

文章编号: 1005-0523(2010)02-0029-04

基于 FPGA 的混沌脉冲产生技术

王 洵, 黄克林, 江 聪

(华东交通大学 基础科学学院 江西 南昌 330013)

摘要: 混沌理论在雷达和通信领域中已成为研究热点。对基于 FPGA 的混沌脉冲产生技术, 从周期性、相关性和平衡性 3 个方面研究了这种基于有限精度硬件产生的混沌信号的随机性能与数据设置字长、信号长度等因素之间的关系。研究结果表明: 基于 FPGA 产生的混沌信号可以具有很长的周期, 同时保持了良好的随机性能。

关键词: 混沌信号; 脉冲; FPGA; Logistic 映射; Tent 映射

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

混沌理论在雷达和通信领域中已成为研究热点^[1-3]。单片机、DSP、FPGA 等数字器件的出现为混沌信号的产生提供了一种新的途径, 使用上述数字器件产生混沌信号时, 映射类型、参数或初值的改变只需通过修改代码并重新加载即可, 因而实现方法更加简便灵活, 且系统性能基本不受外界环境影响。

FPGA 可以被看作一种“软件形式的硬件”, 用户用硬件描述语言(HDL)编写的程序直接被映射成芯片内部底层基本逻辑单元连接而成的硬件逻辑和运算电路, 执行速度大大高于靠指令运行的体制。本文主要研究基于 FPGA 的混沌信号产生及混沌信号的随机性能。

1 基于 FPGA 的混沌脉冲产生

离散时间动态系统可用以下状态方程来定义

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: x_n 称作状态; f 将状态 x_n 映射到下一个状态 x_{n+1} , 以 x_0 为初值迭代得到序列 $\{x_k \mid k = 0, 1, 2, \dots\}$ 称为该离散时间动态系统的一条轨迹。

本文在设计基于 FPGA 的混沌信号产生模块时, 选取了应用较广泛的 Logistic 映射和 Tent 映射。

Logistic 映射关系表达式为

$$f(x) = \mu x(1-x) \quad x \in (0, 1) \quad \mu \in (\mu_\infty, 4] \quad \mu_\infty \approx 3.571\,448\cdots \quad (2)$$

将式(2)与式(1)联立, 得到使用 Logistic 映射生成混沌序列的迭代公式为

$$x_{n+1} = \mu x_n(1-x_n) \quad x_n \in (0, 1) \quad \mu \in (\mu_\infty, 4] \quad \mu_\infty \approx 3.571\,448\cdots \quad (3)$$

式中: 参数 $\mu_\infty \leq \mu \leq 4$ 时映射处于混沌区域。

Tent 映射关系表达式为

$$f(x) = \beta - 1 - \beta|x| \quad 1 < \beta < 2 \quad x \in (-1, \beta-1) \quad (4)$$

将式(4)与式(1)联立, 得到使用 Tent 映射生成混沌序列的迭代公式为

$$x_{n+1} = \beta - 1 - \beta|x_n| \quad 1 < \beta < 2 \quad x_n \in (-1, \beta-1) \quad (5)$$

混沌映射迭代方程中参与运算的都是浮点数, 而 Verilog HDL 语言只支持整型数变量。为了解决这个问题, 本文使用了用定点整型数表示浮点数的方法。

将本文开发的混沌脉冲产生模块下载到 FPGA 芯片中, 得到的混沌脉冲波形如图 1 所示。输出的混沌脉冲的码元宽度为 20 ns, 脉冲的高电平为 3 V 左右。实验结果验证了本文设计的基于 FPGA 的混沌脉冲产生模块的正确性。

收稿日期: 2009-11-30

作者简介: 王 洵(1963-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为测试技术。

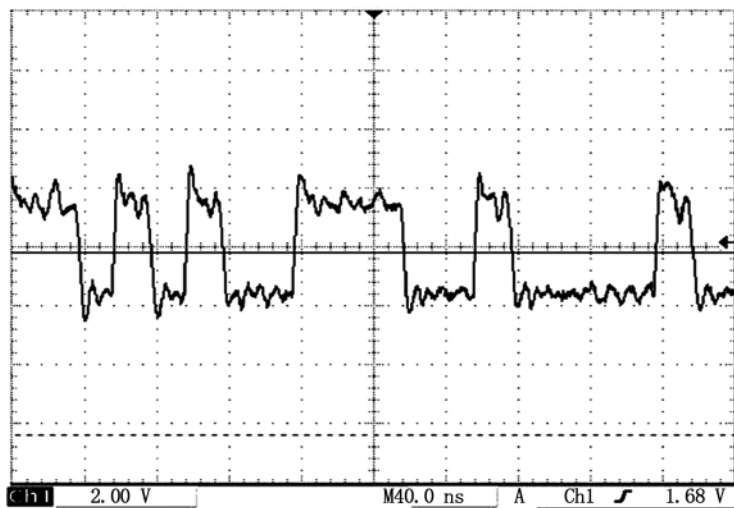


图1 FPGA 输出的混沌脉冲波形

2 基于 FPGA 生成的混沌序列随机性分析

2.1 周期性分析

理想情况下的混沌信号是没有周期的。基于 FPGA 生成混沌序列时,由于采用的数据字长总是有限的,因而周期长度是有限的^[4]。

取 Logistic 映射参数 $\mu = 4$, Tent 映射参数 $\beta = 1.99$ 。两种映射生成的混沌序列周期长度对比如表 1 所示。

表 1 Logistic 映射和 Tent 映射生成的混沌序列周期长度对比

数据字长/位	Logistic 序列 周期长度	Tent 序列 周期长度	数据字长/位	Logistic 序列 周期长度	Tent 序列 周期长度
12	10	100	24	974	553 594
16	87	1 254	28	4 359	> 2 000 000
20	168	19 829			

从表 1 可以看出,序列的周期长度是有限的,但在数据字长设置为 28 位时,Tent 序列的周期长度就达到 200 万以上的量级。由图 [1] 还可以看出,周期长度与使用的混沌映射类型和设置的数据字长有关。在相同字长条件下,Tent 序列周期长度要远大于 Logistic 序列的周期长度。对同一类型序列,随着数据字长的增加,周期长度明显增加。

2.2 相关性分析

理想情况下 Logistic 映射混沌序列具有点函数型的非周期自相关函数,互相关函数为零^[5-6]。

基于 FPGA 生成的 Logistic 映射混沌序列的自相关函数和互相关函数如图 2 和图 3 所示。

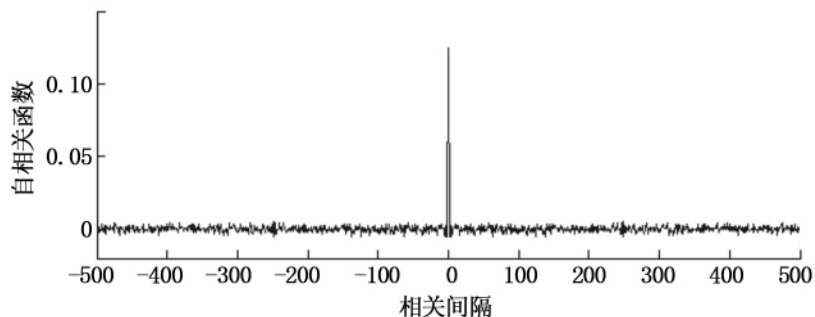


图2 Logistic 映射混沌序列自相关函数

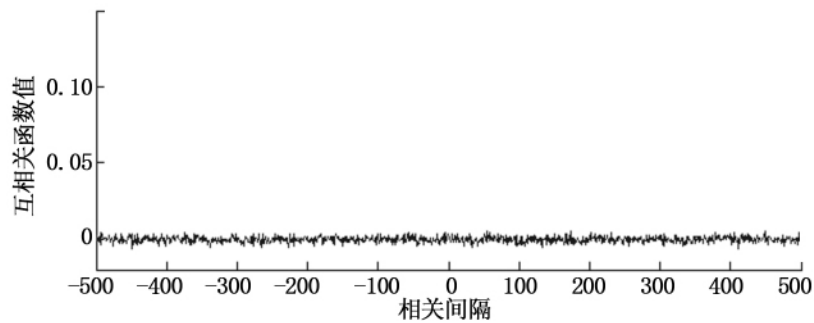


图3 Logistic映射混沌序列互相关函数

由图2和图3可以看出,序列的自相关函数在间隔为0处的函数值近似为0.125,在间隔不为0处的函数值近似为0;互相关函数处近似为0。此结果和理论值符合得较好,说明基于FPGA产生的混沌序列保持了良好的相关性以及对初值的敏感性。

本文用归一化自相关函数的旁瓣值对0的标准差 σ_{ac} 来衡量序列的自相关性,用互相关函数值对0的标准差 σ_{cc} 来衡量序列的互相关性。 σ_{ac} 和 σ_{cc} 的值越小,表明序列的相关性越好。

以Tent映射混沌序列为例考察数据字长设置不同对混沌序列相关性的影响,计算的序列在不同字长设置下的相关性如表2所示。

以Logistic映射混沌序列为例考察序列长度不同对混沌序列相关性的影响,序列的相关性和序列长度的关系曲线如图4所示。

字长/位	σ_{ac}	σ_{cc}
12	0.162 2	0.154 7
16	0.119 5	0.118 0
20	0.110 4	0.100 5
24	0.107 5	0.098 5
28	0.100 3	0.092 4
32	0.098 4	0.090 1

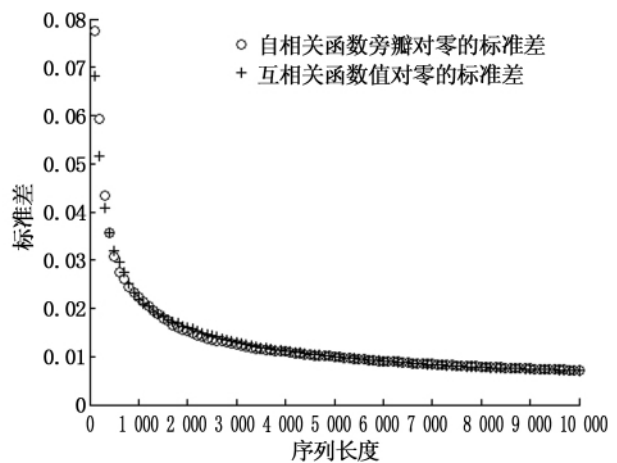


图4 混沌序列相关性和序列长度之间的关系

由图4可以看出,序列长度对 σ_{ac} 和 σ_{cc} 的影响是一致的,当序列长度较短时,相关性随着序列长度的增加明显改善,当序列长度增加到2 000左右以后,这种改善效果变得不再明显。

2.3 平衡性分析

混沌序列的平衡性可以用二值序列中的某一个值的个数占序列长度的百分比来定量表示混沌序列的平衡性^[7-8],其理想值为50%。

表3为Logistic映射序列($\mu=4$)和Tent映射序列($\beta=1.99$)在不同字长条件下一个周期长度上的平衡性。

从表3可以看出,序列具有较好的平衡性,且平衡性随着字长的增加逐渐变好;在字长相同的情况下,Tent映射的平衡性要好于Logistic映射。

表 3 字长和平衡性的关系

字长/位	Logistic 映射		Tent 映射	
	周期长度	平衡性/%	周期长度	平衡性/%
16	/	/	1 254	52.632
20	/	/	19 829	49.972
24	974	51.437	553 594	49.997
28	4 359	51.159	/	/
32	8 437	50.101	/	/

3 结论

由以上对基于 FPGA 产生的混沌序列的周期性、相关性和平衡性的分析可以看出:在足够的数据字长设置下,序列能够达到百万量级的周期长度,而且保持了良好的相关性和平衡性,可以较好地逼近客观混沌。这说明,基于 FPGA 生成混沌信号的方法是可行的。

参考文献:

- [1] GHOBAD HEIDARI BATENI. A chaotic direct - sequence spread - spectrum communication system [J]. IEEE Transaction on Communication, 1994, 42: 1 524 - 1 527.
- [2] MAZZINI G, SETTI G, ROVATTI R. Chaotic complex spreading sequence for asynchronous DS - CDMA part 1: system modeling and results [J]. IEEE Transactions on CAS, 1997, 44(10): 937 - 947.
- [3] SCHUSTER H G. Deterministic Chaos: An Introduction [M]. 2nd. Berlin: Federal Republic of Germany, 1988: 131 - 135.
- [4] LING CONG, WU XIAOFU. A general efficient method for chaotic signal estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(5): 1 424 - 1 427.
- [5] LI YUN, ZHANG SHENGBING. Design and implementation of video signal generator based on FPGA [J]. Computer Measurement & Control, 2007, 15(8): 1 057 - 1 059.
- [6] MI GUOMEI. Designing and realization of any waveform generator based on FPGA [J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(5): 689 - 691.
- [7] HUANG CANJIE, MAO KAI. Design of PXI data acquisition system based on FPGA [J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(1): 123 - 125.
- [8] XIE WEIDA, LIU YIJING. Logic analyzer design based on FPGA [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(5): 506 - 507.

Technology of the Chaotic Pulse Generation Based on FPGA

Wang Xun, Huang Kelin, Jiang Cong

(School of Basic Sciences, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Chaotic theory becomes the hot spot in the field of radar and communications. This paper studies the technology of chaotic pulse generation based on FPGA. From the following aspects such as cycle, correlation and balance, the relationship between the random property of chaotic signal generated by hardware with finite precision and word length, signal length is studied. The studying results show that the chaotic signal generated by FPGA has a very long cycle and good random property.

Key words: chaotic signal; pulse; FPGA; Logistic map; Tent map

(责任编辑 刘棉玲)