

基于 Logistic 映射的混沌跳频信号发生器设计与实现*

李 伟, 禹思敏

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 混沌数字序列以其优良的伪随机特性, 在扩频通信中展示出潜在的应用前景。在 Logistic 映射的基础上, 通过混沌序列当前值与前 2 个值之间的逻辑运算, 并由 m 序列控制其运算关系与系数, 提出一种复杂度更高的用于混沌扩频的数字序列。利用 MCS-51 单片机作为跳频图案的生成平台以及锁相环电路构成频率合成器, 实现了跳速 1 000 跳/s、频点数为 256、频率范围从 15 MHz~17.5 MHz 的混沌跳频信号发生器。

关键词: Logistic-映射; m 序列; 混沌跳频; 单片机; 锁相环

中图分类号: TN914.41

文献标识码: B

Design and implementation of chaotic frequency-hopping signal generator via Logistic-map

LI Wei, YU Si Min

(College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: As its pseudo-random and excellent correlation characteristic, chaotic digital sequence has been applied to spread spectrum communications systems and exhibits the potential application foreground. Based on Logistic-map, by using m sequence, calculating the current and the front two values of chaotic sequence, and controlling the operation relationship as well as coefficients, a novel high complex sequence used to chaotic spread spectrum is proposed. By utilizing MCS-51 single-chip as the generating platform of frequency-hopping pattern and the frequency synthesizer constructed by phase-locked loop circuit, a chaotic frequency-hopping signal generator with 1 000 jump/s, 256 frequency points and frequency range from 15 MHz to 17.5 MHz is realized.

Key words: Logistic-map; m sequence; frequency-hopping; single-chip; phase-locked loop

跳频通信系统以其抗干扰能力强、组网灵活等优点, 在军事与民用通信领域得到了广泛的应用^[1]。跳频图案的选择是跳频通信技术的核心。现有跳频序列(如 m 序列、RS 码序列等)均存在复杂度低、保密性较差等缺点^[2]。

混沌序列以其对初始条件敏感性、类随机性、宽带谱和冲击式的相关特性等特点, 在扩频通信系统中展现出良好的应用前景^[3]。但纯粹的混沌序列作为跳频序列过于单一。为提高混沌跳频系统跳频图案的复杂度, 可将数字混沌序列的当前时刻值与前两时刻的值进行逻辑运算来产生 1 个新的序列, 并通过 m 序列的值来控制

制运算关系和前 2 个时刻值的系数, 从而生成一种复杂度更高的用于混沌扩频的数字序列。利用 MCS-51 单片机作为跳频图案的生成平台以及锁相环电路构成频率合成器, 实现了跳速 1 000 跳/s、频点数为 256、频率范围在 15 MHz~17.5 MHz 的混沌跳频信号发生器, 实验结果证实了这一方法的可行性。

1 Logistic 映射

已知 Logistic 映射的迭代方程为

$$x(n) = \mu x(n-1)[1-x(n-1)] \quad (1)$$

概率密度函数为^[4]

$$\rho(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{x(1-x)}} & 0 < x < 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

* 基金项目: 国家自然科学基金(60572073, 60871025); 广东省自然科学基金(8151009001000060, 8351009001000002)资助课题

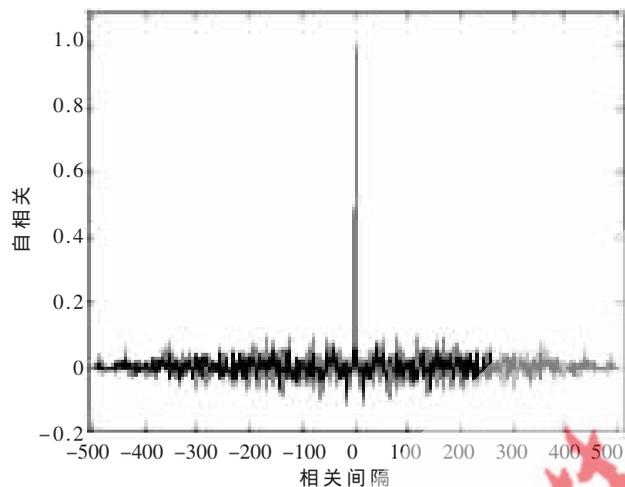
其自相关函数为

$$R(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k - \bar{x})(x_{k+\tau} - \bar{x}) \quad (3)$$

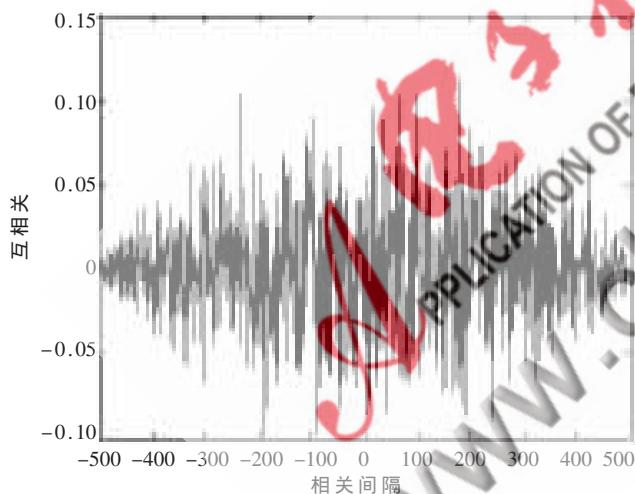
其互相关函数为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k - \bar{x})(x_{2k+\tau} - \bar{x}) \quad (4)$$

根据上述式(3)和式(4)得出 Logistic 映射的自相关和互相关特性,如图 1 所示。



(a)自相关性



(b)互相关性

图 1 Logistic-Map 的相关特性

2 混沌跳频序列的产生

在 Logistic 映射的基础上,将当前时刻 Logistic 映射混沌序列的值 $x(i)$ 与前 2 个时刻的值 $x(i-1)$ 、 $x(i-2)$ 通过逻辑运算 $f(*)$ 后,得到 1 个新的伪随机序列 $\{FH(i)\}$,作为系统的跳频图案。其数学表达式为:

$$FH(i) = f[x(i), m_1 \cdot x(i-1), m_2 \cdot x(i-2)] \quad (5)$$

其中运算关系 $f(*)$ 及 m_1 、 m_2 由 m 序列来确定。

本文选用 1 个 $r=5$ 的 m 序列 $M(i)=[m_0, m_1, m_2, m_3, m_4]$,由此确定时刻 $x(i)$ 与 $x(i-1)$ 和 $x(i-2)$ 的运算关系,如表 1 所示。

《微型机与应用》2010 年第 3 期

表 1 逻辑运算关系判定表

m_3	m_4	逻辑运算关系
0	0	“与”运算 &
0	1	“或”运算
1	0	“异或” \oplus
1	1	“同或” \odot

m 序列的 m_1 和 m_2 位的值则分别作为前 2 个时刻值的系数,而 m_0 位仅在构成移位寄存器时有用,如表 2 所示。

表 2 m 序列值与 $FH(i)$ 的关系

m_4	m_3	m_2	m_1	$FH(i)$	m_4	m_3	m_2	m_1	$FH(i)$
*	*	0	0	$x(i)$	1	0	1	0	$x(i) \oplus x(i-2)$
0	0	0	1	$x(i) \& x(i-1)$	1	1	1	0	$x(i) \odot x(i-2)$
0	1	0	1	$x(i) x(i-1)$	0	0	1	1	$x(i) \& x(i-1) \& x(i-2)$
1	0	0	1	$x(i) \oplus x(i-1)$	0	1	1	1	$x(i) x(i-1) x(i-2)$
1	1	0	1	$x(i) \odot x(i-1)$	1	0	1	1	$x(i) \oplus x(i-1) \oplus x(i-2)$
0	0	1	0	$x(i) \& x(i-2)$	1	1	1	1	$x(i) \odot x(i-1) \odot x(i-2)$
0	1	1	0	$x(i) x(i-2)$					

采用 $r=5$ 的 1 个本原多项式 $(45)_8$ 构成 m 序列^[5]。本原多项式的数学表达式为:

$$f_m(x) = x^5 + x^2 + 1 \quad (6)$$

根据表 2 中的对应关系,可利用 m 序列和 Logistic-Map 数字混沌序列产生 1 个新的更为复杂的序列 $\{FH(i)\}$,其时域波形图如图 2 所示。

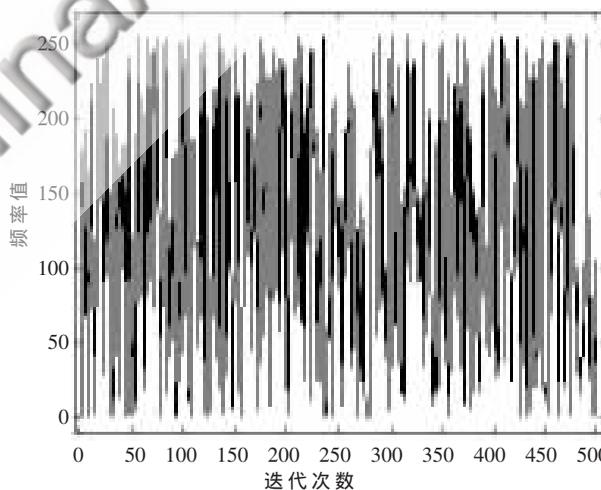


图 2 序列 $\{FH(i)\}$ 的时域图

由于序列 $\{FH(i)\}$ 是由 Logistic 映射混沌序列的当前值与前 2 个时刻的值通过逻辑运算得到的,通过这种方法可增加序列的复杂度,但其自相关和互相关性略有下降,如图 3 所示。

3 跳频信号发生器的硬件实现

本文采用 MCS-51 系列单片机硬件平台作为跳频图案的发生平台,所产生的跳频序列值作为分频比控制频率合成器的输出频率,系统的整体硬件原理图如图 4

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 51

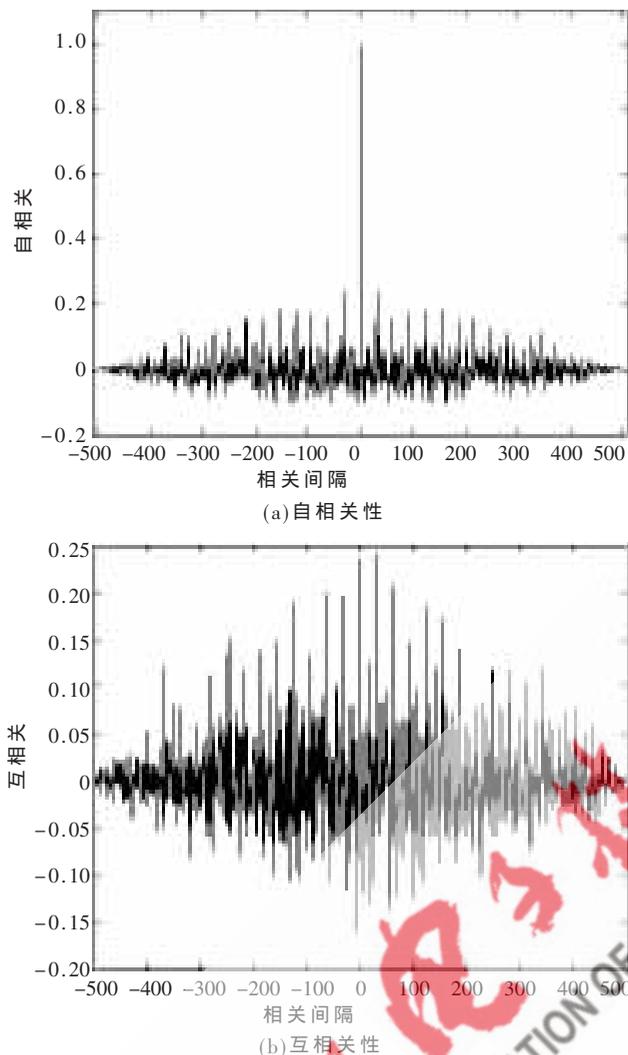


图3 序列{FH(i)}的相关特性

所示。下面针对图4中所示的跳频信号发生器硬件部分进行具体的分析与设计。

跳频信号发生器需要较高的频率跳变速率,这就要

求系统产生跳频序列的速度尽可能快。考虑到产生跳频序列的程序大小,单片机可通过单片运行的方式工作,并选用最高工作频率33MHz。

通过单片机迭代计算的混沌序列值以BCD码的形式送入可编程分频器芯片TC9198P,作为频率合成器的分频比(N)。当MODE值取“L”时为双计数器模式,0~6位吞吐计数,7~17位可编程计数;当MODE值为“H”、D17值为“L”时,0~15位进入二进制可编程计数模式。当MODE与D17值同为“H”时,芯片处于BCD码型可编程模式。MODE引脚的值为“H”时,D16引脚无效。这里采用BCD码型可编程模式,将MODE、D17引脚置为高电平。

跳频系统要求频点数为256,相邻频点的步进值为10kHz。可将标称值为10.24MHz的晶振频率通过4060芯片1024分频后,作为频率合成器的基准频率。

锁相环芯片74HC4046作为频率合成器的核心部件,集成了鉴相器和压控振荡器,其工作频率可达30MHz左右。

74HC4046中有3种类型的相位比较器:XOR型、JK触发型和PFD型。跳频信号发生器系统要求的频率变化范围较宽,XOR型和JK触发型鉴相器难以满足大范围的频率捕捉、锁定的要求。PFD鉴相器能达到无限捕捉范围,完全可以满足系统的要求。

混沌跳频信号发生器的工作频率范围是15MHz~17.5MHz。R1与R2的值共同决定锁相环的有效工作范围,在保证(R2/R1)的值大于10的条件下,选取R1=7.6kΩ,R2=100kΩ。锁相环的中心频率(ω₀)和压控振荡器的中心频率(自由振荡频率),可确定为50μF左右。

线性低通滤波器在整个环路中的作用非常重要,它直接影响这个锁相环路的阻尼因子(ξ)、自然频率(ω_n)、捕捉时间(T_p)、锁定时间(T_L)和锁定范围(Δω_L)等因素。根

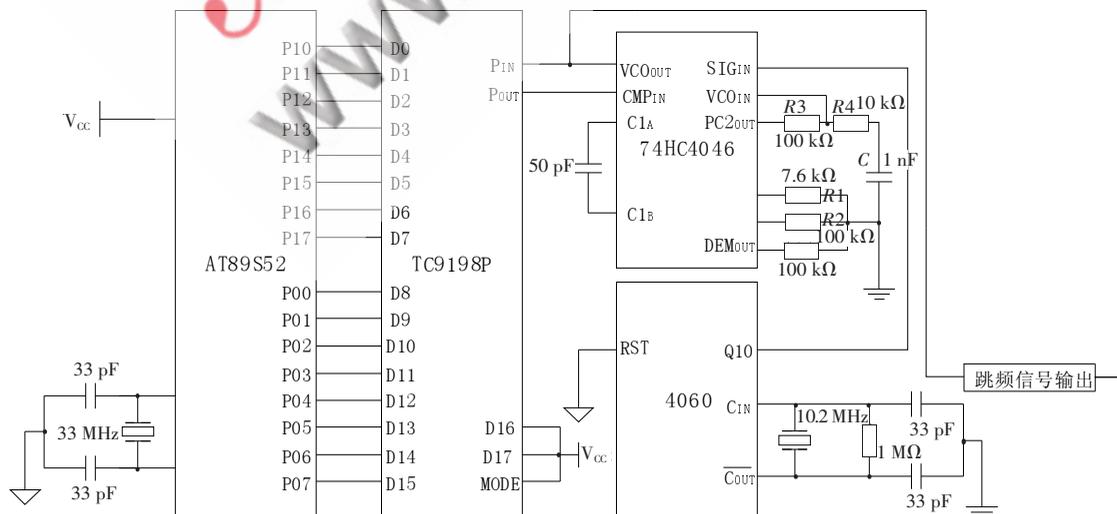


图4 跳频信号发生器的硬件原理图

网络与通信 Network and Communication

据系统要求,选用无源超前滞后滤波器。

由参考文献[6]可知,锁相环路系统参数如本征频率、阻尼因子、捕捉时间、锁定时间和锁定范围可由下式确定:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_0 K_d}{N(\tau_1 + \tau_2)}}, \zeta = \frac{\omega_n \tau_2}{2} \\ T_p \approx 2(\tau_1 + \tau_2) \ln \frac{1}{1 - \frac{2N\Delta\omega_0}{U_B K_0}} \\ T_L \approx \frac{2\pi}{\omega_n}, \Delta\omega_L = 4\pi\zeta\omega_n \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, U_B 为电源电压, K_0 为压控振荡器增益, K_d 为鉴相器增益, $\Delta\omega_0$ 为初始频偏, $\tau_1 = R_3 C$, $\tau_2 = R_4 C$ 。当锁相环用做频率合成器时,由于要求大范围的快速锁定,必然会降低输出频率的准确度。经综合考虑,这里参数选为: $\tau_1 = 5 \times 10^{-6}$, $\tau_2 = 5 \times 10^{-4}$ 。

4 跳频图案产生单元的软件设计

跳频图案的产生过程可大致分割为几个模块,如图5所示。

在 Logistic 映射方程中,参与运算的均为(0,1)之间的小数,而单片机并不适于处理浮点数,因此,可以通过线性映射 $X(n) = 65536 \times x(n)$ 将(1)式化为如下形式:

$$X(n) = 4X(n-1)[65536 - X(n-1)] / 65536 \quad (8)$$

通过变换,Logistic 映射方程的值域变为(0,65535)。为加快程序运行速度,可通过按位逻辑运算替代乘、除

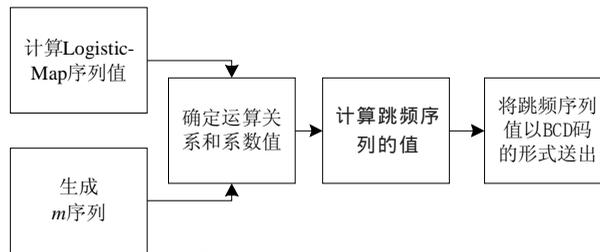


图5 跳频图案产生过程模块图

运算,根据式(8)迭代计算出 Logistic 映射序列的值。

依据式(5)所示逻辑关系生成 m 序列,查表2确定运算关系 $f(*)$ 和系数 m_1, m_2 。同理,通过数字混沌序列当前值与其前2个时刻的值进行相关性运算,得跳频序列 $\{FH(i)\}$ 的值。

跳频系统的频点数为256,为1个8位二进制数的表数范围,故将前面算得的序列值的低8位取出,作为跳频频率控制码。由于可编程分频器处于BCD码型可编程计数状态,故要将取出的8位二进制数转换成BCD码的形式。

由于系统的输出频率范围是15 MHz~17.5 MHz,故在输出之前要将原来的序列值以BCD码的形式加上1500。

单片机送出跳频序列值的时间间隔 Δt 要大于锁相环的最大锁定时间 T_{Lmax} ,才不会造成因为数据传输过快,而锁相环未及时锁定所带来的较大频率误差。比较



图6 单片机主程序流程图

网络与通信 Network and Communication

Δt 和 T_{Lmax} 的值可知,在计算出 FH 值并将其送出后要进行一定时间的延时。

混沌跳频信号发生器系统的单片机软件的总体流程如图 6 所示,其中判断运算关系及确定运算系数的具体流程如图 7 所示。

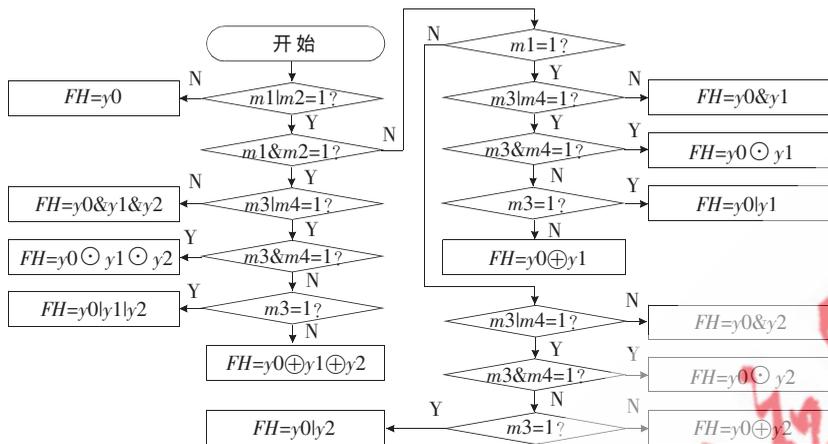


图 7 运算关系 $f(*)$ 及系数的判定过程

在跳频系统中,仅单独选用混沌数字序列作为跳频图案的复杂度不高。本文在 Logistic 混沌映射的基础上,通过数字混沌序列当前值与前 2 个时刻值的逻辑运算,并由 m 序列控制其运算关系及系数,可产生 1 个复杂度更高的新的序列作为系统的跳频图案。在混沌跳频器的设计与技术实现方面,利用 MCS-51 单片机作为跳频

图案的生成平台以及锁相环电路构成频率合成器,实现了跳速 1 000 跳/s、频点数为 256、频率范围在 15 MHz~17.5 MHz 的混沌跳频信号发生器,实验结果证实了这一方法的可行性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 凌聪,孙松庚.Logistic 映射跳频序列[J].电子学报,1997,25(10):79-81.
- [3] 孙剑,罗汉文,宋文涛.有限精度混沌映射跳频多址序列[J].通信技术,2000(1):32-34.
- [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] 田日才.扩频通信[M].北京:清华大学出版社,2007:67-84.
- [6] ROLAND E. B. 锁相环设计、仿真与应用[M].北京:清华大学出版社,2007.

(收稿日期:2009-09-05)

作者简介:

李伟,男,1984年生,硕士研究生,主要研究方向:混沌理论与保密通信。

禹思敏,男,1957年生,博士生导师,教授,主要研究方向:混沌理论与保密通信。