

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0361-04

# 激光测高系统中飞行时间皮秒级精度的实现

赵欣, 李季, 陈结祥, 赵平建, 戚俊, 涂碧海

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要** 激光测高仪通过测量激光脉冲的飞行时间来获得测高仪与探测目标之间的距离, 因此激光飞行时间测量的准确性是衡量其系统能力的根本指标。提出以延迟锁相环(DLL)配合双延时线矩阵结构, 再结合计数器的全数字方法来实现飞行时间的精密测量, 测量结构在单片可编程门阵列(FPGA)中实现, 其测距精度可达 250 ps,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内延时线漂移不超过  $\pm 30\text{ ps}$ 。同时也对激光发射和接收电路作了具体讨论, 可有力地提高飞行时间的测量精度。该测高系统成型后, 由于电路集成度高, 功耗小, 重量轻, 系统稳定性强, 达到激光测高要求。

**关键词** 激光技术; 激光测距; 飞行时间; 延时线; 可编程门阵列

**中图分类号** TN958.98

**文献标识码** A

## Time of Flight Measurements with Picoseconds Resolution in Laser Altimetry

ZHAO Xin, LI Ji, CHEN Jie-xiang, ZHAO Ping-jian, QI Jun, TU Bi-hai

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** A pulsed time-of-flight laser radar operates by transmitting a short laser pulse to an optical visible target and detecting the reflected pulse by an optical detector. The measured distance is calculated from this flight time. So the accuracy of laser time interval is a basic beacon to measure its system capability. By using two tapped differential delay lines working in a matrix mode with delay locked loop (DLL), together with counter, high precision measurement in flight time is realized in an entire digital way with all measurement construction located in a single field programmable gate array (FPGA). The single-shot precision of the time digital converter (TDC) is better than 250 ps, the drifts of TDC units remain within  $\pm 30\text{ ps}$  over a temperature range  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The concrete design of transmit and receive circuits is discussed to improve the accuracy of the TDC. Because of the high integration, low power, light weight and stable performance the prototype reaches the request of the laser altimeter.

**Key words** laser techniques; laser range-finding; time of flight; delay chain; field programmable gate array

### 1 引言

激光测高仪是用安装在飞行平台上的激光器以固定频率向探测空间发射激光脉冲, 激光光束穿越大气或真空后经目标散射产生后向散射回波, 被测高仪上的望远镜所接收, 通过光电探测器将激光脉冲转换成电脉冲回波。通过分析该电脉冲回波的飞行时间(TOF)计算出测高仪与探测目标之间的距离。因此飞行时间测量的精密性直接关系到测高仪对地形和海洋等轮廓重建的准确性。传统的飞行时间间隔测量是在飞行时间中插入固定的时钟计数得到计数值, 再转换成距离值。但因计数时钟的频率不高, 导致测距精度较低。主要采用两种内插方法提高测距精度: 一是纳特(Nutt)法, 即基于双电容的模拟延展法; 二是延时线法, 即一种全数字的延展法, 它可以直接把时间间隔转化为数字量(TDC)。

模拟延展法的精度虽然可达皮秒量级, 但因其非线性以及易受外部环境温度干扰, 转换时间长, 集成度低, 功耗体积大而受到限制。本文讨论的数字延时链法受环境温度影响要比模拟法小得多, 尤其是转换时间快, 功耗小, 动态范围大, 并可基于单片可编程门阵列(FPGA)实现, 达到了低成本, 开发简便、周期短的目的, 因此非常适合本测高系统的要求。

### 2 飞行时间测量原理

飞行时间法<sup>[1,2]</sup>是以 START 和 STOP 信号来启动和停止一个具有固定参考时钟的计数器进行计数来获得飞行时间, 即被测距离的, 因此提高参考时钟就可以提高测距精度, 但要达到毫米量级以上的精度, 需要上吉赫的时钟。这对一般的电路设计是不现实的, 因此需要用其他方法来提高测距精度。

**作者简介:** 赵欣(1979—), 男, 安徽合肥人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事激光测距测高技术的研究。E-mail: zhaoxin79@163.com

分析激光飞行时间和计数器的时序如图 1 所示,需要测量的时间间隔  $T$  可被分成 3 部分,总的飞行时间  $T$  可表达为

$$T = N_c T_0 + T_1 - T_2, \quad (1)$$

第一部分( $N_c T_0$ )是以参考时钟  $T_0$  进行计数得到的,这一部分属于精确计时; $T_1$  和  $T_2$  两部分是由于 START 和 STOP 信号和参考时钟不同步而造成的时间间隔。由于它们都小于一个时钟周期,而不被计数器所分辨出来,因此用计数法来得到光脉冲的飞行时间正是受制于  $T_1$  和  $T_2$  的不可测量而影响精度。如果能提取出  $T_1$  和  $T_2$ ,采用一种标尺测出其时间量,将大大减小误差,提高测时的分辨率。

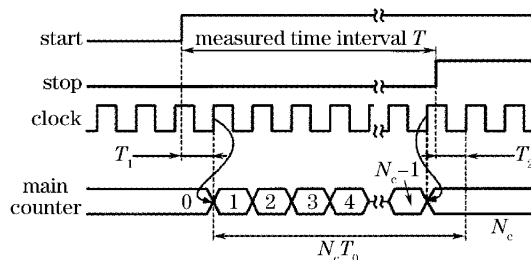


图 1 内插法测量飞行时间的原理

Fig. 1 Interpolation method for precise measurement of flight time intervals

### 3 基于延时链的飞行时间测量法

#### 3.1 延时链法原理

延时链法是使信号在固定级联的延时单元上传输产生距离码的,当 START 信号和 STOP 信号非同步进入延时线时,经过每一个延迟单元可产生一个完全相同的  $\tau_1$  延时,输出经过 D 触发器翻转就可以得到对应距离值的码值。因此只要对(1)式中的  $T_1$  和  $T_2$  采取延时链来测量,再加上中间的主计数值,就可以得到精确的飞行时间的值。

#### 3.2 时间间隔测量单元的改进及其在可编程门阵列中的实现

因为延时链的精度直接由缓冲器所产生的延时  $\tau$  所决定,因此首先应该对硬件实现平台,即可编程门阵列进行严格选型。选择标准应为其内部触发器的建立和保持时间应该足够短,内部门电路的传输足够快。在比较各种可编程门阵列的结构之后,选择了 Cyclone II 可编程门阵列器件,其内部触发器的翻转时间从时钟的上跳沿到输出最差也有 0.5 ns,且其内部逻辑 LCELL 的延时可固定在 250 ps 左右,完全适合延时单元设计的要求。

选择的是 100 MHz 的外部参考计数晶振,对应

动态范围为  $T_{\text{clk}} = 10$  ns,至少需要 40~50 个左右的延时单元,则延时链的长度可确定为  $2^6 = 64$  个延时单元,输出的逻辑值可转换为 6 比特的值。以差分延时链结构结合矩阵,配合延时锁相环(DLL)来实现延时链的时间间隔测量方法,其精度由  $\tau_1 - \tau_2$  ( $\tau_1 > \tau_2$ )来定义。因此比单链延迟理论上能够提高一个数量级。图 2 为在可编程门阵列内部差分延时单元的门级逻辑结构, $\tau_1$  和  $\tau_2$  的延时路径已经在图 2 中表明,每个延时链由一个延时  $\tau_1$  的内部逻辑和延时  $\tau_2$  的锁存器构成( $\tau_1 < \tau_2$ ),形成了双延时链结构,每级延时单元可产生一个复位信号对其前级延时单元进行清零,产生连续的测量。当然也要求复位信号可进行异步全局清零。由于要保证每个延时单元的严格等时性,因此必须进行手动布线来约束延时单元的布局,当然延时路径根据不同的设计要求是可以随时手动更改的。但在手动布线确定每个延时单元之后,必须进行逻辑锁定和反标,把延时路径固化进可编程门阵列,以防止硬件烧写时,布线路径产生漂移。

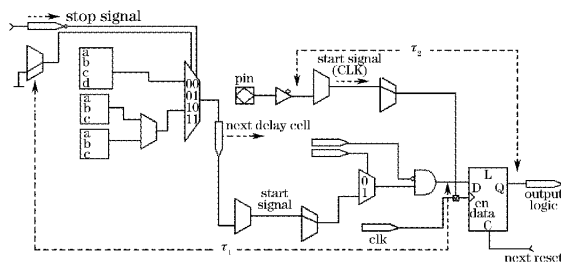


图 2 可编程门阵列内部双延时链结构

Fig. 2 Two tapped delay lines working in a differential mode in FPGA

在确定了单条延时链在可编程门阵列中的具体结构之后,把  $N$  条延时链并联在一块,如图 3 所示。

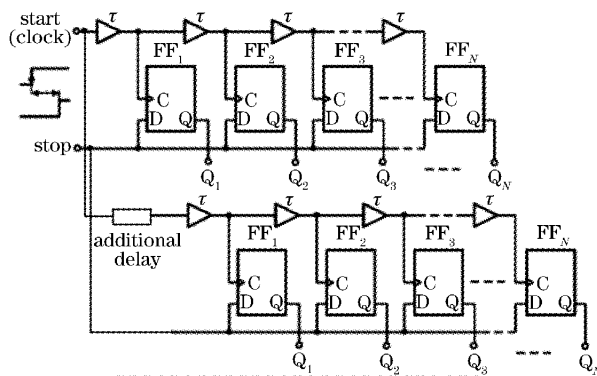


图 3 改善的并行延时链法

Fig. 3 A modified parallel series delay chain array for time interval measurement

其每级延时链比前级多出一可知的固定延时,这样每测时一次,可产生  $N$  个结果,通过取平均的方法,可进一步提高精度,减小了因可编程门阵列内部的位置不同而造成延时链在其中的延时差别。在选取延时矩阵的列数时可根据可编程门阵列逻辑资源和测时动态范围来选取,最大数不要超过  $N = T_{clk}/d$ , 其中  $T_{clk}$  为外部参考时钟周期,  $d$  为每级延时链额外延时的大小。

由于整个测时是基于门延时技术的,因此外部温度和供给电压对延时链的延时常数有较大影响,特别在恶劣环境中需要单独的电路来稳定延时单元。设计了一个延时锁相环可调控锁定可编程门阵列的输入电压,以达到稳定内部延时链的延时常数,不受外部温度和供给电压变化影响的目的。设计结构如图 4 所示,其中延时线的延时时间为外部参考时钟  $T_{clk}$ ,即动态范围 10 ns,由单链直接构成。 $T_{clk}$  分两路输入,一路通过固定 10 ns 的延时线进入相位比较器,另一路直接进入相位比较器,相位比较器由两个 D 触发器和与门构成;假设由于温度或者电压的变化,则相位比较器就会输出两路时钟产生的相位差,通过环路滤波和放大对可编程门阵列的电压进行调控,环路滤波和放大用放大器、数模转换器(DA)和射随即可实现,需要注意的是控制的电压端为可编程门阵列的核心电压而非 I/O 电压。

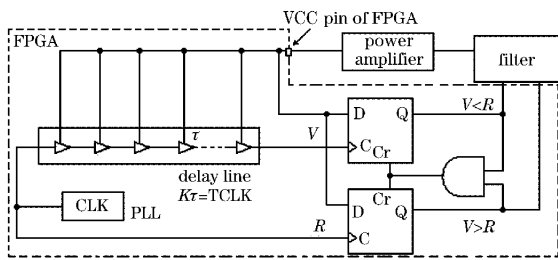


图 4 可编程门阵列中的延时锁相环

Fig. 4 Block diagram of delay-locked loop in FPGA

根据(1)式,  $T_1$  和  $T_2$  都要采用延时线进行精确测量,为了保证测高系统中多组距离测量值的切换快速和精确,采用双延时通道分别对  $T_1$  和  $T_2$  进行单独测量,这样既避免了信号之间的互相干扰,又提高了实时性;而针对  $N_c T_0$  的大距离我们采用了格雷码计数器代替二进制计数器,因为格雷码任意两个相邻码之间只有一位不同,这一特点可以减少码在形成、变换和传输时引起的错误,使计数错误限制在一个比特(最低有效位)范围内。因测时电路是以计数方式进行的,所以参考时钟的稳定直接关系到

测时的准确,而 Cyclone II 内部集成了锁相环(PLL),可直接对外部晶振输入锁定,使得时钟的抖动沿小于 15 ps。图 5 是最后综合的完整的可编程门阵列内部测时的结构图<sup>[3~6]</sup>,所有的飞行时间测量电路从图中可以看出已完全整合进单片可编程门阵列中,后续只要借助单片机或者和计算机接口进行计算就可以显示出测量距离。

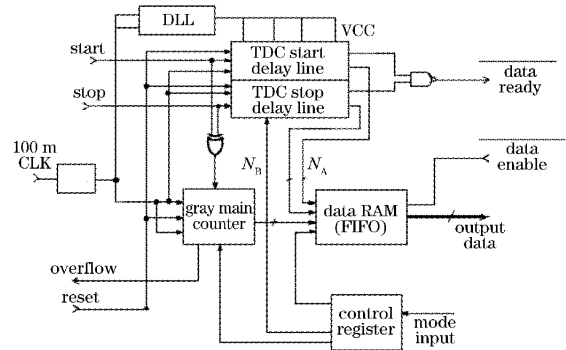


图 5 延时链和计数器相结合的时间间隔测量结构

Fig. 5 Block diagram of time interval measurement structure combining the time counter with delay chain

### 4 实验结果及讨论

对该电路进行测试,使用安捷伦(Agilent)信号发生器产生 4 个固定脉宽的方波,分为 50~3000 ns 四个间隔,模拟测高的时序特征,一路直接进入可编程门阵列作为 START 信号,另一路通过一个反相

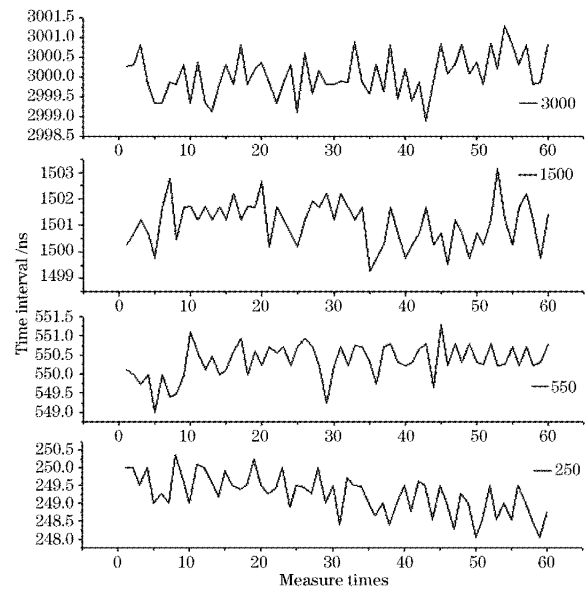


图 6 时间间隔为 250 ps, 550 ps, 1500 ps, 3000 ps 的测量变化

Fig. 6 Random error of the measured time interval in 250 ps, 550 ps, 1500 ps, 3000 ps

器翻转,则本来是下降沿的后沿成为上升沿进入可编程门阵列作为 STOP 信号,随后通过计算机接口读出数值。如图 6 所示,横坐标为测量次数,纵坐标中心刻度为对应脉宽,测量结果围绕中心值偏差不超过 500 ps,标准偏差不超过 0.31。随后安放在测高系统中进行实际测量,采用消光法来模拟实测距离,测量目标为设置在靶场的漫反射板,距离测高仪 1350 m 左右,激光波长为 1064 nm,激光重复频率为 20 Hz,测量数据取衰减片为 40 dB 下的距离测量,数据如图 7 所示。图中横坐标为 2000 次测量次数,纵坐标为测量距离,从数据看出距离分辨率基本落在 $\pm 2$  m 以内。如果采用精度更高的延时单元,或者在后续数据处理上采用滤波平均的方法,都可以进一步提高精度。

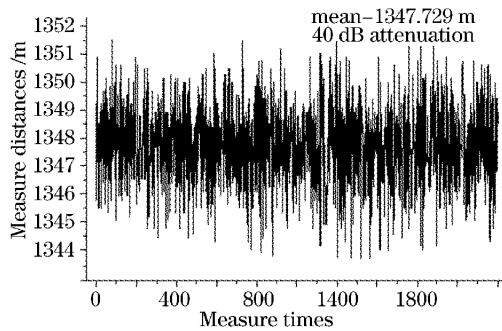


图 7 20 Hz, 40 dB 下测高仪的测量结果

Fig. 7 Measured results with 40dB attenuation under 20 Hz single-shot laser frequencies

## 5 结 论

本测高系统在采用研制的 TDC 模块后,不但飞行时间测量的精度得到很大提高,系统结构也紧凑了很多,功耗和体积都有所降低,稳定性增强,控制也很简便。在实际应用中,除了时间间隔测量单元对测距精度有重要影响外,激光峰值功率的稳定性,光学接受单元,确定起止时刻的时间鉴别单元等都非常关键;考虑外部因素,如大气环境、目标物形状与反射率对测高也有影响,因此要提高测高精度需各方面配合,这也是我们进一步完善测高系统的研究方向。

## 参 考 文 献

- 1 Ronald Nutt. Digital time intervalometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, **39**(9): 1342~1345
- 2 Józef Kalisz. Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution [J]. *Metrologia*, 2004, **41**: 17~32
- 3 J. Kalisz, R. Pelka, A. Poniecki. Precision time counter for laser ranging to satellites [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, **65**(3): 736~741
- 4 Józef Kalisz, Ryszard Szplet, R. Pelka *et al.*. Single-chip interpolating time counter with 200-ps resolution and 43-s range [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1997, **46**(4): 851~856
- 5 Jonathan Rose, Aabas E. L. Gamal, Alberto Sangiovanni-Vincentelli. Architecture of field-programmable gate arrays [J]. *Proc. IEEE*, 1993, **81**(7): 1013~1029
- 6 Kari Matta, Juha Kostamovaara. A high-precision time-to-digital converter for pulsed time-of-flight laser radar applications [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1998, **47**(2): 521~536