

# 混沌跳频序列发生器的 FPGA 实现

陈 勇<sup>1</sup>, 凌 聪<sup>2</sup>

(1. 总参谋部第 63 研究所, 江苏南京 210016; 2. 南京通信工程学院, 江苏南京 210016)

**摘 要:** 本文根据单峰映射产生混沌序列极易被攻击的特点, 采用高维的混沌系统来设计混沌跳频序列发生器. 针对  $n$  维非线性数字滤波器产生序列的周期和分布特性, 我们在系统结构上作了相应的设计, 并最终应用 FPGA (现场可编程门阵列) 技术实现混沌跳频序列发生器. 跳频序列发生器产生序列的测试结果表明, 序列具有均匀分布, 大的线性复杂度, 汉明相关服从均值为  $L/q$  的高斯分布, 因此混沌跳频序列发生器的设计是成功的.

**关键词:** 跳频; 混沌; 非线性数字滤波器; FPGA

**中图分类号:** TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 07-0868-05

## FPGA Realization of a Chaotic FH Sequence Generator

CHEN Yong<sup>1</sup>, LING Cong<sup>2</sup>

(1. The 63 rd Research Institute of PLA GSH, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. Nanjing Institute of Communications Engineering, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** In this paper, we design a chaos-based frequency hopping (FH) sequence generator with multidimensional chaotic systems because the sequences generated by unimodal maps are easy to attack. Some modifications are introduced to  $n$ -dimensional nonlinear digital filters in order to improve the period and distribution properties of the resulted sequences. Moreover, the generator is realized in FPGAs (field programmable gate arrays) and then tested. The generator produces sequences with uniform distribution, large complexity and Hamming correlation of Gaussian distribution with mean  $L/q$ . Test results suggest that the design of generator is successful.

**Key words:** frequency hopping; chaos; nonlinear digital filters; FPGA

### 1 引言

跳频通信是通过伪随机序列控制载波频率的跳变来实现频谱的扩展, 具有抗干扰、抗衰落、多址性能好等优点, 在多址通信系统和军事通信中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>, 因而现代战术无线电通信几乎全部采用跳频. 跳频序列的设计是跳频通信的关键技术之一. 现有的跳频序列一般是由有限域或同余理论构造的, 但存在复杂度低、保密性差等缺点, 不能适应战术电台的要求.

随着非线性和混沌理论的日益成熟, 混沌在通信领域的应用已经引起了关注, 特别是在保密通信<sup>[2,3]</sup>与扩频通信<sup>[4~6]</sup>. 混沌序列由于具有随机性能好、保密性能高等优点, 可以很好地应用于跳频通信, 对混沌跳频序列和系统已有很多研究<sup>[5,6]</sup>. 混沌跳频序列的性能评估是统计意义上的, 与具有确定性最佳汉明相关的传统跳频序列相比, 混沌跳频序列的周期汉明相关略大. 但是, 在实际的军用跳频系统中, 为了达到抗干扰的目的, 序列的周期极长, 其周期常以年计, 在某一次通信过程中, 只使用了序列的一小段. 所以, 决定系统性能实际上是序列的局部性能. 如果比较传统跳频序列和

混沌跳频序列的局部性能, 可以发现二者是非常接近的, 它们都呈现一种随机的性质, 即采用混沌跳频序列不会降低系统的性能. 这是我们研究混沌跳频序列的理论依据.

混沌序列的产生主要有两类: 一类是利用微分方程表示的混沌系统, 产生时间连续的混沌信号, 系统由模拟电路来实现, 它对电路固有参数及信号再生的误差很敏感, 实际实现较困难. 另一类是利用迭代方程 (映射) 或非线性数字滤波器结构表示的混沌系统, 产生时间离散的混沌序列, 系统由数字电路实现, 更适合在通信中应用. 本文是基于非线性数字滤波器结构来产生混沌跳频序列, 并通过 FPGA 实现. FPGA 是可编程逻辑器件技术的一种, 它以集成度高、速度快、价格低等特点受到广大电子设计人员的青睐. 特别是它具有在线可编程性和实现方案容易改动的特点, 便于设计和日后算法的完善.

### 2 非线性数字滤波器结构

目前对混沌系统产生混沌序列的研究主要集中在计算机上进行仿真分析, 分析的混沌系统也只限于一些简单的单峰映射, 如 Logistic 映射、Tent 映射等. 虽然传统的单峰混沌映

便于理论分析和设计,但研究表明在有限精度条件下,单峰混沌映射所产生的混沌序列安全性很脆弱,极易被一种逆向迭代方法<sup>[7]</sup>攻击.自从 Frey、Lin 和 Chua 等提出非线性数字滤波器结构可以产生准混沌行为以来,对非线性数字滤波器产生混沌序列的研究引起了人们的关注<sup>[2,8-10]</sup>.Lin 和 Chua 认为在此结构中,运算精度足够大时,与无限精度混沌系统在实际上无法区分,并讨论了在整数运算下的混沌特性.由于非线性数字滤波器结构属于高维混沌系统,较单峰混沌映射复杂,安全性好,且便于 DSP 和 FPGA 等数字硬件实现,因此本文的研究与硬件实现都基于此系统.

非线性数字滤波器结构在一定的参数和初始条件下,可以产生具有准混沌特性的序列.根据文献[3,10],当  $n$  维非线性数字滤波器的基本结构中采用某些特殊函数时,如二进制补码溢出函数,它可以表示如图 1.

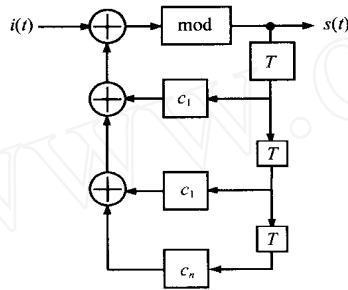


图 1  $n$  维非线性数字滤波器结构

根据图 1,当  $i(t) = 0$  时对于  $n$  维非线性数字滤波器结构的输出序列  $s(t)$  为:

$$s(t) = \text{mod} \left[ \sum_{j=1}^n c_j s(t-j) \right] \quad (1)$$

这里  $\text{mod}(\cdot)$  对应于实际硬件中的溢出.定义输出序列的状态向量  $s(t)$  为:

$$s(t) = \{s(t), s(t-1), \dots, s(t-n+1)\} \quad (2)$$

对式(1)表示的  $n$  维非线性数字滤波器结构可以改写为:

$$s(t) = \text{mod}(A \cdot s(t-1)) \quad (3)$$

其中  $A$  为状态转移矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_{n-1} & c_n \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & \ddots & \ddots & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (4)$$

令向量  $\lambda$  对应式(3)有:  $A \cdot s(t-1) = \lambda \cdot s(t-1)$ ,则称为矩阵  $A$  的特征值.其中  $\lambda$  可以表示为一元  $n$  次方程的特征根,方程称为矩阵  $A$  的特征方程.根据式(1)其对应的特征方程为:

$$\lambda^n - \sum_{j=1}^n c_j \lambda^{n-j} = 0 \quad (5)$$

该特征方程有  $n$  个特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ .根据特征矩阵性质有:

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \dots \lambda_n = |A| = c_n \quad (6)$$

对于图 1 所示的  $n$  维非线性数字滤波器结构,当  $|c_n| > 1$  时,根据文献[10]所述  $s(t)$  在状态域内遍历分布,具有准混沌行为.

### 3 改善序列性能的设计

#### 3.1 参数选择

如果参数  $c_j$  选择不当,可能会使输出的序列性能很差,特别是序列的周期特性.在输入  $i(t) = 0$  时,可得下述结论.

**结论 1** 非线性数字滤波器的参数最好取奇数.

当整数运算下字长为  $L$  比特时,令  $p = 2^L$  及  $I = \{0, 1, 2, \dots, p-1\}$ ,则滤波器的参数和状态均在  $I$  中取值.令  $Y_j(t) = \text{mod}[c_j s(t-j)]$ ,则有  $s(t) = \text{mod}[\sum_{j=1}^n Y_j(t)]$ .为了避免状态  $s(t-j)$  不同时,由于  $Y_j(t)$  相同而产生的重复周期,应选择参数  $c_j$ ,使  $s(t-j) \rightarrow Y_j(t)$  是一一映射.若  $c_j$  为奇数时,容易验证它是  $I$  上的一一映射.所以从输出序列的周期特性考虑,其参数最好选择奇数.

**结论 2** 如果  $n$  阶数字滤波器的第  $n$  阶参数为奇数,则序列的周期必然从初值开始重复.

参数  $c_j$  确定后,当连续  $n$  个状态  $Y_j(t)$  重复出现时,  $s(t)$  重复其周期.如果选择参数  $c_n$  为奇数,可避免连续  $n-1$  个状态  $s(t-j)$  重复出现及第  $n$  个状态不同时,但由于  $Y_n(t)$  相同而产生的重复周期,见下式.

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{mod} \left[ \sum_{j=1}^{n-1} Y_j(t) + Y_n(t) \right] \\ &= \text{mod} \left[ \sum_{j=1}^{n-1} c_j \cdot s(t-j) + c_n \cdot s(t-n) \right] \end{aligned}$$

这样一来,只有连续  $n$  个状态  $s(t-j)$  重复出现时,接着的下  $n$  个状态才会重复.反之,连续  $n$  个状态  $s(t-j)$  重复出现的前提是前  $n$  个状态重复.不断往前推可以得知,连续重复出现的  $n$  个状态必定与初始的  $n$  个状态相同.

这一性质有利于对输出序列  $s(t)$  的控制及应用.

#### 3.2 周期特性

非线性数字滤波器结构存在准混沌行为,但当系统以有限精度实现时,总会存在一些短周期行为,这将影响产生的混沌序列性能.对有限精度混沌系统已有许多研究,然而都不能确保序列的周期足够长,直到提出扰动的方法.文献[11]提出  $m$  序列扰动的方法来克服混沌系统的有限精度效应,是目前最有效的方法.它可以根据用户的需要,通过选择扰动的  $m$  序列来控制输出混沌序列的周期,从而克服混沌系统的有限精度效应.为了克服非线性数字滤波器结构的有限精度效应和保证输出混沌序列的周期,我们在对数字滤波器结构采用  $m$  序列扰动混沌系统的方法.在  $m$  序列的扰动下,产生混沌序列的系统如图 2.

图 2 所示的非线性数字滤波器结构采用了  $m$  序列扰动的方法,因此系统的周期可以得到保证.但当取其中某些位作为混沌跳频序列时,跳频序列的周期可能是系统周期的分数倍,跳频序列周期无法保证.本文在硬件设计时采用扰动  $m$  序列的周期取素数,经过控制后,跳频序列的周期不会小于  $m$  序列的周期.具体分析如下:

根据文献[11],采用  $m$  序列扰动时,混沌系统的周期为  $m$  序列周期的整数倍.令扰动的  $m$  序列周期为  $M$ ,则混沌系统的周期为:

$$T = a \cdot M \quad (7)$$

其中  $a$  为整数. 检测  $m$  序列的状态, 当它与初始状态相同时, 混沌系统重新初始化, 则输出序列的周期等于  $m$  序列的周期  $M$ . 任取系统输出序列的某一位, 其周期  $T$  为  $M$  的分数倍

$$T = M/k \quad (8)$$

其中  $k$  为整数. 当  $k = M$  时, 可以检测到输出序列的这一位周期为 1, 则输出序列不能用作跳频序列; 当  $k < M$  时, 由于  $M$  为素数且  $T$  取整数, 由式 (8) 可以知道  $k$  只能为 1, 则  $T$  等于  $m$  序列的周期  $M$ .

由上述分析可知, 当扰动的  $m$  序列周期取素数时, 经过控制输出序列每一位的周期等于  $m$  序列的周期. 因此, 组成混沌跳频序列的周期不会小于  $m$  序列的周期.

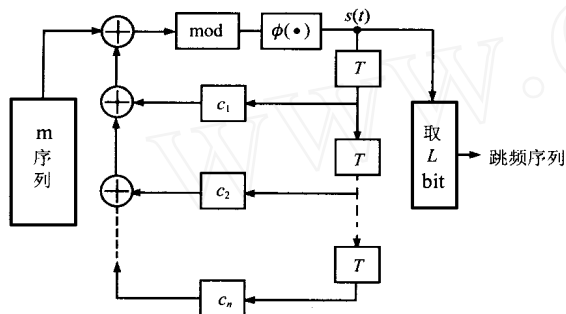


图 2 产生跳频序列的  $n$  维非线性数字滤波器结构

### 3.3 分布特性

非线性数字滤波器结构具有遍历分布的特性, 对于图 1 的  $n$  维非线性数字滤波器结构, 一般的情况下输出序列具有  $n$  维均匀分布. 但在某些参数下,  $n$  维非线性数字滤波器结构可能只具有  $q$  维均匀分布特性 ( $q < n$ ). 下面将分析  $n$  维非线性数字滤波器结构的分布特性及相应的设计. 根据文献 [10] 所述, 若对应  $|c_n| > 1$  且  $n$  非线性维数字滤波器结构不可分解, 则输出序列的状态向量  $s(t)$  服从  $n$  维均匀分布. 对于  $n$  维非线性数字滤波器基本结构, 可分解所需满足的条件为: 对于  $c_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), 当  $n$  维非线性数字滤波器系统存在  $s$  对复特征值  $|c_j| = 1$  和  $p - 2s$  个实特征值  $|r_j| = 1$  时,  $n$  维非线性数字滤波器结构可以分解为一个  $p$  维非遍历自治系统和一个  $(n - p)$  维的非自治系统, 则输出序列的状态向量  $s(t)$  服从  $(n - p)$  维均匀分布.

对于以  $n$  维非线性数字滤波器结构产生混沌跳频序列, 若输出序列具有  $n$  维均匀分布, 则混沌跳频序列的随机性最佳. 但在参数选择不当时, 根据上述分析, 输出序列可能只具有  $q$  维均匀分布特性 ( $q < n$ ). 在混沌跳频序列发生器时, 设计了非线性转移函数<sup>[13]</sup>, 它可以打乱因特征值  $|c_j| = 1$  而产生的非遍历自治系统, 从而使  $n$  维非线性数字滤波器结构的输出序列具有  $n$  维均匀分布. 设计的非线性转移函数  $\phi(\cdot)$  必须满足:

(1) 转移函数  $\phi(\cdot)$  具有非线性特性, 打乱因特征值  $|c_j| = 1$  而产生的非遍历自治系统.

(2) 转移函数  $\phi(\cdot)$  为一一映射, 保持输出序列均匀分布在状态域内.

其具体结构如图 2.

下面以 2 维非线性数字滤波器结构为例, 来分析输出序列的分布特性及转移函数  $\phi(\cdot)$  的作用. 取  $c_1 = 2, c_2 = 3$  为例, 由式 (5) 可知  $\lambda_1 = 3, \lambda_2 = -1$ . 于是 2 维非线性数字滤波器可以分解成一个  $c_{11} = -1$  的一维非遍历系统和一个  $c_{21} = 3$  的一维非自治系统. 其对应输出序列的状态向量  $s(t)$  分布如图 3, 可以看出输出序列的状态向量  $s(t)$  不服从 2 维的均匀分布. 当输出序列以整数表示时状态域定义为  $\{0, 1, 2, \dots, m\}$ , 如图 2 所示设计的  $\phi(\cdot)$  为:

$$\phi(x) = \begin{cases} \lfloor Lm/2 \rfloor - x, & x \leq \lfloor Lm/2 \rfloor \\ x, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\lfloor x \rfloor$  表示取整. 则对应输出序列的状态向量  $s(t)$  分布如图 4, 可看出输出序列的状态向量  $s(t)$  服从 2 维的均匀分布.

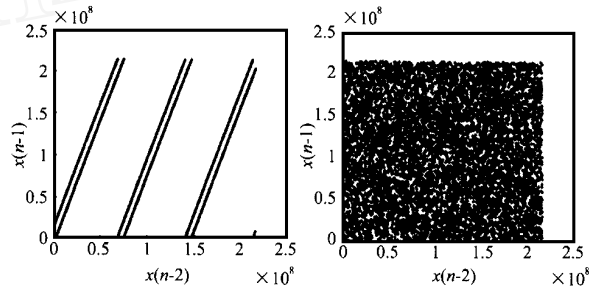


图 3  $c_1 = 2, c_2 = 3$  时 2 维数字滤波器状态向量的分析  
图 4  $c_1 = 2, c_2 = 3$  时带非线性转移函数的 2 维数字滤波器状态向量分布

## 4 跳频序列发生器的 FPGA 实现

本文跳频序列发生器的实现选用 Altera 公司的可编程逻辑器件, 开发环境为 MAX + PLUS II, 芯片为 FLEX10K 系列<sup>[12]</sup>. FLEX10K 器件首次采用嵌入式阵列, 具有高密度、低成本、低功耗等特点, 目前已成为 Altera 器件中应用前景最好的系列. FLEX10K 器件可以由 EPROM 中的数据或系统控制器提供的数据进行配置, 配置数据可以通过 Altera 的 BitBlaster 或 ByteBlaster 下载电缆装入. 根据如图 2 的实现算法编译结果, 需要使用芯片的逻辑单元为 267 个, 芯片的外部控制及数据管脚为 17, 因此选用的芯片为 EPF10K10LC84-4, 使用其中的逻辑单元比例为 46%.

跳频序列发生器的内部参数选择如下: 非线性数字滤波器结构为 4 维, 运算精度为 16 比特, 输出的跳频序列取低 8 位. 扰动的  $m$  序列为 64 阶, 初始状态全部置“1”. 非线性数字滤波器结构选取不同的参数和状态, 对应输出不同的跳频序列.

为了检测发生器的输出数据及用于跳频时的性能, 就必须对混沌序列发生器的输出数据进行采集. 我们选用计算机的 ISA 接口对混沌序列发生器进行数据采集, 并设计了一块数据采集的 ISA 插卡, 混沌序列发生器电路板与 ISA 卡之间的译码电路由 Altera 公司 MAX7000 系列的 EPM7128SLC84-15 芯片完成.

## 5 跳频序列的性能

### 5.1 均匀分布特性

非线性数字滤波器的遍历性可以保证混沌跳频序列在各

个频率上均匀分布,长为  $L$  的  $q$  元混沌跳频序列满足均匀分布的要求,即  $q$  个频率点在跳频序列中出现几率相同.对均匀性的检测采用统计中的  $\chi^2$  检测方法,若  $q$  个频率点中的第  $i$  个频率出现的次数为  $f_i$ ,则

$$\chi^2_{q-1} = \sum_{i=1}^q \frac{(f_i - L/q)^2}{L/q} \quad (10)$$

当实际序列的  $\chi^2_{q-1}$  小于指定的显著水平值(例如 5%)时,认为该序列满足均匀分布.对长度  $L = 1024$ ,频率点  $q = 64$ ,任取跳频序列发生器产生的 100 条跳频码序列进行检测,其检测的  $\chi^2_{q-1}$  如图 5 所示.长 1024 的 64 元跳频序列  $\chi^2_{q-1}$  的显著水平(5%)值为 82.5,检测的 100 条跳频序列中,只有一条超过 82.5,通过率为 99%,平均的  $\chi^2_{q-1}$  为 61.36,因此跳频序列发生器产生的序列满足均匀分布.

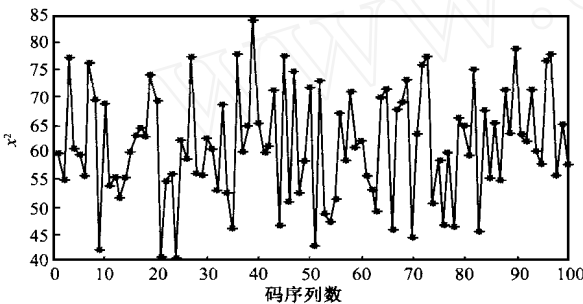


图 5 跳频序列发生器产生序列的  $\chi^2_{q-1}$  检测

### 5.2 相关特性

根据文献[6]对混沌跳频序列的汉明相关分析,混沌跳频序列的汉明互相关、汉明自相关旁瓣应服从均值为  $L/q$  的高斯分布.下面来检测跳频序列发生器产生序列的汉明相关分

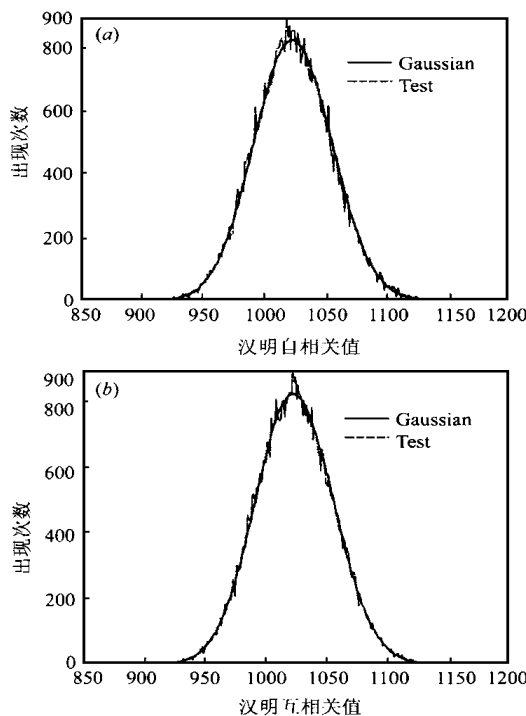


图 6 检测的汉明自相关旁瓣、汉明互相关分布结果

布,取序列长  $L = 65536$ ,频率点  $q = 64$ ,检测的汉明自相关旁瓣、汉明互相关分布如图 6,可以看出实际产生序列的汉明相关与理论一致.

### 5.3 线性复杂度

线性复杂度定义为序列的等效线性长度,对跳频序列在抗干扰中有重要意义.跳频序列的复杂度测试是将其写成二进制表示后对二进制序列进行测试.混沌序列本质上是独立均匀分布的随机序列,因此

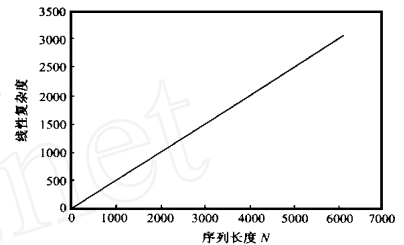


图 7 跳频序列发生器产生序列的线性复杂度

二进制序列的线性复杂度的均值约为序列长度的一半,方差为  $86/81$ ,具有理想的线性复杂度特性.取长  $L = 1024$  的 64 元跳频序列发生器产生的序列,变为  $N = 6144$  的二进制序列,其线性复杂度曲线如图 7.

### 6 结论

随着非线性及混沌理论不断发展,混沌理论已经走向实用化的领域,混沌跳频是混沌理论在通信领域的重要应用研究课题.混沌序列发生器的硬件实现一直是混沌理论实用化最关键和最困难的问题.本文根据单峰映射产生的混沌序列安全性很脆弱,极易被攻击的特点,对混沌跳频序列发生器采用高维的混沌系统,选取非线性数字滤波器结构来实现跳频序列发生器.针对非线性数字滤波器产生的序列,在周期和分布特性上作了相应的设计,并最终应用 FPGA 技术完成混沌跳频序列发生器的设计.跳频序列发生器产生序列的测试结果表明,实际跳频序列的性能与理论一致,混沌跳频序列服从独立、均匀分布,汉明相关服从均值为  $N/q$  的高斯分布,序列的复杂度相当于随机序列,因此混沌跳频序列发生器的设计是成功的.混沌跳频序列随机性能好、保密性高,能有效地抵抗频率跟踪式干扰,因此在战术跳频电台中很有应用价值.

### 参考文献:

- [1] 梅文华,杨义先.跳频通信地址编码理论[M].北京:国防工业出版社,1996.
- [2] D R Frey. Chaotic digital encoding: An approach to secure communication [J]. IEEE Trans. on circuits and systems II, 1993, 40 (10): 660 - 666.
- [3] M Gotz, K Kelber and W Schwarz. Discrete-time chaotic encryption systems-part I: Statistical design approach [J]. IEEE Trans. on circuits and system II, 1997, 44(10): 963 - 970.
- [4] 王亥,胡健栋. Logistic-Map 混沌扩频序列 [J]. 电子学报, 1997, 25(1): 19 - 23.
- [5] 李文化,王智顺,何振亚. 用于跳频多址通信的混沌跳频码 [J]. 通信学报, 1996, 17(6): 17 - 21.
- [6] Ling Cong, Sun Songgeng. Chaotic frequency hopping sequences [J]. IEEE Trans. Commun., 1998, 46(11): 1433 - 1437.

## 基于 EPP 增强并行接口的虚拟仪器

潘仲英

(北京航空航天大学电磁工程实验室,北京 100083)

虚拟仪器技术 (Virtual Instrumentation) 是一种构成仪器系统的新概念,其基本思想是:用计算机资源取代传统仪器中的输入、处理和输出等部分,实现仪器硬件核心部分的模块化和最小化;用计算机软件和仪器软面板实现仪器的测量和控制功能。

虚拟仪器是基于微型计算机软件硬件平台的可视化智能仪器。虚拟仪器不是虚拟的仪器,而是一种实在的仪器。虚拟仪器包括虚拟仪器硬件和虚拟仪器软件两大部分。虚拟仪器硬件部分与各种类型的传感器和微型计算机(包括 PC 机、笔记本电脑、掌上电脑、工控机和单片机等)相结合可构建自动测量系统、自动检测系统、自动监测系统和自动探测系统等硬件平台。虚拟仪器软件部分将计算机硬件资源与仪器硬件有机地融合为一体,把计算机强大的计算、处理和图形能力与仪器硬件的测量、控制能力结合在一起。

虚拟仪器与微型计算机的接口主要有三种形式:

(1) 专用仪器接口 最典型的是 VXI 总线 (VME bus extensions for Instrumentation, 即 VME 总线在仪器领域的扩展)。该总线数据传输速度可达 40MB/s, 电气标准规范, 系统重组和电磁兼容性均较好, 并具有同步触发功能; 但系统结构复杂、成本高, 一般适合于组建大型精密的自动测试系统。

(2) 内部卡式接口 主要有微机内部的 ISA 接口和 PCI 接口, 数据传输速度分别可达 16MB/s 和 133MB/s; 但由于并

卡式结构的虚拟仪器直接插在微机内部的主板上, 极易受到 PC 机电源纹波和机箱内电磁辐射的干扰, 从而极大限制了它的应用范围。

(3) 外部通用接口 主要有增强并行接口 EPP (Enhanced Parallel Port, IEEE1284)、扩展能力接口 ECP (Enhanced Capability Port, IEEE1284)、通用串行总线 USB (Universal Serial Bus) 和火线 Firewire (即 IEEE1394 总线), 数据传输速度分别可达 2MB/s、4MB/s、12MB/s 和 400MB/s。EPP、ECP 是在原打印机接口基础上发展起来的并行接口; USB、Firewire 是新型高速串行总线, 并具有热插拔能力。由于采用外部通用接口的虚拟仪器硬件部件在微机外部与计算机相联, 因此电磁兼容特性良好。特别是增强并行接口 EPP, 技术的复杂性和成本都不会太高, 是构建通用自动测试系统的一种良好选择。

北京航空航天大学电磁工程实验室虚拟仪器与探测技术研究组, 正在从事虚拟仪器 (包括虚拟测量仪器、虚拟控制仪器、虚拟检测仪器、虚拟监测仪器和虚拟探测仪器等) 的研制和将虚拟仪器与各类传感器、微型计算机 (包括 PC 机、笔记本电脑、掌上电脑和单片机等) 结合, 构建自动测量系统、自动控制系统的研究。目前已研制出基于 EPP 增强并行接口的瞬态波形记录仪和数字存储示波器两大虚拟仪器产品系列, 主要技术指标如下: (下转第 876 页)

- [7] Ling Cong, Wu Xiaofu, Sun Songgeng. A general efficient method for chaotic signal estimation [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1999, 47(5): 1424 - 1428.
- [8] T Lin, L O Chua. Chaos in digital filters [J]. IEEE Trans. CAS, 1988, 35(6): 648 - 658.
- [9] T Lin, L O Chua. On chaos of digital filters in the real world [J]. IEEE T. CAS, 1991, 38(5): 557 - 558.
- [10] K Kelber. N-dimensional uniform probability distribution in nonlinear auto-regressive filter structures [J]. IEEE Trans on CAS-I, 2000, 47(9): 1413 - 1417.
- [11] 周红, 凌雯婷. 有限精度混沌系统的 m 序列扰动实现 [J]. 电子学报, 1997, 25(7): 95 - 97.
- [12] 宋万杰, 罗丰, 吴顺君. CPLD 技术及其应用 [M]. 西安市: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [13] 陈勇, 凌聪. 非线性转移函数对滤波器结构混沌信号周期特性的改善 [J]. 电子信息学报, 2001, 23(6).

### 作者简介:



陈勇男, 1975 年出生于湖南, 分别于 1997 年 7 月和 2000 年 2 月在南京通信工程学院获工学学士和硕士学位。现于南京总参第 63 研究所工作, 主要从事卫星通信技术的研究。

凌聪男, 1974 年出生于安徽, 1995 年毕业于南京通信工程学院无线通信系, 获学士学位, 1997 年获该院通信与信息系统专业硕士学位, 现为该院讲师。研究兴趣为无线通信, 重点是扩频通信、编码和迭代处理技术、时空调制等, 在国内外核心期刊发表论文十多篇, 负责“第四代移动通信预研”等多项基金项目。