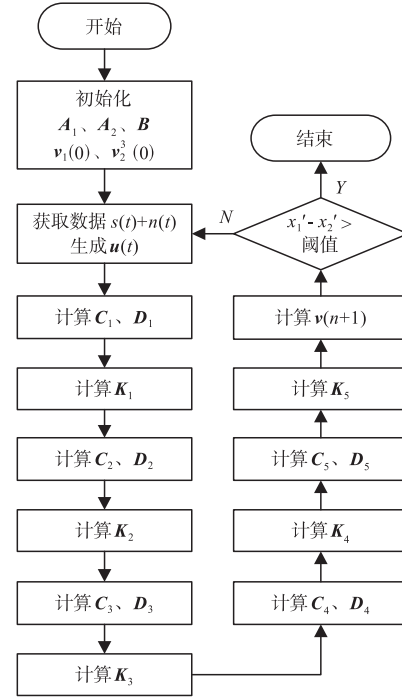


图 1 预处理后信号检测算法流程

4.2 算法流水线结构

算法流水线分为两部分:

第一部分是 K_i ($i=1, 2, \dots, 5$) 的计算,如图 2(a) 所示,最长路径上需要 1 次乘法(mult)和 3 次加法(add). 其中, $-\xi, k$ 和 ω 为常量, $F\cos(\omega t)$ 只有 1 个变量 t , 可以计算出一个 $F\cos(\omega t)$ 数组预存在 ROM 中,需要时查表. Data_in 指 AD 芯片采集的定点格式的被测数据,计算前需转换为浮点格式.

第二部分是 C_i 和 D_i ($i=1, 2, \dots, 5$) 的计算,如图 2(b) 所示,最长路径上需要 3 次乘法和 3 次加法. 输入 K_i 和输出 C_i 和 D_i 均为 4 元素向量,因此在流水线中需

要 4 个图 2(b) 中所示结构并行计算.

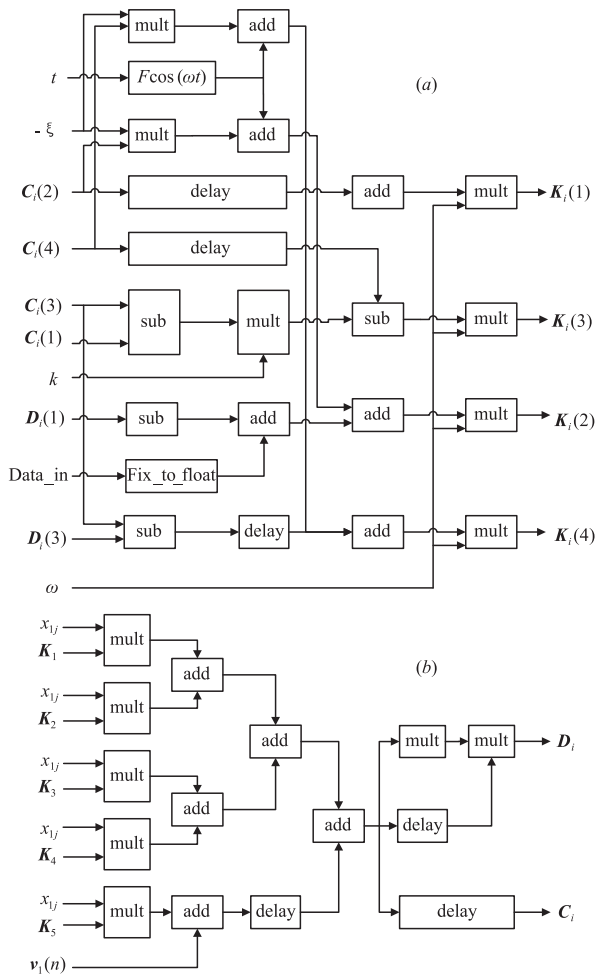


图2 流水线的两个主体结构

图 2 中两部分组成了分阶段共用流水线结构,一次流水作业计算一组 C_i 、 D_i 和 K_i , 完成 1 次 Runge-Kutta 迭代需要 5 个图示的流水线结构. 所选 FPGA 一次乘法需 24ns, 一次加法需 32ns, 则一次迭代耗时 $(24 \times 4 + 32 \times 6) \times 5 = 1440\text{ns}$, 支持的采样率约为 694KHz. 仿真分析表明采样率至少要达到 10MHz 才能满足信号检测要求, 因此必须考虑并行计算.

4.3 数据分段并行计算

数据分段并行计算理论上是可行的, 但分段将改变数据的连续性, 假设在每段设置相同的初始值, 检测效果将与算法对初始值的敏感性有关. 强耦合 Duffing 振子恢复时间 τ 与策动力周期 ω 有关, ω 是根据被测脉冲信号的半高宽 T_{FWHM} 而设定的, 一般取 $T_{FWHM} = 25/\omega$. 仿真结果表明, 恢复时间 τ 与 ω 的关系为 $\tau \approx \pi/\omega$. 可见, 恢复时间实际上远小于脉冲信号的半高宽, 因此分段计算带来的恢复时间不影响脉冲信号检测. 如图 3 所示, 脉冲信号跨越了相同初始值的三段数据, 虽然在二、三段的起始处出现较大差异, 但很快

即可达到正常值.

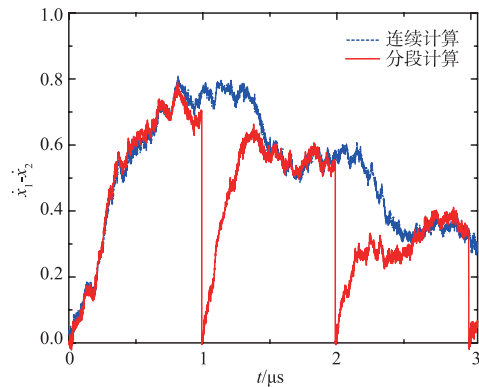


图3 分段计算与连续计算

4.4 波形恢复方法

分段计算虽然可以实现信号的检测, 但造成了波形的畸变. 为解决该问题, 在 FPGA 中设置了一个专用 FIFO 存储器, 如图 4 所示. AD 采样数据写入乒乓缓存的同时也写入 FIFO, 计算流水线解 Duffing 微分方程后若计算结果大于触发阈值则输出触发信号, 并上传 FIFO 中的原始数据, 上位机获取原始数据后再进行一次连续 Duffing 运算, 即可避免波形畸变, 而此时上位机已不受 FPGA 实时计算的影响.

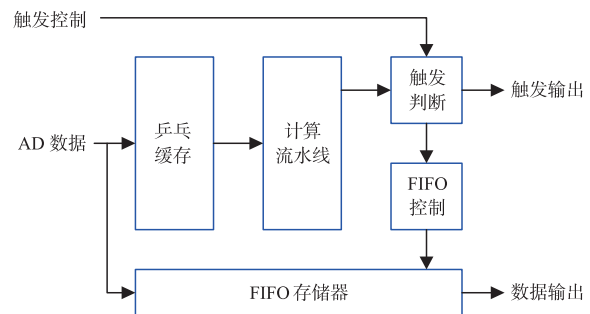


图4 波形恢复功能结构示意图

4.5 FPGA 检测系统工作流程

系统硬件实现基于使用 Xilinx Zynq-7045 FPGA 芯片的开发平台, 平台包括模拟前端模块, 250MHz 时钟芯片, 12 位 AD 芯片, 通讯接口等. 测试结果表明系统数据吞吐量可达 50MHz, 系统的参数设置、波形显示等由上位机完成, 系统工作流程如图 5 所示.

5 实验

在强耦合 Duffing 振子中, 令 $F = 0.2$, $\omega = 1 \times 10^5 \text{ rad/s}$, $k = 10$, $\xi = 0.7$, 初始值 $x_1 = x_2 = 1.2$, $y_1 = y_2 = 0$. 利用任意波形发生器 AFG3022 产生高斯白噪声 $n(t)$, 闪电信号模拟器产生 LEMP 信号 $s(t)$, 两者叠加为微弱 LEMP 信号并由辐射天线发射形成标准场, 电场波形由示波器监视, 探测天线耦合微弱 LEMP 信号能量输

入 FPGA 检测系统. 实验环境如图 6 所示.

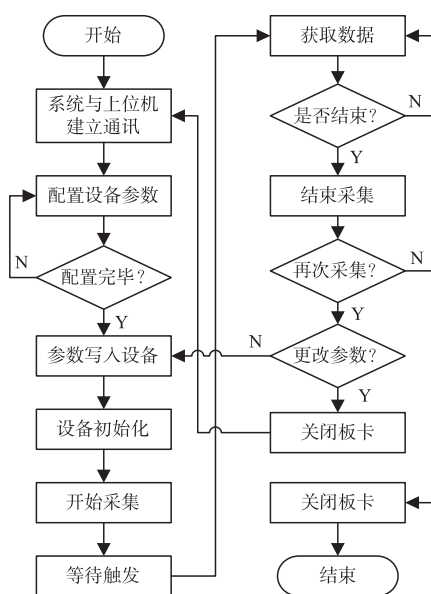


图5 FPGA实时检测系统工作流程

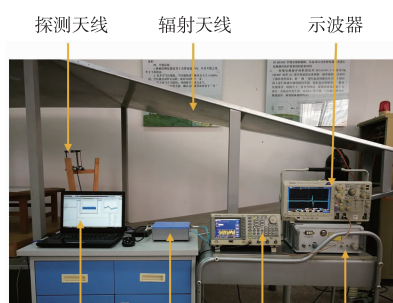


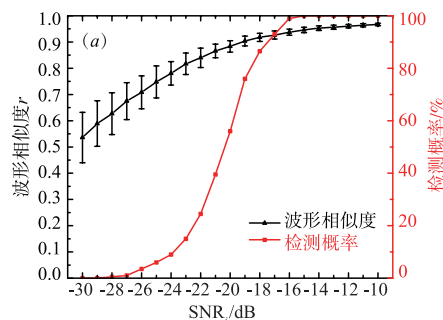
图6 LEMP实时检测实验环境

使用波形相似度与检测概率两个指标衡量系统探测性能. 波形相似度定义为:

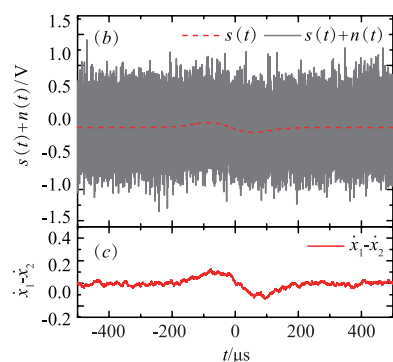
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中, x_i 为输入信号数列, y_i 为输出信号数列, \bar{x} 为 x_i 的均值, \bar{y} 为 y_i 的均值, $r=1$ 时两个波形完全相似. 检测概率 = $\frac{\text{检测成功的次数}}{\text{总次数}} \times 100\%$. 检测成功的判据为: 信号脉冲幅度大于 5 倍噪声均方差.

100 次实验的统计结果如图 7(a) 所示, $\text{SNR}_i = -18\text{dB}$ 时检测概率为 86%, 波形相似度 0.92, 单次实验结果如图 7(b)、(c) 所示, 可以看出被测信号的前沿、脉宽、幅值等均得以恢复, 因此可以认为系统最小可探测信噪比为 -18dB .



(a) 不同信噪比时检测概率和波形相似度



(b) 信噪比-18 dB时被测信号; (c) 检测结果

图7 微弱LEMP信号实时检测结果

6 结论

本文利用 RTRK4 解强耦合 Duffing 微分方程, 实现了基于 FPGA 的脉冲信号实时检测. 通过优化算法流程和使用流水线结构, 大幅提高了检测速率, 分段计算带来的不连续性可以通过波形恢复技术解决. LEMP 检测结果表明: 检测概率 86% 波形相似度 0.92 时, 最低可检测信噪比可达 -18dB .

参考文献

- [1] 赵文礼, 黄振强, 赵景晓. 基于 Duffing 振子的微弱信号检测方法及其电路的实现[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(6): 120-124, 56. ZHAO Wen-li, HUANG Zhen-qiang, ZHAO Jing-xiao. Electronic circuit realization of weak signal detection based on Duffing oscillator[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(6): 120-124, 56. (in Chinese)
- [2] 陈鹏, 芮国胜, 王林, 等. 基于 GPU 的混沌弱信号检测临界阈值确定[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(04): 1051-1054. CHENG Peng, RUI Guo-sheng, WANG Lin, et al. Determination of threshold value of chaos-based weak signal detecting based on GPU[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(04), 1051-1054. (in Chinese)
- [3] 高振斌, 田晓旭. 基于 FPGA 的微弱信号检测与实现技术[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(3): 297

- 302.
GAO Zhen-bin, TIAN Xiao-xu. Weak signal monitoring algorithm and realization technology on the FPGA [J]. Journal of Chongqing University of Post and Telecommunications (Natural Science Edition), 2016, 28(3): 297 - 302. (in Chinese)
- [4] 吴勇峰, 黄绍平, 金国彬. 基于耦合 Duffing 振子的局部放电信号检测方法研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(13): 130505.
WU Yong-feng, HUANG Shao-ping, JIN Guo-bin. Study on partial discharge signal detection by coupled Duffing oscillators [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 130505. (in Chinese)
- [5] 曾喆昭, 周勇, 胡凯. 基于扩展型 Duffing 振子的局部放电信号检测方法研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(07): 070505.
ZENG Zhe-zhao, ZHOU Yong, HU Kai. Study on partial discharge signals detection by extended Duffing oscillator [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(07): 070505. (in Chinese)
- [6] 张悦, 刘尚合, 胡小锋, 等. 微弱瞬态电磁辐射信号的双耦合 Duffing 振子自适应检测方法 [J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 2009 - 2016.
ZHANG Yue, LIU Shang-he, HU Xiao-feng, et al. Analysis of gas-liquid two-phase flow characteristics based on double coupled Duffing oscillator [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 2009 - 2016. (in Chinese)
- [7] 曹保锋, 李鹏, 李小强, 等. 基于强耦合 Duffing 振子的微弱脉冲信号检测与参数估计 [J]. 物理学报, 2019, 68(8): 080501.
Cao Bao-feng, Li Peng, Li Xiao-qiang, et al. Detection and parameter estimation of weak pulse signal based on strongly coupled Duffing oscillators [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 080501. (in Chinese)

- [8] 蒋珉, 黄振全, 王静. 具有最大稳定域的实时 RK4 公式 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 306 - 308, 312.
JIANG Min, HUANG Zhen-quan, WANG Jing. Real-time RK4 formula with maximum stability region [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(2): 306 - 308, 312. (in Chinese).

作者简介



曹保锋 男, 1979 年 6 月出生, 河南安阳人. 现为军事科学院防化研究院副研究员, 博士研究生, 从事电磁兼容研究.
E-mail: caobfemail@163.com



郑毅 (通讯作者) 男, 1961 年 11 月出生, 江苏仪征人. 现为军事科学院防化研究院研究员, 博士生导师. 从事核爆炸效应现象学与探测技术研究.
E-mail: zhengyi@sklnbcpc.cn



李鹏 (通讯作者) 男, 1979 年 8 月出生, 山东滨州人, 现为军事科学院防化研究院研究员, 从事核爆炸监测技术研究.
E-mail: lipeng@sklnbcpc.cn