

一种新型通用全数字时钟匀滑技术

秦晓懿, 王瀚晟, 曾烈光

(清华大学电子工程系微波与数字通信技术国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对锁相环在匀滑含有低频大幅度的抖动和漂移的时钟时有诸如同步和捕捉范围很窄、容易失锁等缺点, 提出了一种新的全数字时钟匀滑技术—统计预测法. 其主要思想是用一个周期的统计结果来预测下一个周期的处理值. 从该方法的原理和性能分析可知, 其可有效的匀滑各种抖动和漂移, 抖动积累较小, 同步和捕捉范围很宽, 可以匀滑不同频率的时钟. 另外, 改进的变周期的统计预测法也可使捕捉时间降到合适的长度, 以适用于不同场合.

关键词: 时钟匀滑技术; 抖动; 漂移; 统计预测法

中图分类号: TN913.24, TN914.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 09-1276-04

A Novel Universal All-Digital Clock Smoothness Technique

QIN Xiao-yi, WANG Han-sheng, ZENG Lie-guang

(State Key Laboratory on Microwave & Digital Communication, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As PLLs have some disadvantages such as the narrow synchronizing and pull-in ranges to smooth clocks with low-frequency large-amplitude jitter and wander, this paper presents a novel universal digital clock smoothness technique — the counting prognostication method. The key element of this technique is to use counting results in a cycle to prognosticate numbers in the next cycle. Principles and performance analyses are given to show that it can efficiently smooth jitter and wander, jitter accumulation is small, and the synchronizing and the pull-in range is very wide to smooth different frequencies. In addition, for applications in some special circumstances, the cycle varied counting prognostication method is also presented to diminish the capture time.

Key words: clock smoothness techniques; jitter; wander; counting prognostication

1 引言

传统的时钟匀滑技术一般采用锁相环, 但要滤出频率较低、幅度较大的抖动甚至漂移, 锁相环的带宽需要很窄(如要求小于十分之几 Hz 甚至更小), 此时模拟锁相环的元件尺寸将变得过大而难以实现. 同时, 窄带宽的锁相环其同步范围和捕捉范围常常很小^[1], 在初始情况或非正常情况下容易由于较大的瞬时频差或相差而失锁. 锁相环能匀滑的时钟频率仅在中心频率附近的范围内, 同一设计难于匀滑不同速率. 另外, 锁相环是用输入、输出时钟的相位差来对 VCO 频率进行调整, 当输入时钟抖动较大, 由于输出时钟受到输入时钟的影响, 两者的相位差并不能准确的反映输入时钟的情况, 输入时钟的抖动容易传递到输出时钟上, 从而增加抖动的积累. 本文则提出了一种新的通用时钟匀滑技术—统计预测法. 该方法可有效匀滑各种抖动或漂移, 抖动积累较小, 同步范围和捕捉范围很宽, 可以对不同频率进行匀滑, 并可全数字实现, 便于集成.

2 基本原理

图 1 为统计预测法的原理框图, 图中写时钟是待匀滑的时钟, 读时钟为匀滑后的时钟. 统计周期控制可与写时钟或高

速时钟相关. 周期统计计数通过对一个周期内写时钟或其信息与高速时钟的关系的统计, 预测出下一个周期应扣除的高速时钟脉冲个数(对采用扣除值的电路而言, 一般为电路实现方便, 高速时钟选得比读时钟的 r 倍高, 以避免有增加高速时钟脉冲的操作)或应生成的时钟脉冲个数. 周期统计计数在具体实现时可有多种方案, 例如: (1) 由高速时钟产生与写时钟标称频率相同的固定参考时钟, 周期统计计数模块统计出一个周期内固定参考时钟与写时钟的个数差异来预测时钟扣除值或生成值; (2) 直接对一个周期内的写时钟个数进行统计, 则下一个周期的预测生成值为写时钟个数统计值的 r 倍. 当统计周期足够大时, 可以认为相邻周期内写时钟的情况近似相等, 因此可将前一周期的统计值作为后一周期的预测值. 时钟综合模块则随周期统计计数输出的扣除值或生成值进行对应的扣除操作或生成操作(如图 2 所示). 图中时钟扣除的功能为扣除脉冲上每有一个脉冲, 则扣除高速时钟的一个脉冲. 为得到高质量(低抖动和漂移)的时钟, 通常有两种策略: (1) 使扣除脉冲或生成脉冲的位置尽量均匀分布, 则其最小抖动可为仅由一个高速时钟周期的空缺带来的抖动变化. 若高速时钟约为生成脉冲的 m 倍, 则生成脉冲的抖动约为 $1/m UI$,

收稿日期: 2000-06-07; 修回日期: 2001-01-03

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目 (No. 0239623)

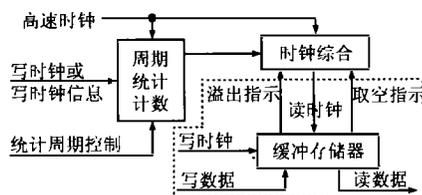


图 1 统计预测法的原理框图

当 m 足够大时,生成脉冲可直接作为匀滑后的读时钟输出(即 $r=1$)。(2)在扣除操作和生成操作后增加 r 分频模块,则可将读时钟的抖动减小为分频前的 $1/r$ 。

在缓冲存储器中,通过比较读时钟与写时钟的相位差来给出相应的溢出或取空指示,以提前或延后读时钟的相位。例如对扣除值而言,溢出指示将控制时钟综合模块,瞬时地减少扣除一个高速时钟脉冲,使读时钟的相位前移 $1/r$ UI;反之,取空指示则瞬时地增加扣除一个高速时钟脉冲。该过程是为了调整缓冲存储器中写数据与读数据之间的初始相对位置,因此只有在初始状态或非正常状态下,才可能送出溢出或取空指示,其它状态下并不发生这个过程^[2]。故其对抖动和漂移的分析不会产生影响。若不需得到与匀滑后时钟同步的数据时,图 1 中虚线框内的部分可以略去。

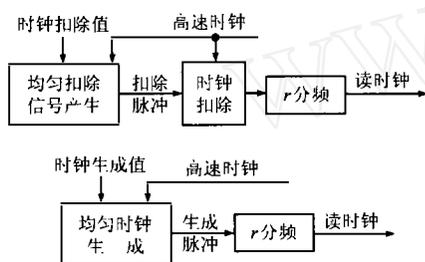


图 2 时钟综合模块的两种具体实现

当周期统计计数模块采用第一种方案时,统计预测法与锁相环结构很相似,但其本质差别在于:锁相环是根据读时钟的相位差异来改变读时钟,用读时钟的相位差作为控制只能使读时钟能跟踪写时钟的变化,若写时钟有短时的较大幅度的跃变,读时钟的相位抖动也容易随之增大,因此并不能很好的抑制抖动和漂移。而统计预测法则根据写时钟与固定参考时钟的频率差异来产生读时钟,其更能如实的反映写时钟的变化,因此抖动积累更小一些。

另外,当要匀滑的时钟频率较高时,高速时钟的频率可能会过高,以致在集成电路中难以实现。此时,可将高速时钟的处理改为对几个频率相同、相位不同的较低频时钟的处理。例如,设高速时钟频率为 f_h ,则改为对频率为 f_h/r ,相位依次落后 $1/r$ UI 的 r 个时钟 $f_0 \sim f_{r-1}$ 进行处理。通过对 r 个时钟的切换,实现对相位的滞后与超前控制,相当于对高速时钟的扣除与增加操作。当将 f_i 切换为 $f_{(i+1) \bmod r}$ ($0 \leq i \leq r-1$) 时,相当于相位滞后 $1/r$ UI;当将 f_i 切换为 $f_{(i-1) \bmod r}$ 时,相当于相位超前 $1/r$ UI;读时钟的抖动仍约为 $1/r$ UI^[3]。

3 性能分析

对时钟信号,抖动和漂移是其性能指标,一般以

10Hz 作为抖动和漂移的界限。由统计预测法匀滑的时钟的抖动主要分为两部分:高频锯齿波与低频起伏。对高速时钟的扣除操作和生成脉冲的产生均将产生高频抖动,其为锯齿波。由原理的描述可知,当时钟综合模块采用扣除值时,高频抖动的幅度为 $1/r$ UI;当采用生成值时,为 $1/(mr)$ UI。设 $k=r$ (采用扣除值)或 mr (采用生成值),则高频锯齿波的频率约为 n_i/T Hz,幅度约为 $1/k$ UI,其中, T 为统计周期, n_i 为第 i 个统计周期的统计值(即扣除值或生成值)。由于各个统计周期的统计值 n_i 之间存在着差别,即 n_i 每个统计周期改变一次,以较低频率变化,因此在高频抖动上还叠加了一个低频起伏。低频起伏近似为三角波,其频率为 $1/(NT)$ Hz, N 为正整数。设 f_i 为读时钟平均频率, f_h 为高速时钟频率, $\Delta\Phi_i$ 为读时钟的低频起伏在第 i 个统计周期内的净增值,则当采用扣除值时 $\Delta\Phi_i = (f_h T - n_{i-1})/r - f_i T$;当采用生成值时, $\Delta\Phi_i = n_{i-1}/r - f_i T$ 。故低频起伏的表达式可写为

$$\Phi_i(t) = \Phi_{i,0} + \Delta\Phi_i \cdot \frac{t - (i-1)T}{T} \quad (1)$$

其中: $(i-1)T \leq t \leq iT$, $\Phi_{i,0} = \Phi_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\Phi_j$, Φ_0 为初始相位差,可设为 0。由于所有统计周期内匀滑的读时钟频率的平均值趋于 f_i ,即 $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^l \frac{f_h T - n_{i-1}}{rT} = f_i$ (采用扣除值)或 $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^l \frac{n_{i-1}}{rT} = f_i$ (采用生成值),令 $\bar{n} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^l n_{i-1}$, $\Delta n_{i-1} = \bar{n} - n_{i-1}$ (采用扣除值)或 $\Delta n_{i-1} = n_{i-1} - \bar{n}$ (采用生成值),则对扣除值或生成值式(1)均可写为

$$\Phi_i(t) = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta n_{j-1}}{r} + \frac{\Delta n_{i-1}}{rT} [t - (i-1)T] \quad (2)$$

其中: $(i-1)T \leq t \leq iT$ 。由式(2)得低频起伏的频谱表达式为

$$\Phi(f) = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\Phi_{i,0} \sin(\pi f T)}{\pi f} e^{-2\pi f (i-1/2) T} + \frac{\Delta n_{i-1}}{4\pi^2 f^2 r T} (1 + 2j\pi f T - e^{2\pi f T}) e^{-2\pi f \cdot iT} \right] \quad (3)$$

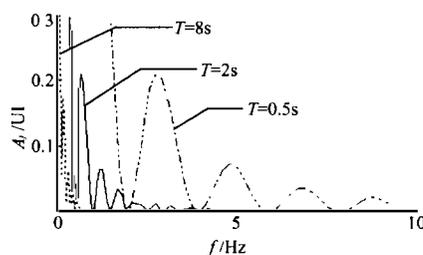


图 3 低频起伏的频谱特性曲线

当统计周期 T 逐渐增大时,写时钟相位的短时跃变对统计值 n_i 的影响逐渐减小,因此 $\Delta n_i/rT$ 逐渐减小,低频抖动最大值 $\Phi_{i,max}$ 也逐渐减小。同时,随着 T 的增大,低频起伏的频率减小,幅度的缓慢起伏表现为低频漂移,由式(3)可知,与抖动有关的高次谐波的幅度随着谐波次数的增加而降低。例如,当统计周期 $T=2s$ 时,低频起伏的最大频率约为 0.25 Hz,其 40 次以上的谐波才在抖动的频率范围内,对应的抖动幅度已很小。图 3 是由式(3)得到的不同 T 值下的低频起伏频谱特

性,此时 $|\Delta n_i| = 9r$, $r = 25$. 可见,随 T 的增大,低频起伏的频谱幅度逐渐变小,频谱分量逐渐向更低频的方向移动. 因此,对写时钟上任意频率和幅度的抖动和漂移,均可找到合适的 T_x ,使当 $T > T_x$ 时,低频起伏给读时钟带来的抖动和漂移可小到忽略不计. 故读时钟的抖动可主要由高频锯齿波决定,约为 $1/k$ UI. 对漂移(变化频率低于 10Hz 的相位变化)来说,则随 T 的不同而不同,因此可通过所要求的指标选取相应的统计周期 T ,实现对漂移的抑制,而不在漂移指标范围内的更低频的漂移则将转化为滑动损伤,构成网络所允许的不可控滑动指标的一部分.

以上并未分析 Δn_i 的变化,下面则通过对写时钟上相位变化的分析对其进行讨论. 影响 Δn_i 的因素有两个方面:(1) 由于每个统计周期的统计值(扣除值或生成值) n_i 只能是整数,而一个周期内平均应扣除或生成的脉冲数 \bar{n} 则很可能不是整数,因此 Δn_i 上包含取整误差 ϵ , $|\epsilon| < 1$. (2) 写时钟上的瞬时相位跃变的影响,对周期的相位跃变通过选取 T 为该周期的倍数便可消除对 Δn_i 的影响,因此只需考虑随机相位变化的影响. 设写时钟上的一个随机瞬时相位跃变为 q_l bits,则将在 Δn_i 上产生 rq_l 的变化. 因此 $|\Delta n_i| < |\epsilon| + \sum_{l=1}^L |rq_l m_l|$, $l = 1, 2, \dots, L$; \sum 表示一个周期内在 \bar{n} 的基础上可能又出现 L 种不同幅度的相位跃变,分别为 m_l 个幅度为 q_l bits 的随机相位跃变. 由此可粗略估计出 Δn_i 的最大变化范围. 更精细的估计可从如下的讨论中得到. 写时钟上的随机相位跃变包括由频差引起和相差引起两种. 定义某种幅度的跃变率 ρ 为平均每秒该幅度跃变的次数, ρ 未必为整数且 $\rho > 0$. 一次幅度为 q bits ($q > 0$) 的跃变产生 q bits 的相位超前,一次幅度为 $-q$ bits ($q > 0$) 的跃变产生 q bits 的相位滞后. 设仅由频差引起的写时钟上的各种幅度跃变的平均跃变率分别为 ρ_l , $l = 1, 2, \dots, L$; 并设 ρ_l 对应的跃变幅度为 q_l bits (q_l 可正可负),即每秒各种幅度跃变分别在写时钟上产生 $q_l \rho_l$ bits 的相位变化. $[iT\rho_l]$ 表示在前 i 个统计周期内幅度为 q_l bits 的跃变出现的次数, $[iT\rho_l] - [(i-1)T\rho_l]$ 即为第 i 个周期内该跃变出现的次数,其中 $[(\cdot)]$ 为取整函数. 因此对写时钟上仅含有由频差引起的相位跃变时, $\Delta n_i = \pm \sum_{l=1}^L r(T q_l \rho_l - q_l ([iT\rho_l] - [(i-1)T\rho_l]))$, $\Phi_{i0} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta n_{i-j}}{r} = \pm \sum_{l=1}^L ((i-2)Tq_l \rho_l - q_l [(i-2)T\rho_l])$, \pm 中的正号对应统计值为生成值的情况,负号则对应扣除值. 将 Φ_{i0} 和 Δn_{i-1} 代入式(2)和式(3),得到由 ρ_l 和 q_l 表示的低频起伏的时域和频域表达式. 故由跃变率可得到仅由频差引起的相位跃变对低频起伏的影响. 实际上,跃变率与频差的概念很相似,其情况较易得到. 而一般说来, Δn_i 中还包含相差引起的随机相位跃变,因此完整的 Δn_i 的表达式为

$$\Delta n_i = \bar{n} - n_i = \pm \left(\sum_{l=1}^L r(T q_l \rho_l - q_l ([iT\rho_l] - [(i-1)T\rho_l])) - \sum_{l=1}^L r q_l m_l \right), \quad (4)$$

其中第二个求和项代表仅由相位差引起的写时钟上的相

位跃变, m_l 表示幅度为 q_l bits 的跃变的个数, \pm 的含义仍如前所述. 由于取整函数已包含了 ϵ 的影响,因此该式中不再出现 ϵ . 由式(4)可得到更为精确的低频起伏的波形和频谱,因此也可对读时钟的抖动和漂移性能有更细致的分析. 周期的统计实际上是分别对不同幅度的跃变次数的周期性采样和取整. 显然,跃变幅度越大,取整带来的对 Δn_i 的影响也越大.

$$\text{MTIE} = \begin{cases} f_1(t), t \in [0, t_1]; \\ f_2(t), t \in [t_1, t_2]; \\ \vdots \\ f_n(t), t \in [t_{n-1}, t_n]; \end{cases}$$

统计周期 T 的选取可通过漂移指标进行如下估计. 漂移通常以最大时间间隔误差(MTIE)来度量,其一般要求如左式表示, t_n 为漂移测量时间. 由业务和网络实际情况依前述对 Δn_i 的分析估计出 Δn_i 的变化范围,得到其在读时钟上产生的最大相位变化值 P_{\max} ,因此 T 可选为满足条件 $tP_{\max}/T \leq \text{MTIE}$ 的值. 定义捕捉时间为从统计写时钟信息开始到读时钟达到稳定的时间,由于经过一个周期的统计后便可得到稳定的读时钟,因此合理的电路设计可使捕捉时间为 T . 另外,从前面的原理描述可知,统计预测法的同步范围和捕捉范围相同,其主要由周期统计计数器的位数决定,因此可以很宽,以匀滑任意频率的时钟.

4 变周期的统计预测法

从以上的性能分析可知,要使匀滑后时钟的抖动和漂移足够小,须增大统计周期 T ,故捕捉时间也会增大. 例如当写时钟丢失后又恢复时,捕捉时间太大会使系统有很长一段时间不能正常工作(如出现误码或抖动非常大等). 因此有些情况下希望既能很快正常工作,又能实现很好的抖动和漂移特性,变统计周期的统计预测法便是较好的解决方法.

当刚开机或检测到信号丢失等异常告警现象而无法得到正确的写时钟时,统计周期 T 设为 T_0 (T_0 可使读时钟达到能容忍的最大指标值),当告警消失后,统计周期开始逐渐变大(一般为电路实现方便,统计周期以 2^a 倍增大,即 $T_i = 2^a T_{i-1}$, a 为正整数),直到变为设定的统计周期最大值 $T_{\max} = T_m = 2^{ma} T_0$. 此时捕捉时间 T_0 可以很小,能很快正常工作. 当然,到时钟具有最小的抖动和漂移性能的时间 T_M 却有所增大,为 $\sum_{i=0}^m 2^{ia} T_0$; 对相同的 T_{\max} , a 越大, T_M 越小.

5 应用于 SDH 芯片的测试结果

SDH 的指针调整会给 E1 支路引入低频、大幅度(8bits)的抖动. 由清华大学研制的 SDH 芯片 MXLO21E1-3 实现 21 个 E1 到 VC4 的映射,其收端的解同步器即采用了该时钟匀滑技术. 其中,周期统计计数模块采用前述的第一种方案,统计周期可有二种选择;时钟综合模块则采用对应于扣除值的实现, $r = 25$. 表 1 为该芯片在 ITU-T 建议 G. 783 的 4 种 TU 指针序列下采用 TEKTRONIX CTS850 SDH 测试仪测得的组合输出抖动,此时的统计周期 T 设为 2^{20} 帧. 其中序列 a 为极性相反的单指针调整,序列 b 为规则单指针调整中加一个双指针,序列 c

为规则单指针调整中缺一个指针,序列 d 为极性相反的双指针. $B1$ (20Hz ~ 100kHz) 和 $B2$ (18kHz 或 700Hz ~ 100kHz) 为 G.783 中规定的测量滤波器, $B0$ 为 10Hz ~ 100kHz, 均按 20dB/10 倍频上升或滚降. 可见, 结果完全满足 G.783 建议.

表 1 组合抖动的测量

指针序列	最大输出抖动峰峰值/UI		
	B0	B1	B2
序列 a	0.030	0.030	0.020
序列 b	0.030	0.030	0.020
序列 c	0.030	0.030	0.020
序列 d	0.030	0.030	0.020

6 结语

统计预测法作为一种通用的时钟匀滑技术, 可以有效的滤出低频、大幅度的抖动或漂移, 且其具有锁相环电路没有的一些优点: 抖动积累更小; 在获得好的性能的同时, 同步和捕捉范围仍然很宽, 可对不同频率的时钟进行匀滑. 另外, 变周期的统计预测法也可使捕捉时间降到合适的长度, 以应用于不同场合.

参考文献:

- [1] 张厥盛, 郑继禹, 方心平. 锁相技术 [M]. 陕西: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [2] 曾烈光. 双自法频率预测恢复收端支路时钟的方法及装置 [P]. 中国专利, 96 1 09748.5. 1996.

- [3] 王瀚晨. 数字复接系统中时钟同步的传送与处理 [D]. 博士学位论文. 北京: 清华大学电子工程系, 1998.

作者简介:



秦晓懿 女. 1974 年 3 月出生于重庆, 1996 年于清华大学电子工程系本科毕业, 同年开始于清华大学电子工程系攻读博士学位. 主要从事 SDH、以太网接入技术的研究与通信系统的集成化设计. 与他人合作设计的 SDH 专用集成电路 MXLO21E1-3 已投入商用.



王瀚晨 男. 1971 年 5 月出生于北京, 分别于 1994 年和 1998 年获得清华大学电子工程系学士学位和博士学位. 主要从事通信网络与光通信系统的研究, 包括数字复接技术中的 PDH、SDH、ATM 系统的研究与大规模集成电路的实现. 目前, 已独立或合作设计实现了多个数字通信专用集成电路.

曾烈光 男. 1947 年 12 月出生于四川南部县. 教授, 博士生导师. 1970 年毕业于清华大学电子工程系, 同年开始任教于清华大学电子工程系. 主要从事通信网络与光通信系统的研究, 包括 PDH、SDH、ATM、接入网系统等研究与大规模专用集成电路的实现. 曾获电子部科技进步和国家发明一、二等奖多项, 专利多项, 及全国青年科学家提名奖.