

采样锁相环系统中混沌行为的 实验研究*

王俊鵬 高金峰 黄冬梅

(计算机及自动化系)

摘 要: 本文给出了文献[1]产生混沌的采样锁相环系统的实验线路及实验结果, 通过对实验结果进行讨论, 得出一些设计采样锁相环系统的准则。

关键词: 混沌, 采样锁相环, 平均频谱

文献[1]从理论和计算机模拟两方面研究了频率合成器中广泛采用的采样锁相环系统中的混沌现象。给出了采样环路中总的环路增益, 采样周期与系统混沌区域之间的关系。本文则报道有关采样相环中混沌行为的实验线路及结果。

1 环路的组成及原理

采样锁相环的基本组成如图1所示。它由参考信号源、采样保持电路、低通滤波器、压控振荡器和采样脉冲信号形成电路等主要环节组成。其基本原理是所有环节一起组成一个相位误差的闭环调节系统。由采样保持电路构成的鉴相器对输入参考信号 f_R 和环路的反馈信号 f_o 进行相位比较, 输出一个代表两信号相位差的误差电压。误差电压经低通滤波器 LPF 处理后加到压控振荡器的输入端。若环路各参数设计合理, 则压控振荡器的输出频率 f_o 在误差电压控制下, 朝着减小参考信号和反馈信号相位差的方向调整。最终使得 $f_o = f_R$ 。此时环路锁定, 采样保持电路构成的鉴相器输出保持稳定。若环路参数设计不合理或者由于元器件失效使环路参数发生变化, 则环路会产生不稳定的输出, 甚至产生混沌现象。此时, 鉴相器的输出电压不再恒定, 压控振荡器输出信号的频率也将随时间变化, 不能实现和参考信号同步的目的。

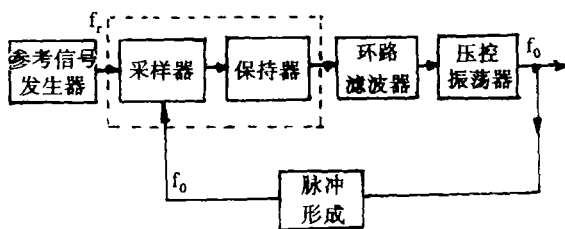


图1 采样锁定相环原理方框图

* 收稿日期: 1989.09.04

2 主要环节的工作原理及环节参数确定

2.1 参考信号源

参考信号源在采样锁相环中有两个作用, 其一是给整个环路提供必要的频率稳定度, 另外就是给采样保持电路提供一个适当的波形。由文献[2]知道, 采样保持鉴相器的鉴相特性, 由参考信号源的波形决定, 例如, 当参考信号源的波形为正弦时, 则此时鉴相器输出电压与参考信号和反馈信号的相位差的关系为:

$$V_d(t) = K_d \sin \theta_c(t) \quad (1)$$

其中: $V_d(t)$ —— 为鉴相器输出电压;

K_d —— 鉴相器增益;

$\theta_c(t)$ —— 为两信号的相位差。

当信号源的波形为三角波和锯齿波时, 则鉴相器特性分别为三角和锯齿鉴相特性。

为了调节参数方便, 在实验中采用任意波形发生器来提供所需的参考信号。

2.2 采样保持鉴相器

由于普通模拟鉴相器和二阶环不能抑制参考信号的高次谐波及噪声。而采用零阶所保持器的采样保持电路构成的鉴相器其幅频特性呈低通特性, 且在参考频率各次谐波处具有零值幅度, 即构成所谓梳状滤波器, 因此在频率合成器中较多地采用了能抑制高次谐波和噪声的采样保持鉴相器。鉴相器的原理图如图 2 所示。

高输入阻抗运算放大器 A_1 和 A_2 均构成单位增益跟随器, 跟随器具有较高的输入阻抗和较低的输出阻抗, 采样开关由 CD4066 模拟开关组成, C 为保持电容。其工作原理如下:

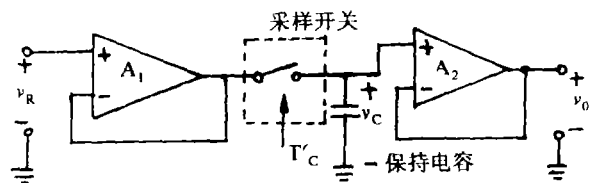


图2 三角采样保持鉴相器鉴相特性

采样脉冲到来之前, 开关 K 断开, 电容 C 上的电压无泄放通路, 处于保持状态。当采样脉冲到来时, 开关 K 闭合, 由于单位增益跟随器的输出电阻和模拟开关的导通电阻较小, 若电容电压 V_C 低于信号源电压 V_R 时, 则电容电压立即充电到 V_R 。若 V_C 高于信号源电压 V_R , 电容电压同样会在很短的时间内释放到与 V_R 相同的数值。随着采样脉冲的结束, 开关 K 断开, 电容上电压又进入保持时期直到下个采样脉冲到来。单位增益跟随器 A_2 的输出 V_0 等于 V_C 。从而在 A_2 的输出端得到一个以 $T = \frac{1}{f_0}$ 为周期的样本电压。参考信号为三角波形时的三种特殊情况, 即

$f_r = f_0$, $f_r > f_0$ 和 $f_r < f_0$ 的理想采样过程波形如图 3 所示。经过分析并作处理后参考信号源波形为三角波形构成的鉴相特性为图 4 所示。

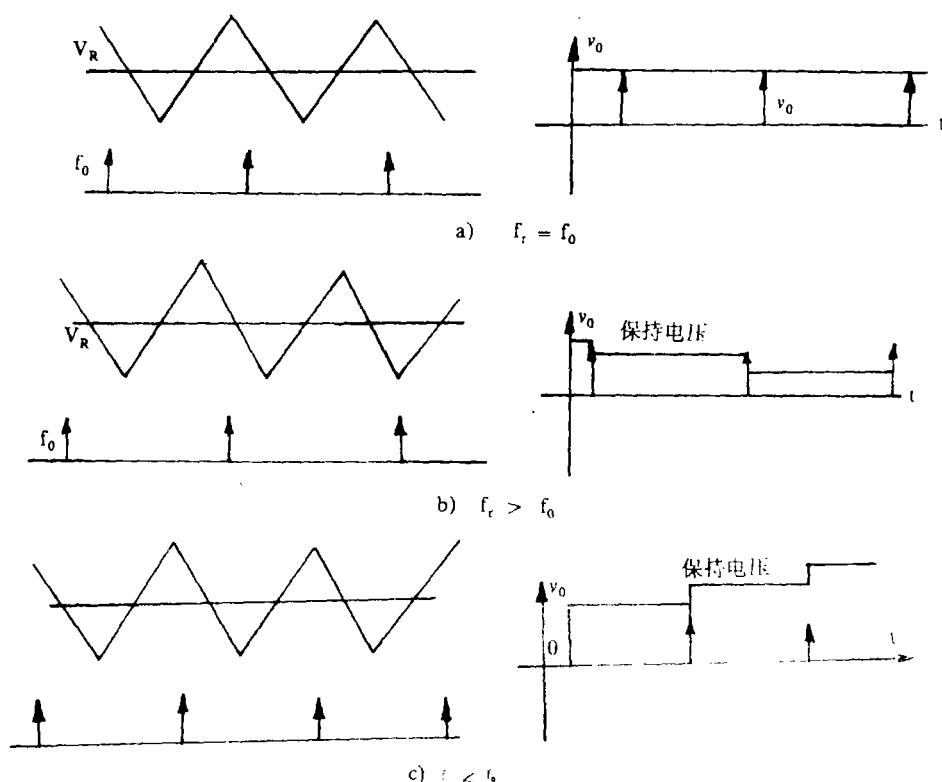


图3 三角形采样保持鉴相器采样过程波形

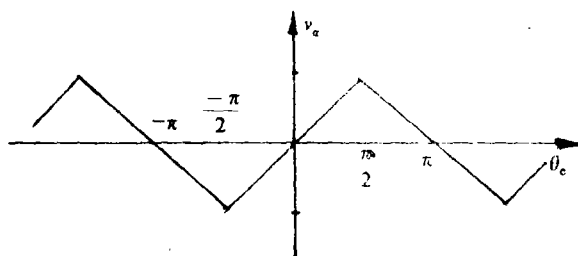


图4 三角采样保持鉴相器鉴相特性

2.3 环路低通滤波器

环路低通滤波器在环路中的作用是平滑采样保持鉴相器的输出。在环路中的作用非常重要。通常有多种选择, 常用的有无源 R_C 积分器, 无源比例积分器和有源比例积分器等。为了简单在实验中采用了无源 R_C 积分器, 由文献[1], [2]知道环路的状态与 R_C 积分器的参数有着重要的联系。

2.4 压控振荡器

压控振荡器是通过改变其控制电压以实现对其输出频率进行控制的电路。对压控振荡器的基本要求是频率复盖范围和频率线性度。为了方便实验线路采用的压控振荡器如图 5 所示。它由 CD4046 锁相环芯片的压控振荡器部分组成。由文献[3]知,其输出端输出为具有 56% 占空比的方波脉冲,当电源电压为 5V 时,频率非线性度为 0.1%。振荡器的中心振荡频率、最高振荡频率和最低振荡频率可以很方便地由外接参数调整。

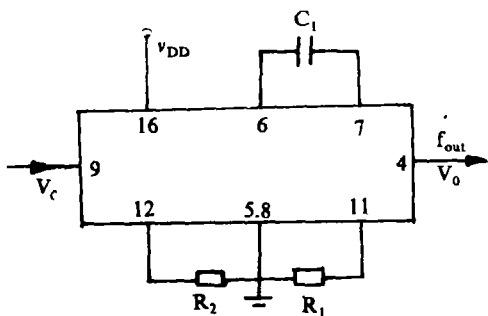


图 5 压控振荡器

压控振荡器的重要指标压控增益可由下式定出:

$$K_0 = 2\pi\Delta f / \Delta V_c \quad (2)$$

其中: Δf 为频率增量; ΔV_c 为控制电压增量。

2.5 采样脉冲形成电路

由采样保持电路的采样过程可知,若要在采样保持电路的输出端得到理想的采样保持输出,所需采样信号理论上讲应该是周期为 $T_0 = 1/f_0$ 的冲激函数序列。为了逼近这一要求,将压控振荡器输出的 50% 占空比的脉冲序列处理成接近理想的采样序列,实验中采用了图 6 所示的脉冲边沿检出电路。

电路利用图示的电容上的暂态,当输入脉冲突变时,门电路的 A 点有一个短暂的高电平与输入。相与的结果,在输出端获得一个窄脉冲,经非门反相后,即得到适合于 CD4066 模拟开关使用的正向采样脉冲。电容 C 的大小决定输出脉冲的宽窄。图 6(b)中为其各点的波形。

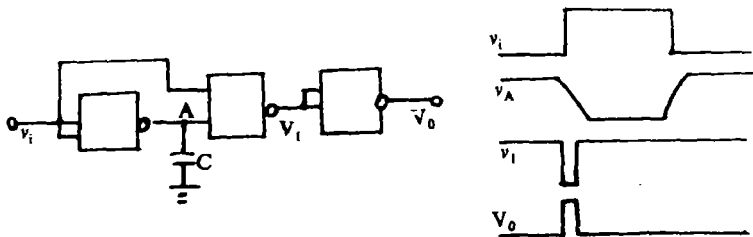


图 6 脉冲边沿检出电路

3 实验结果

所谓混沌其物理意义是指确定性系统在确定输入作用下所产生的不确定输出。不确定输出则指输出的随机性。目前,实验室中确定连续系统或电路中输出是否混沌主要采用相平面法和频谱分析方法。由于所讨论的采样锁相环系统介于连续系统和离散系统之间,因

此在实验中判断混沌的方法主要采用平均频谱分析方法。

众所周知, 当系统或电路的输出为周期性或拟周期时, 其平均频谱表现为离散的谱线。而当系统或电路的输出为混沌时, 由于时域的非周期性或随机性, 由付氏变换理论知道, 其平均功率谱则表现为连续的频谱。最为常见的为在某一频带内连续且在某些频率上夹杂有一些尖峰出现。本实验判断混沌是否出现的依据是观察压控振荡器的输出和低通滤波器的输出的平均频率谱是否连续。

实验中固定压控振荡器的压控增益 K_0 、振荡器的中心频率 f_0 和低通滤波器的电容 C 分别是:

$$K_0 = 356, f_0 = 590\text{Hz}, C = 0.22\mu\text{F}$$

而将参考信号的周期 $T_R = 1/f_R$ (等价采样周期)、鉴相器鉴相增益 K_d 和低通滤波器的电阻 R 作为可调节的参数。

通过改变可调节参数, 有下述几点结果:

3.1 固定参考信号的周期 $T_R = 1/f_R$, 使其在压控振荡器能够跟踪的范围之内。若再固定采样保持鉴相器的鉴相增益 K_d , 改变低通滤波器的电阻 R 。当 R 较小时例如 $K_d = 1.5$, $30\text{K}\Omega < R < 350\text{K}\Omega$ 环路的输出出现反常, 不能与参考信号源的频率同步。观察输出的平均频谱, 此时有连续谱出现。当 R 较大时, 例如 $K_d = 1.5$, $R > 1\text{M}\Omega$ 环路锁定, 输出与参考信号同步。压控振荡器输出的脉冲的频率与参考信号的频率相等。平均频谱为离散谱线。

3.2 固定参考信号的周期 $T_R = 1/f_R$, 使其在压控振荡器能跟踪范围之内。若再固定低通滤波器的电阻 R , 改变鉴相器的鉴相增益, 例如, 选择 $R = 50\text{K}$ 。当 K_d 较大时, 环路不能锁定, 输出信号混沌。当 K_d 较小时, 环路锁定, 参考信号与压控振荡器的频率相同。

3.3 固定鉴相器增益 K_d 和低通滤波器的参数 R , 改变参考信号源的周期 $T_R = 1/f_R$, 使其在压控振荡器能跟踪的范围内变化。若 R 值较小, K_d 值较大时, 无论怎样变化 T_R 的数值, 环路均不能锁定。

在图9中给出了低通滤波器电容上的电压随时间变化的几个瞬间的典型波形。从波形上明显可以看出压控振荡器控制电压的非周期性。图10则给出了电压的平均频率谱, 从频率上明显看出频谱的连续性, 即混沌的存在。

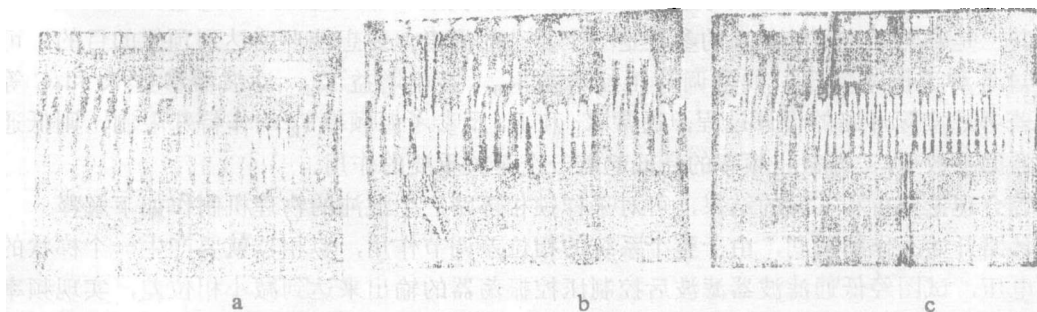


图9 低通滤波器输出电压 $f_R = 520\text{Hz}$, $K_d = 1.5$, $R = 60\text{K}\Omega$

图11给出了压控振荡器输出端的频谱分析结果, 由于压控振荡器输出的是幅度相同

脉宽不等的方波, 因此其平均频谱则表现为集中在某一固定频率各次谐波的左右连续分布, 且连续的特征非常明显。图 12 给出图 11 频谱的细化结果, 更展示了输出信号频谱的宽带连续性。

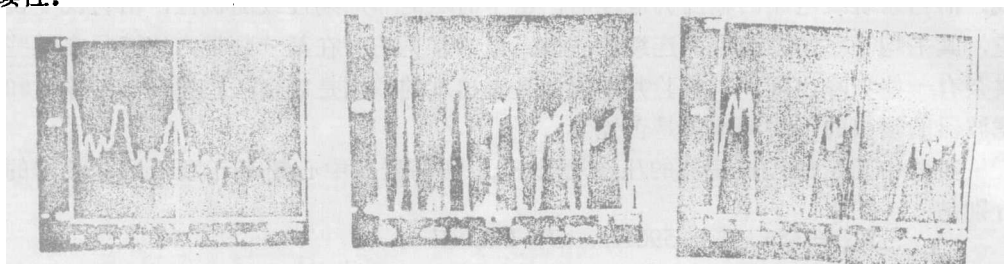


图 10 低通滤波器输出电压平均频率

图 11 压控振荡器输出频谱

图 12 频谱细化结果

4 结果分析及讨论

文献[1]给出了采样锁相环参数与环路输出混沌之间的关系, 其关系重写为:

$$K_H^2(T+a-1)^2 - 4K_H(T+a-1) - K_H(1-a)^2 - 1 > 0 \quad (3)$$

$$2 + \sqrt{5} < K_H(T+a-1) < 3 + 2\sqrt{5} \quad (4)$$

其中: $K_H = K_d K_0$, $T = T_R / RC$, $a = e^{-T}$.

对实验结果中的参数进行整理发现, 大部分产生混沌的低通滤波器参数 R , 鉴相增益 K_d , 采样周期 T_R 均在式(3)和(4)的范围之内。即均与理论分析结果相符。例如 $K_d = 1.5$, $f_R = \frac{1}{T_R} = 520\text{Hz}$, $R = 60\text{K}\Omega$ 就能满足要求。但也有在理论分析结果之外的数

值, 使环路输出混沌。例如, $K_d = 1.5$, $f_R = 520\text{Hz}$, $R = 180\text{K}\Omega$ 即不能满足要求。关于这一点, 计算机模拟结果有类似的结论。即理论分析结果为一个充分条件, 并不能全部包括所有混沌参数。

另一方面, 还可以从实验结果中得到如下启示:

其一是采样锁相环作为一个被认为具有良好性能的系统, 若在设计时不对其各种参数进行统筹考虑, 会使原设计达不到应有的目的。特别是当环路作为倍频环或作为分频环应用于频率合成器中时, 更应该考虑每一个倍频或频次数 N 所对应的环路参数。

其二是影响环路所处状态的参数是一个复杂的因素。要想使环路达到预想的目的, 可以通过各种手段来实现, 如可调节压控增益 K_0 , 鉴相增益 K_d , 滤波器参数 R 和 C 等等。若考虑实际环路的设计过程, 通常 K_d 和 K_0 及参考源频率 f_R 均作特殊限制, 则低通滤波器的参数 R_C , 即截止频率的高低起着至关重要的作用。

综合理论分析和实验的结果, 可对采样锁相环产生混沌的物理机制作如下解释:

环路开始工作的瞬间, 由于整个系统的相位差调节作用, 鉴相器就要产生一个梯状的输出电压, 试图经低通滤波器滤波后控制压控振荡器的输出来达到减小相位差, 实现频率同步即锁定。但由于低通滤波器不能抑制由于采样保持鉴相器输出的频率较高的电压波动。正是由于该波动电压的作用, 导致了频率输出的波动, 反过来又影响鉴相器的输出。

如此反复, 参数共同配合的结果导致采样锁相环处于混沌状态。

5 结 论

- ① 本文从实验的角度验证了文献[1]所证明的采样锁相环系统中混沌现象的存在。
- ② 实验结果与理论分析结果基本吻合。
- ③ 通过对结果的分析给出了设计锁相环系统应遵循的一些原则。
- ④ 给出了完整的实验线路及结果。

参 考 文 献

- (1) 王俊鹏, 高金峰, 黄冬梅. 采样锁相环系统中的混沌行为. 郑州工学院学报. 1989.2
- (2) 郑继禹等. 锁相环路原理与应用. 人民邮电出版社
- (3) 沈雷. CMOS集成电路原理与应用. 光明日报出版社
- (4) 李汾等. 高稳定度可调频率源. 电测与仪表. 1988.1
- (5) P.Berge.etal. Order Within Chaos. JOHN WILEY, 1984

The Laboratory Research of Chaos From Sampled Phase-Locked Loop System

Wang Junkun Gao Jinfeng Huang Dongmei
(Department of Computer and aotomation)

Abstract: In this paper, Experimental circuit and results of sampled phase-locked loop system that exhibit chaotic behavior are given. Experimental results are discussed, we obtained some active conclusions.

Keywords: Chaos, Sampled phase-locked loop, Frequency spectrum