

文章编号 1004-924X(2009)05-1046-05

脉冲激光测距中高精度时间间隔的测量

宋建辉,袁 峰,丁振良

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:考虑时间间隔测量对脉冲激光测距系统的意义,提出了一种新的高精度时间间隔测量方法。该方法在现场可编程门阵列(FPGA)中实现了脉冲计数法、多相采样法和延迟链法的结合。采用脉冲计数法对被测时间间隔进行“粗值”测量,保证大的动态测量范围。利用 FPGA 内部锁相环产生 N 路同频率,相位均匀分布的时钟信号作为计数时钟,基于等精度测频原理,将被测时间间隔的测时分辨率提高到 T_{clk}/N 。利用 FlipFlop 锁存器形成延时链,对被测信号与相邻计数时钟的时间间隔进一步量化。该方法解决了传统多相采样技术中由于倍频次数高导致相移分辨率降低的问题,在不增加计数时钟和有限延迟链数量的前提下,得到较高测时分辨率。测试结果表明,该时间间隔测量模块的动态测量范围为 $163.8 \mu\text{s}$,测时过程相对较短,当进行多次重复测量时,测量的标准误差在 71 ps 以内,基本满足实际应用的精度要求。

关键词:激光测距;时间间隔测量;多相采样;延迟链

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A

High precision time interval measurement in pulsed laser ranging

SONG Jian-hui, YUAN Feng, DING Zhen-liang

(*Department of Automatic Testing and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: The high accuracy time interval measurement is a key technique to a pulsed laser ranging. In this paper, a new high precision time interval measurement method combining with a pulse counting method, a multi-phase sampling and a delay method is proposed to use in the multi-level time interval measurement in a Field Programming Gate Array(FPGA). The pulse counting method is used to realize the coarse counter to guarantee a large dynamic range, and a Phase Locked Loop(PLL) in the FPGA is used to generate the N clock pulses with the same frequency and uniform distribution phase as counting clocks. Based on the equal precision frequency measuring, the resolution of the time conversion is improved to T_{clk}/N . Moreover, a latch Flip Flops is used to form a delay chain to measure the fine time interval. Experiments show that the proposed method has solved the problem of the traditional multi-phase sampling approach, to which phase shift resolution is decreased with the frequency increasing, so that the fine resolution can be obtained by limiting delay lines and no increase of counting clocks. The test results show that the maximum measuring time of the module is $163.8 \mu\text{s}$, the conversion time is short and the standard error of the measurement is less than 71 ps when repeated measurements are carried out, which can satisfy the requirements of higher precision systems.

Key words: laser ranging; time interval measurement; multi-phase sampling; delay line

收稿日期:2008-07-28;修订日期:2008-09-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50275040)

1 引言

脉冲激光测距具有测距精度高、测量速度快、重复频率高等优点^[1-2],在现代军事及航空航天等领域具有非常广泛的应用,时间间隔的测量精度对激光测距系统有着重要的决定作用^[3]。脉冲计数法是高分辨测时最简单、有效的方法,这种方法具有测量范围大、线性好的优点,但是测时分辨率较低。模拟内插法如时间幅度转化法^[4]和双扩展内插法^[5]可以实现高分辨率,但测量过程耗时较长,且易受系统噪声影响。多相采样技术利用 N 路同频率,相位均匀分布的时钟信号作为计数时钟,结合等精度测频的原理,可以实现在不增加测量转换时间的前提下,将测量分辨率提高到参考时钟 T_{clk} 的 $1/N$,但该方法在 FPGA 中实现较高倍频时会导致相移分辨率的降低,无法实现较高的精度^[6]。延迟链法可以实现对微小时间间隔的测量,测量过程耗时相对较短,适用于连续测量^[7-8],缺点是随着测量分辨率的提高,要求延迟线长度越来越短,当测量较大时间间隔时,延迟线数量将大大增加。

针对以上几种方法的优缺点,本文提出了一种将脉冲计数法、多相采样法和延迟链法相结合的时间间隔测量方法。该方法可以在 FPGA 中实现,具有动态测量范围大,测量过程耗时相对较短,以及测时精度较高的优点。

2 脉冲激光测距原理

脉冲激光测距系统通过脉冲激光器向被测目标发射脉冲宽度极窄的光脉冲,当光脉冲到达被测目标表面后部分能量被反射,根据测量光脉冲从发射到返回接收机的时间 t ,可以计算出测距机与待测目标之间的距离。其测距公式为:

$$L = ct/2, \quad (1)$$

式中, L 为目标距离, c 为光速。根据式(1)可以得到脉冲测距精度 ΔL 为:

$$\Delta L = c\Delta t/2. \quad (2)$$

由式(2)可知,在光速一定的情况下,时间间隔的测量精度直接影响着激光测距系统的测距精度。因此,实现高精度时间间隔测量成为脉冲激光测距的关键。

3 时间间隔测量原理

如图1所示,异步信号 Start 与 Stop 之间的时间间隔 T_x 可以表示为整数部分 T_{12} 和非整数部分 T_1, T_2 。并且有以下关系式:

$$T_x = T_1 + T_{12} - T_2. \quad (3)$$

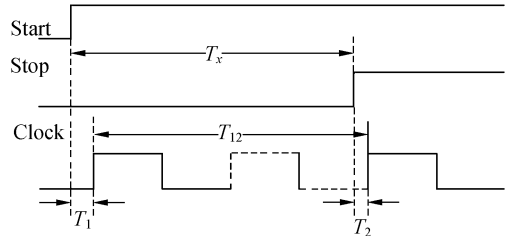


图1 测时时序图

Fig. 1 Timing diagram of conversion

整数部分 T_{12} 由参考时钟 T_{clk} 通过脉冲计数法测得。高精度时间间隔测量的关键在于非整数部分 T_1, T_2 。本文采用多相采样技术分别对 T_1, T_2 继续测量,将分辨率提高到 T_{clk}/N ,然后将被测信号与相邻计数时钟的时间间隔通过延迟链法进一步量化,结构如图2所示。

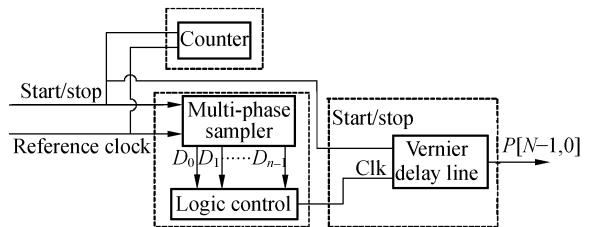


图2 原理图

Fig. 2 Schematic diagram

多相采样器结构图如图3所示,通过FPGA内部相移时钟,得到与参考时钟信号同频的 $N-1$ 个计数时钟信号,然后在同一计数闸门下对多个计数时钟计数,相当于在两个连续的参考时钟上升沿内插入 $N-1$ 个同频且相位均匀分布的时钟脉冲,实现将脉冲周期 T_{clk} 细分为 N 等份,每份相当于1个脉冲,其周期为

$$t_f = T_{\text{clk}}/N. \quad (4)$$

以信号 Start 为例,此时 Start 与相邻参考时钟 clk_0 之间的时间间隔 T_1 被分成整数部分 t_1 和非整数部分 t_a 。如图4所示。

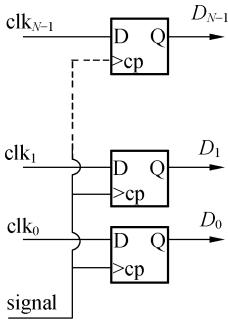


图 3 多相采样器结构

Fig. 3 Architecture of multi-phase sampler

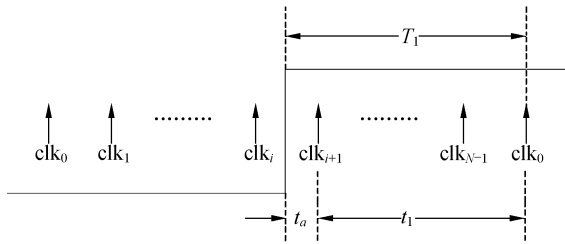


图 4 多相采样时序图

Fig. 4 Time diagram of multi-phase sampler

为了得到相邻计数时钟与 Start 的关系,用 Start 上升沿采样计数时钟 $clk_0 \cdots clk_{N-1}$, $D_0, D_1 \cdots D_{N-1}$ 是 N 个两位计数器,当 Start 信号上升沿位于 clk_i 与 clk_{i+1} 之间时,采样结果 D_i 为逻辑 '1', D_{i+1} 为逻辑 '0', S_i 为逻辑 '1', t_a 为 Start 与相邻计数时钟 clk_{i+1} 之间的时间间隔,输入到下一级的 Clk' 是 clk_{i+1} 在 Start 后的第一个时钟上升沿经整形得到。逻辑控制图如图 5 所示。此时 Start 与相邻 clk_0 之间的时间间隔的整数部分

$$t_1 = (N - i - 1) \cdot t_f = (N - i - 1) \cdot T / N \quad (5)$$

同样的过程也被应用在测量 Stop 与相邻计数时钟 clk_0 上升沿之间的时间间隔 T_2 。

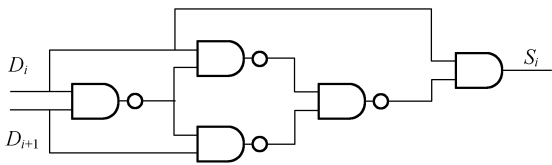


图 5 逻辑控制

Fig. 5 Logic control

Start 与 Clk' 间时间间隔由延迟链进一步量化,如图 6 所示,本文利用 FPGA 中 FlipFlop 锁存器来形成基本逻辑延迟单元,时间测量分辨率由锁存器的延迟时间决定。

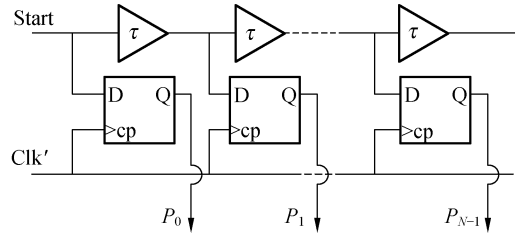


图 6 游标延迟线

Fig. 6 Vernier delay line

4 测量转换时间分析

测量转换时间 T_M 由脉冲计数时间 T_{pulse} 、多相采样时间 $T_{multi-phase}$ 、逻辑控制时间 T_{logic} 、延迟链测量时间 T_{delay} 几部分组成。由于多相采样测时与脉冲计数同时进行,因此多相采样时间可以忽略。与脉冲计数时间相比,逻辑控制时间和延迟链测量时间都很小,也可以忽略不计。此时,测量转换时间 T_M 为

$$T_M = T_{pulse} + T_{multi-phase} + T_{logic} + T_{delay} = kT_{clk} + T_{logic} + t_f = kT_{clk} + T_{logic} + T_{clk} / N \approx kT_{clk} \quad (6)$$

式中, k 为参考时钟计量个数,与被测时间间隔成线性比例。由式(6)可知,本文提出的时间间隔测量方法与基本脉冲计数法相比并没有增加测量转换时间。

5 测试结果及分析

由于计数器的频率受到 FPGA 的限制,只能实现几百 MHz,本文将 100 MHz 参考时钟通过 FPGA 内部锁相环 4 倍频后得到 400 MHz 系统时钟。采用 16 位二进制计数器,最大时间测量范围为 $163.8 \mu s$ 。

选择 4 路相移时钟,此时测时分辨率提高到 625 ps。为了确定测时模块的最小测时分辨率,需要对 FPGA 中 FlipFlop 锁存器延时时间进行标定。改变系统时钟周期,同时从输出的编码信

息获得实际使用的锁存器进位连线的级数,利用两个不同系统时钟 T_1, T_2 下实际使用的锁存器进位连线的级数 N_1, N_2 可以按下式估算出最小时间测量单元^[9]。

$$LSB = \frac{T_2 - T_1}{N_2 - N_1} \quad (7)$$

本文在测试中首先设置系统时钟为 100 MHz,实际使用的进位连线级数为 93,然后改变系统时钟频率为 90 MHz,实际使用的进位连线级数为 104,估算出最小时间测量单元为:

$$LSB = \frac{1/90 - 1/100}{104 - 93} = 102 \text{ ps} \quad (8)$$

由于经多相采样后,测时分辨率已经由原来的 2 500 ps 提高到 625 ps,FlipFlop 锁存器进位链的总延时需要大于或者等于上一级多相采样的等效计数时钟周期,因此,本文采用 7 级 FlipFlop 锁存器构成延迟链。

由于本时间间隔测量模块为脉冲激光测距系统中的一部分,因此通过脉冲激光测距系统对本模块进行标定。在目标距离为 1 m 到 100 m 内,抽取 10 个标准距离,对每个给定距离进行 1 000 次测量,测试结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,在有效测量范围内,本模块测时分辨率最高可达 102 ps,当进行多次重复测量时,测量的标准误差基本都在 71 ps 以内。

参考文献:

- [1] 岱钦,宋文武,王希军. 高频半导体激光器的驱动设计及稳定性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 745-748.
DAI Q, SONG W W, WANG X J. Design and stability analysis of high frequency LD's driving circuit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 745-748. (in Chinese)
- [2] 李松,周辉,石岩,等. 激光测高仪的回波信号理论模型[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 33-39.
LI S, ZHOU H, SHI Y, et al.. Theoretical model for return signal of laser altimeter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 33-39. (in Chinese)
- [3] 吴刚,李春来,刘银年,等. 脉冲激光测距系统中高精度时间间隔测量模块的研究[J]. 红外与毫米波学

表 1 模块对给定距离的测试结果

Tab. 1 Testing and statistical results for standard distance

Object distances(m)	Maximum results(ns)	Minimum results(ns)	Average results(ns)	Standard errors(ns)
1.532	10.306	10.102	10.208	0.061
11.524	76.875	76.760	76.795	0.057
25.654	171.033	170.931	171.984	0.067
33.475	223.227	223.125	223.170	0.071
46.731	311.556	311.454	311.493	0.069
54.582	363.954	363.852	363.889	0.054
67.684	451.237	451.135	451.192	0.063
75.214	501.454	501.352	501.401	0.060
86.548	577.079	576.977	577.017	0.069
92.435	616.237	616.135	616.188	0.070

6 结 论

将脉冲计数法、多相采样法和延迟链法相结合,本文提出的混合时间间隔测量方法,由脉冲计数法保证大的动态测量范围,通过多相采样提高测时分辨率,由延迟链进行微小时间测量。与传统的时间间隔测量方法相比,该方法可以在 FPGA 中实现,易于扩展,集成度高,稳定性好。测试结果表明,该时间间隔测量模块动态测量范围为 163.8 μs ,测时过程相对较短,当进行多次重复测量时,测量的标准误差在 71 ps 以内,不但可以应用在脉冲激光测距系统中,也可以应用于其他高精度时间间隔测量系统。

报, 2007, 26(3): 213-216.

WU G, LI CH L, LIU Y N, et al.. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system[J]. *J. Infrared Milim. Waves*, 2007, 26(3): 213-216. (in Chinese)

- [4] STEVENS A E, VAN BERG R P, VAN DER SPIEGEL J, et al.. Time-to-voltage converter and analog memory for colliding beam detectors[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1989, 24(6): 1748-1752.

- [5] HSIAO M J, HUANG J R, CHANG T Y. A built-in parametric timing measurement unit[J]. *IEEE Design and Test of Computers*, 2004, 21(4): 322-330.

- [6] 黄震,刘彬. 脉冲激光测距中时间间隔测量的新方法[J]. 光电子·激光, 2006, 17(9): 1153-1155.

HUAN ZH, LIU B. New method to measure the

time-of-flight in pulse laser ranging[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, 17(9): 1153-1155. (in Chinese)

- [7] HWANG CH S, CHEN P, TSAO H W. A high-precision time-to-digital converter using a two-level conversion scheme[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(4): 1349-1352.
- [8] DUDEK P, SZCZEPANSKI S, HATFIELD J V. High-resolution CMOS time-to-digital converter uti-

lizing a vernier delay line[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2000, 35(2): 240-247.

- [9] 安琪. 粒子物理实验中的精密时间间隔测量[J]. 核技术, 2006, 35(2): 204-207.
- AN Q. Review of methods and techniques of precise time interval measurements for particle physics experiments[J]. *Nuclear Techniques*, 2006, 35(2): 204-207. (in Chinese)

作者简介:



宋建辉(1981—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2004年于哈尔滨工业大学获学士学位,2004年至今于哈尔滨工业大学硕博连读,主要从事光电检测技术的研究。E-mail: hitsong@126.com



丁振良(1942—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1964年于哈尔滨工业大学获学士学位,现为哈尔滨工业大学博士生导师,主要从事自动化测试与精密计量、传感器与传感系统、精密测量精度理论等方面的研究。E-mail: dingch@hit.edu.cn

导师简介:



袁峰(1963—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,分别于1985、1988、1995年在哈尔滨工业大学获学士、硕士、博士学位,现为哈尔滨工业大学博士生导师,主要从事光电检测技术及精密几何参数测量技术等方面的研究。E-mail: yuanf@hit.edu.cn

●下期预告

利用声表面波实现液体的二维驱动

高 阳, 李以贵, 张俊峰

(上海交通大学 微纳科学技术研究院 教育部薄膜加工重点实验室, 上海 200240)

报道了利用声表面波实现水滴的二维驱动。在 127.8°Y 切向 X 方向传播的铌酸锂衬底上制作了 4 个叉指换能器。每个叉指换能器由 10 对电极构成, 叉指周期为 $400\ \mu\text{m}$, 宽度为 $100\ \mu\text{m}$, 孔径为 $12\ \text{mm}$, 整个器件的尺寸为 $26\ \text{mm} \times 26\ \text{mm} \times 0.45\ \text{mm}$ 。由于铌酸锂晶体的各向异性, 叉指换能器沿 Y 、 X 方向的谐振频率是不同的, 分别为 $9.3\ \text{MHz}$ 和 $9.6\ \text{MHz}$ 。论证了铜材料相对于铝材料的优点, 并在制造过程中选用了铜作为电极材料。电极的制造采用了剥离工艺, 得到了优化的工艺参数, 采用了超长时间超声波辅助方法实现残胶的彻底去除。实现了对水滴的二维驱动, 输入功率为 $9\ \text{W}$, 液滴运动的平均速率为 $5\ \text{mm/s}$ 。利用 ANSYS 软件分析了声表面波在铌酸锂衬底内的传播, 内部振动的模拟结果与理论情况一致。实验表明, 利用声表面波实现液体的二维驱动是可行的, 这种液体驱动原型将在片上系统和 $\mu\text{-TAS}$ 具有广阔的应用前景。