

一种新的短时间间隔测量方法

王海, 周渭, 刘畅生, 王水平

(西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出了一种基于延迟线技术的短时间间隔测量新方法. 利用延迟链产生均匀延迟的多路参考频率信号, 在由短时间间隔形成的闸门下对其计数, 以计数值的平均数作为参考频率计数值, 降低测量误差 1~2 个数量级. 理论分析表明新方法的短时间间隔测量误差取决于延迟单元延时. 实际测量数据表明, 在参考频率为 200 MHz, 延迟单元延时为 500 ps 时测量误差小于 500 ps, 同等条件下测量精度比脉冲填充法高 10 倍. 相比模拟内差法、时间-电压变换法和游标法等, 新方法实现简单、成本低廉, 具有良好的实用性.

关键词: 时间测量; 延迟线; 闸门时间; 误差分析; 脉冲填充法; FPGA

中图分类号: TM935.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2008)02-0267-05

Novel short time interval measurement method

WANG Hai, ZHOU Wei, LIU Chang-sheng, WANG Shui-sheng

(School of Mechano-electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A new method for short time interval measurement based on the delay line principle is presented. By utilizing a group of delay lines to generate multi-path reference frequency signals delayed uniformly in a reference frequency period, then counting them under the same gate generated by the short time interval, with the average as the count of the reference frequency, the measurement error can be reduced by 1~2 orders of magnitude. Error analysis shows that its accuracy is determined by the delay time of the delay unit. Actual measurement data show that when the reference frequency is 200MHz, the delay time of the delay unit is 500ps, its accuracy is better than 500ps and improved by 10 times compared with the pulse-filling measurement method under the same condition. Compared with the analog interpolating, time-to-voltage conversion and time vernier method, the proposed new method has the characteristic of easy implementation, low cost and high feasibility.

Key Words: time measurement; delay line; gate time; error analysis; pulse-filling method; field programmable gate arrays

短时间间隔测量是时间计量、测试领域的重要研究问题之一, 高精度的测量方法已有基于模拟时间扩展的计数法、基于 AD 变换器的模拟时间-幅度转换法、基于延迟线的时间-数字变换器(TDC)法和基于冲击振荡器的频率游标法等^[1~4], 这些方法都达到了皮秒量级的测量分辨率, 但明显的电路设计复杂度和昂贵的造价限制了其应用. 而普通短时间间隔测量仪器采用脉冲填充法, 成本较低, 但测量误差还在纳秒量级, 已不能满足激光测距、卫星导航定位、粒子飞行探测、频率基准等方面的要求. 针对以上 5 种方法的优缺点, 笔者提出一种基于延迟线技术的短时间间隔测量方法. 由被测短时间间隔产生计数闸门, 利用延迟链将参考频率顺序延迟, 形成参考频率的多路延时信号, 然后在同一计数闸门下对多路信号计数, 将计数值的算术平均值作为参考频率的计数值, 计算得到短时间间隔. 与前四种方法相比, 新方法实现结构简单、成本低廉, 易于大规模推广应用. 与最后一种方法相比, 使短时间间隔测量误差降低了 1~2 个数量级.

收稿日期: 2007-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助(10703004, 60571060)

作者简介: 王海(1976-), 男, 西安电子科技大学讲师, 博士, E-mail: wanghai@mail.xidian.edu.cn.

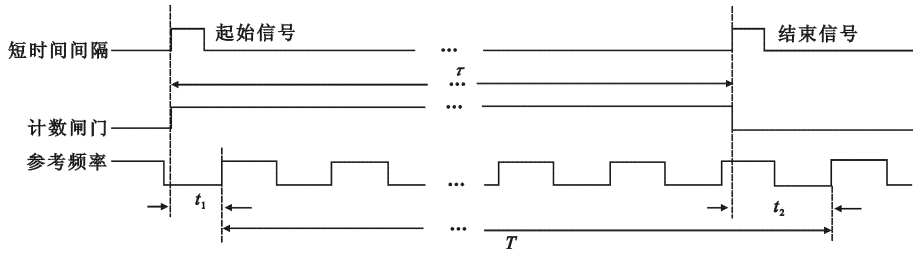


图 1 脉冲填充法的测量原理图

1 脉冲填充法的短时间间隔测量原理

图 1 是脉冲填充法的短时间间隔测量原理图. 计数闸门 τ 同步于短时间间隔 s 的起始和结束信号, 参考频率 f_r 在闸门 τ 上的计数值为 N_r , 短时间间隔 s 的计算公式为

$$s = N_r / f_r \quad (1)$$

由于对 f_r 的实际计数时间是 T 而不是 τ , 因此产生量化误差

$$\Delta s = T - \tau = t_2 - t_1 \quad (2)$$

式中 t_1 和 t_2 是服从在 $[0, 1/f_r)$ 上均匀分布的随机变量, 由此可得测量误差

$$-1/f_r < \Delta s < 1/f_r \quad (3)$$

式(3)忽略了由短时间间隔产生计数闸门时的触发误差和参考频率的时基误差, 原因是触发误差和时基误差与量化误差相比是微小误差. 本文中主要讨论量化误差对短时间间隔测量误差的影响. 由式(3)可知脉冲填充法的测量分辨率为 $1/f_r$, 测量误差为 $1/f_r$, 其精度取决于参考频率 f_r . 由于过高的参考频率会造成电路实现的困难, 一般情况下小于 200 MHz, 因此该方法的测量分辨率和测量误差一般都大于 5 ns.

2 基于延迟线技术的短时间间隔测量方法

基于延迟线技术的短时间间隔测量方法是在脉冲填充法的基础上发展起来的, 其思路是: 利用一个由延迟单元构成的延迟链, 将参考频率顺序延迟 $n-1$ 次, 产生规律性相位顺延的 n 个参考频率信号, 然后在同一计数闸门下对其分别计数, 得到 n 个计数值 $N_{r,i}$, 以它们的算术平均值作为参考频率计数值, 利用式(4)计算短时间间隔. 图 2 是 $n=8$ 时新方法的测量原理图.

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{r,i} / f_r \quad (4)$$

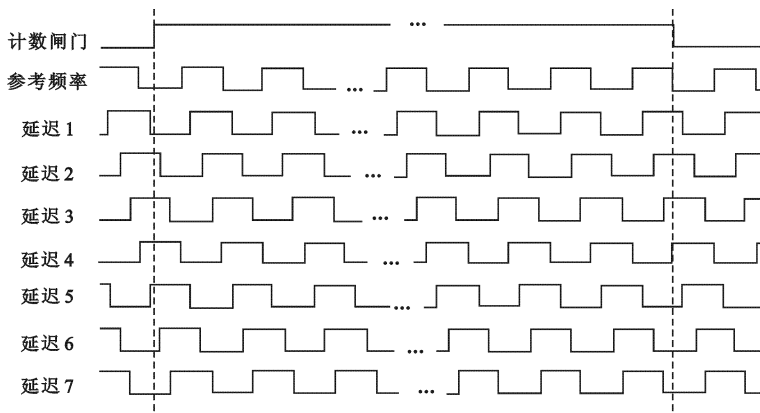


图 2 新方法的测量原理图

图 2 中每一个延迟参考频率信号比前一个信号滞后一个延迟时间, n 次延迟之后, 参考频率刚好延迟了

一个周期. 于是 $n-1$ 延迟后形成的 $n-1$ 个参考频率信号和原来的参考频率信号形成了参考频率信号在一个周期内的均匀移相信号. 图 3 是 $n=8$ 时参考频率信号和延迟频率信号的相位分布图.

为了满足均匀移相的要求, 延迟单元 i 的延迟时间 D_i 要求满足下式:

$$D_i = 1/(nf_r) \quad , \quad i = 1, \dots, n-1 \quad , \quad (5)$$

D_i 为一常数, 记为 D . 由式(4)和式(2)可得新方法的测量误差公式:

$$\Delta s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta s_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{2,i} - t_{1,i}) \quad , \quad (6)$$

式中 Δs_i 为第 $i-1$ 延迟参考频率的量化误差.

设已知 $t_{1,1}, t_{2,1}$, 由式(5)和图 2 可得

$$\begin{cases} t_{1,i} = f \bmod ((t_{1,1} + (i-1)D), 1/f_r) \quad , \\ t_{2,i} = f \bmod ((t_{2,1} + (i-1)D), 1/f_r) \quad . \end{cases} \quad (7)$$

式中 $f \bmod (x, y)$ 是实数求余运算, 返回 x/y 的余数. x, y 和返回值均为零或正实数.

将 $t_{1,i} (i=1, \dots, n)$ 按从小到大顺序排列, 这 n 个数构成公差为 D 的等差数列, 数列的第 1 项(最小项)重新记为 $t_{1,1}$, $t_{1,1}$ 一定满足 $0 \leq t_{1,1} < D$, 于是

$$((n-1)/2)(1/f_r) \leq \sum_{i=1}^n t_{1,i} < ((n+1)/2)(1/f_r) \quad . \quad (8)$$

同理可得 $((n-1)/2)(1/f_r) \leq \sum_{i=1}^n t_{2,i} < ((n+1)/2)(1/f_r)$. 将上式和式(8)带入式(6)可得新方法的测量误差为

$$-1/(nf_r) < \Delta s < 1/(nf_r) \quad . \quad (9)$$

比较式(9)和式(3), 在参考频率相同的情况下, 新方法的短时间间隔测量误差和测量分辨率都是脉冲填充法的 $1/n$, 其测量结果相当于脉冲填充法在其他条件不变的情况下将参考频率值提高 n 倍的测量结果.

值得提出的是, 新方法虽然将 n 次测量的计数值进行平均, 但并不等同于一般的计数平均法. 计数平均法连续或随机取 n 个计数值后平均, 计算得到的短时间间隔值不会有任何测量精度上的提高. 因为 n 次计数过程没有任何相关性, n 次测量的总时间间隔误差会随着测量次数的增加而增加, 不会改善测量误差和测量分辨率. 式(5)是新方法减少测量误差的关键, 是对 n 个延迟单元延迟时间一致性的约束. 实际电路中可产生信号延迟作用的延迟线缆、延迟器件、逻辑门、物理布线等均可作为延迟链的延迟单元^[5~9], 延迟时间不一致误差能够控制在式(9)所确定的测量误差的 $1/100$ 以内, 例如利用 PCB(印刷电路板)铜布线做为延迟单元, 在 EDA 工具软件的帮助下铜布线长度精度可达 2.54×10^{-5} m, 产生的延迟不一致误差小于 1 ps, 不会较大影响新方法的测量分辨率和测量误差.

3 硬件设计

新方法的硬件设计框图由两部分构成, 如图 4 所示.

(1) 延迟计数部分: 对参考频率信号顺序延迟, 并在同一个闸门下分别计数, 然后求和, 最终得到

$\sum_{i=1}^n N_{r,i}$. n 个延迟计数模块顺序串接成流水线结构, 有助于简化设计, 提高时序效率. $f_{r,i}$ 是被延迟 i 次的参考频率信号. S_i 是前 i 次 $N_{r,i}$ 之和, S_0 始终置 0, S_n 是最终计算结果 $\sum_{i=1}^n N_{r,i}$.

(2) 控制部分: 产生计数闸门、计数器的清零信号和使能信号、处理器中断信号. 控制模块根据短时间间隔起始和结束信号产生计数闸门信号, 然后根据计数闸门信号产生计数器使能和清零信号给延迟计数模块,

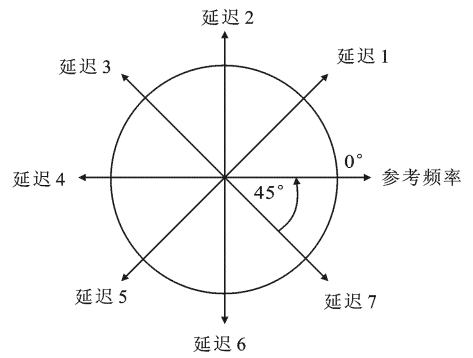


图 3 $n=8$ 时参考和延迟频率信号的相位分布图

计数完成后产生中断信号给微处理器,微处理器读取计数结果 S_n .

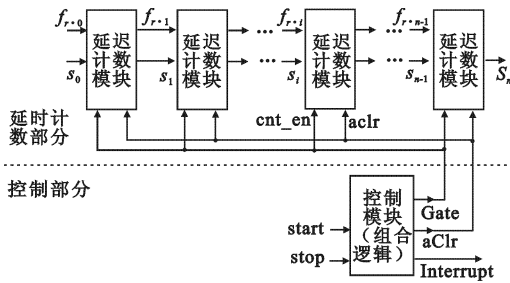


图 4 实际仪器的硬件框图

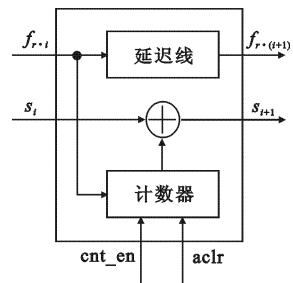


图 5 延迟计数模块详细结构

延迟计数模块详细结构如图 5 所示,参考频率信号一路给延迟单元进行精确延迟,另一路给计数器.计数器在计数使能信号和异步清零信号的控制下计数.计数结果给加法器,实现流水相加.

图 6 是基于新方法设计的短时间间隔测量仪器的设计原理图.新方法的原理性设计在 FPGA 中实现,参考频率信号和短时间间隔的起始/结束信号经过信号调理后进入 FPGA,在 FPGA 中实现短时间间隔测量,然后由处理器将计数结果取出,计算得出短时间间隔测量值.

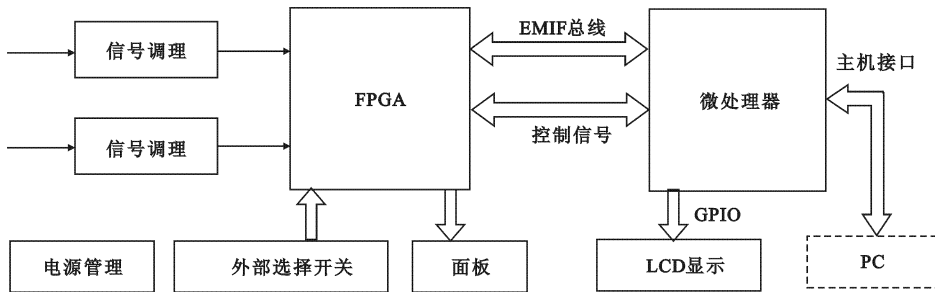


图 6 基于新方法设计的短时间间隔测量仪器构成框图

由图 4 和图 5 可知,虽然新方法比脉冲填充法增加了 $n - 1$ 个计数器, n 个加法器和 n 个延迟单元,在 FPGA 逻辑资源消耗方面有所增加,但增加部分是完全可以接受的.由于增加部分只是模块的简单重复,控制信号没有增加或改变,电路设计复杂度不会增加.

4 验证及结果分析

利用图 6 所描述的系统对文中新方法进行验证,参考频率 $f_r = 200 \text{ MHz}$, $n = 10$, $D = 0.5 \text{ ns}$, 由式(9)知短时间间隔测量分辨率为 500 ps ,最大测量误差为 500 ps .在 FPGA 中通过计数器和参考频率产生一系列的短时间间隔,分别用 HP5370B 和新方法测量,表 1 给出了 HP5370B 和新方法单次实际测量结果的比对.从表中可以看出,实际测量结果和理论分析相符.

表 1 HP5370B 和新方法的测量结果的比对

(ps)

HP5370B	110 254	60 932	10 198	250 602	1 476 005 912	599 780 211
新方法	110 500	61 000	10 500	250 500	1 476 005 500	599 780 500

5 结 论

笔者提出并实现了一种基于延迟线技术的短时间间隔测量方法,具有测量误差小、实现简单的优点.根据该方法研制的仪器的实测结果表明该仪器测量分辨率为 500 ps ,最大测量误差为 500 ps .由于该方法的测量分辨率和测量误差取决于延迟单元的延迟时间,降低延迟时间可以使测量精度进一步提高.理论分析和实际测试表明该方法满足当前大多数短时间间隔测量的要求.

参考文献:

- [1] 周渭, 王海. 时频测控技术的发展 [J]. 时间频率学报, 2003, 26(2): 87-95.
Zhou Wei, Wang Hai. Development of the easurement and Control Technique in Time and Frequency[J]. Journal of time and Frequency, 2003, 26(2): 87-95.
- [2] 《计量测试技术手册》编委会. 计量测试技术手册第 11 卷时间频率 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1996: 145-148.
Editorial Committee of Handbook of Measurement Technology. Handbook of Measurement echnology's Volume Eleven: Time and Frequency[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1996: 145-148.
- [3] Zhou Wei, Xuan Zongqiang, Yu Jianguo, et al. Some New Method for Precision Time Interval Measurement [C]// Proceedings of the 1997 IEEE International Frequency Control Symposium. New York: IEEE, 1997: 418-421.
- [4] Matta K, Kostamovaara J. A high-precision Time-to-digital Converter for Pulsed Time-of-flight Laser Radar Applications [J]. IEEE Trans on Instrum. Meas, 1998, 47(20): 521-536.
- [5] Ryszard S, Jozef K. Interpolating Time Counter with 100ps Resolution on a Single FPGA Device [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(4): 879-882.
- [6] Jozef K, Ryszard S, Ryszard P, et al. Single-Chip Interpolating Time Counter with 200-ps Resolution and 43-s Range [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(4): 851-856.
- [7] Jozef K, Ryszard S, Jerzy P, et al. Field-Programmable-Gate-Array-Based Time-to-Digital Converter with 200-ps Resolution [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(1): 51-55.
- [8] Dudek P, Szczepanski S, Hatfield J V. A High-Resolution CMOS Time-to-digital Converter Utilizing a Vernier Delay Line [J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2000, 35(2): 240-247.
- [9] Rahkonen T E, Kostamovaara J T. The Use of Stabilized CMOS Delaylines for the Digitization of Short Time Intervals [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 1993, 28(8): 887-893.

(编辑: 高西全)

(上接第 261 页)

参考文献:

- [1] Okubo K, Priye V. A New Magnetostatic Wave Delay Line Using YIG Film [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1997, 33(3): 2338-2341.
- [2] Fetisov Y K, Kabos P. Active Magnetostatic Wave Delay Line [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1998, 34(1): 259-271.
- [3] Smith W R, Gerard H M. Design of Surface Wave Delay Lines with Interdigital Transducers [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1969, 17(11): 865-873.
- [4] Xu J, Lu Z, Zhang X C. Compact Involute Optical Delay Line [J]. Electronics Letters, 2004, 40(19): 1218-1219.
- [5] Chen L, Zhu Q, Xu S. Delay Lines Based on Left-Handed Transmission Line Structure [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(10): 1998-2001.
- [6] Caloz C, Itoh T. Application of the Transmission Line Theory of Left-Handed (LH) Materials to the Realization of a Microstrip 'LH Line' [J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002, 2(16-21): 412-415.
- [7] 张鹏飞, 龚书喜. 新型宽频带小型化环形电桥 [J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(4): 593-597.
Zhang P F, Gong S X. New Compact Enhanced-bandwidth Hybrid Ring [J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(4): 593-597.
- [8] Zhu Q, Zhan J, Xu S J. Realization of Quasi Uniform Left-Handed Medium Based on LH Transmission Line [J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004, 4(20-25): 3796-3799.

(编辑: 齐淑娟)