

文章编号: 0258-7025(2008)05-0752-04

# 激光测高仪中基于现场可编程门阵列的高精度飞行时间测量

姚萍萍 赵欣 张毅 赵平建 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** 设计了在激光测高系统中基于单芯片现场可编程门阵列(FPGA)的高精度时间间隔测量模块。该模块采用高频计数器实现粗时间测量,差分延时线内插技术完成细时间测量,时间分辨率为300 ps。该芯片同时还集成了时序切割电路、回波脉宽测量和数据传输模块等。在环境温度20 ℃时对该测量模块进行精度测试,获得标准偏差为94.68 ps,转换成距离为1.42 cm。最后通过地面检测,整个系统在500 km范围内的一般条件下可获得测高精度±50 cm。

**关键词** 测量;激光测高仪;细时间测量;现场可编程门阵列;差分延时线

**中图分类号** TN 958.98 **文献标识码** A

## High-Resolution Measurement of Flight Time for Laser Altimeter Based on Field Programmable Gate Array

Yao Pingping Zhao Xin Zhang Yi Zhao Pingjian Tu Bihai

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

**Abstract** A high-resolution flight time measurement system based on a single field programmable gate array (FPGA) in laser altimeter is designed. The time resolution of 300 ps is obtained, because the differential delay lines are used to perform interpolation and to realize the fine time measurement, and high frequency counter is designed to perform the coarse time measurement. The time splitting circuit, pulse width counter and data transmitter module are integrated in the same chip. At an ambient temperature of 20 ℃, we achieve a standard deviation of 94.68 ps which equals to 1.42 cm in distance. Furthermore, detection on the ground verifies the feasibility of measuring distance with ±50 cm resolution over 500 km ranges under general conditions.

**Key words** measurement; laser altimeter; fine time measurement; field programmable gate array; differential delay lines

### 1 引言

激光测高仪<sup>[1,2]</sup>可看作一种激光雷达,一般搭载在空基上,可通过测量激光脉冲的飞行时间来获得测高仪和探测目标之间的距离,其测高精度主要取决于发射激光脉冲半宽、光电探测器的信噪比、回波脉冲被展宽程度和飞行时间测量精度,其中飞行时间测量精度对激光测高仪的测高精度起重要作用。目前在测高上时间间隔测量方法主要有三种<sup>[3]</sup>:高频计数法、模拟内插法、数字内插法,其中数

字内插法<sup>[4,5]</sup>因具有高测量精度、宽动态范围而获得广泛应用。

本文在改进激光测高仪电子学系统的基础上,选用 ALTERA 公司的 Cyclone 系列现场可编程门阵列(FPGA),采用差分延时线<sup>[6,7]</sup>完成时间内插实现时间数字转换器(time digital converter, TDC)功能。现场可编程门阵列将测高系统的电子学处理部分集成在单一芯片<sup>[8,9]</sup>上,大大减少了系统的体积、功耗和重量,为激光测高精度的提高和测高仪的长

收稿日期:2007-08-20;收到修改稿日期:2007-11-09

作者简介:姚萍萍(1985—),女,安徽人,硕士研究生,主要从事星载激光测高仪方面的研究。E-mail:ppyao@aiofm.ac.cn

导师简介:张毅(1955—),男,安徽人,研究员,主要从事光电子技术和计算机控制方面的研究。

E-mail: yzhang@aiofm.ac.cn

时间稳定工作提供了有利的保障。

### 2 飞行时间测量电路

图 1 为基于现场可编程门阵列设计的时间间隔测量模块结构框图。考虑到激光测高仪<sup>[10,11]</sup>大范围、高精度、高稳定性的要求,本系统采用高频计数法(粗测)和延时线内插法(精测)相结合,即通过参

考时钟驱动高频计数器进行长距离测量,对起始脉冲和停止脉冲出现的不足一个时钟周期的部分,采用差分延时线内插来获取高分辨率,延时线的精度即为整个测量电路的精度。它采用双延时链工作在差分模式下(图 2(a)),每个延时因子包括缓冲器(buffer,B)和触发器 D,由许多相同的延时单元级联而成。

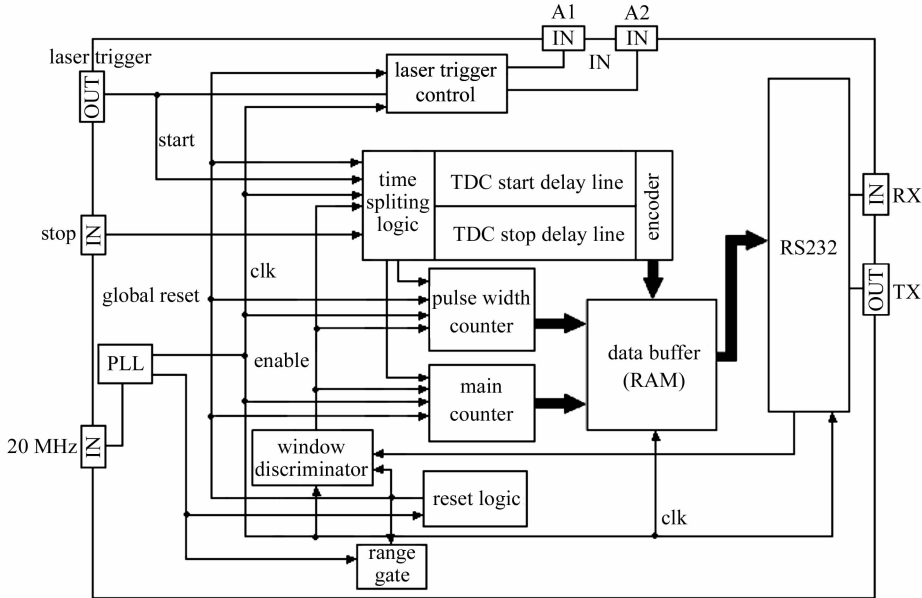


图 1 时间间隔测量模块结构框图

Fig. 1 Internal structure diagram of measurement time interval in FPGA

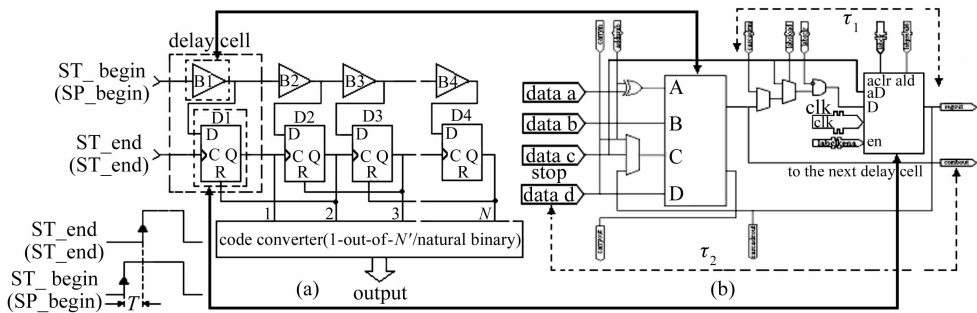


图 2 差分延时线(a)和逻辑内部结构(b)

Fig. 2 Differential delay line (a) and inner structure of logic element (b)

#### 2.1 细时间测量

现场可编程门阵列内部拥有大量的逻辑资源,并集成锁相环(PLL)、块状的嵌入式逻辑阵列(EAB)和众多性能优良的宏功能模块,在其中实现计数器十分方便,工作频率可高达几百兆赫兹,其内部寄存器建立保持时间足够短,只有几十皮秒,逻辑门电路传输延时低至几百皮秒,非常适合实现高精度时间数字转换器。且选用 Cyclone 系列器件是基于静态随机存储器(SRAM)的可编程查找表

(LUT)逻辑形成结构,内部由众多矩阵式逻辑阵列(LAB)组成,每个逻辑阵列由 10 个逻辑单元(LE),如图 2(b)所示,其中 D 触发器组成第一条延时线,延时  $\tau_1$ ;四输入的可编程查找表构成延时单元中的缓冲器,组成第二条延时线,延时  $\tau_2$  ( $\tau_1 < \tau_2$ ),当 C 端输入从低到高先于 D 端相同的变化,Q 端的输出为高,这样在第一条延时线上进行编码得到内插值,  $\tau_2 - \tau_1$  即为延时线的量化步长最小时间测量单元(LSB)和时间测量模块的分辨率。

由于要保证每个延时单元的严格等时性,在现场可编程门阵列内部物理层进行手动布线约束每个延时单元的布局,定位在不同的逻辑阵列,各单元的延时时间也不一样,经过大量的底层布线,发现将所有延时单元固定在三个相邻的逻辑阵列中可得到最短延时300 ps。手动布线之后必须进行逻辑锁定和反标,将延时路径固化在指定的逻辑区域内,当其他模块调用延时模块时可继承经过优化的布局布线结果,同时防止硬件烧写时产生路径漂移。实际应用中选择20 MHz晶振通过锁相环8倍频到160 MHz,作为计数器时钟输入,每个延时单元延时300 ps,则需要22个延时单元,此外每条延时链的开始和结尾部分还需要一些额外的延时单元作为非线性校正和温度补偿用,故延时链长度  $N$  定为31。

## 2.2 时序切割电路和数据传输

由图1知激光发射信号开始和回波信号停止先进入时序切割电路,如图3所示,将未满一个时钟周期的部分切割出来交由开始延时线和停止延时线进行测量。为了校正因光路和电路而产生的距离漂移误差设计了内校正光路,故回波信号有两个,分别是光纤信号和目标回波信号,主计数器会产生两个计数值,时序切割电路切割出三个内插值;同时脉宽测量电路对两个回波信号宽度进行测量,因此可得到待测的飞行时间为

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{opt}} &= (N_2 \Delta t + T_0 - T_2) - \\ & (N_1 \Delta t + T_0 - T_1) - \tau_1 + \tau_2 = \\ & \Delta t (N_2 - N_1) + T_1 - T_2 - \tau_1 + \tau_2, \end{aligned}$$

式中  $N_1 \Delta t$  和  $N_2 \Delta t$  分别为光纤信号和目标回波信号的主计数值,  $\Delta t$  为主计数时钟的周期,本文取6.25 ns;  $\tau_1$  为光纤信号的脉冲宽度,  $\tau_2$  为目标回波信号的脉冲宽度;  $T_0$  为开始信号交由时序切割电路切割出的内插值,  $T_1$  为光纤信号交由时序切割电路切割出的内插值,  $T_2$  为目标回波信号交由时序切割电路切割出的内插值。将产生的测距值经计算和组合后,储存进随机存储器(RAM)中,通过RS232模

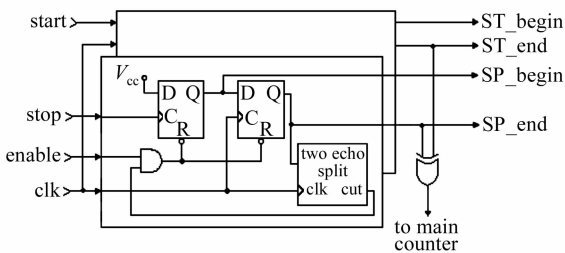


图3 时序切割电路

Fig. 3 Time splitting circuit

块发送到上位机储存起来。为了避免激光脉冲产生时夹带的调Q干扰,设计了距离门模块在估计回波信号到来之前打开测距模块,在测量完毕之后关闭测距模块,上位机也可以通过RS232模块发送命令对其实时调节。

## 3 测量结果与讨论

选用ALTEAR公司Cyclone系列的EP1C6Q器件来实现时间间隔测量电路,设计软件是Quartus 6.0。当周围环境温度为20℃时采用码密度测试方法对两条延时线的微分非线性和积分非线性进行测试,结果如图4所示。最大微分非线性误差为0.956LSB或286 ps(1个LSB代表最小时间测量单元300 ps),最大积分非线性误差为1.27LSB或381 ps。为了验证整个测量电路精确度和工作稳定性,采用高频复杂可编程逻辑器件板产生开始信号,经过固定延迟的同轴电缆延迟后作为停止信号送入现场可编程门阵列中进行测量,测得时间值通过串口发送到上位机中。整个系统工作频率设为20 Hz,图4(c)为半个小时连续测量数据的柱状图,可知测量结果十分稳定,时间值基本保持上下偏差很小,时间间隔平均值为3.89547 ns,标准偏差为94.68 ps。

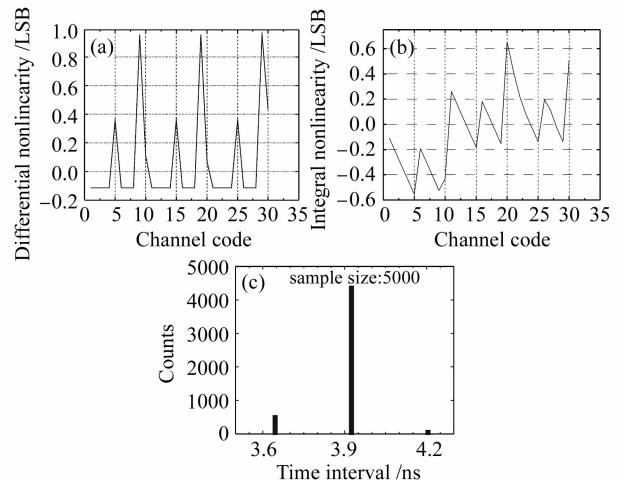


图4 停止延时线非线性误差。(a) 微分非线性; (b) 积分非线性; (c) 时间间隔精度测试

Fig. 4 Nonlinearity error of STOP delay line. (a) differential nonlinearity; (b) integral nonlinearity; (c) constant time interval resolution

由图4(a), (b)看出延时线的微分非线性和积分非线性存在周期性,这是由选用的现场可编程门阵列器件结构决定的。对于EP1C6Q器件系列一个逻辑阵列内部10个逻辑单元之间的延时比较均

匀,但相邻两个逻辑阵列之间的转接有额外连线延时,导致延时因子的不一致性,这个不一致性正是以 10 为一个周期,这种周期性是不可避免的。为了获得更好的时间间隔测量精度,可在后端数据处理中利用测得的非线性结果对时间数字转换器中每个最小时间间隔测量单元进行校准,矫正方法有平均法(LSB 取最大值和最小值的平均)和矢量法,这种处理方式灵活,没有额外的硬件成本,但处理速度慢;也可以选用速度更快的 CycloneII 系列现场可编程门阵列,延时线采用两极内插结构提高时间分辨率,这也是进一步完善飞行时间测量模块的研究方向。

## 4 结 论

研制了基于现场可编程门阵列激光测高系统中的飞行时间测量模块,将该测量模块应用于激光测高仪中进行实际检测,在空气能见度较好条件下可获得 $\pm 50$  cm 测距精度。与传统的采用专用时间数字转换器芯片测量飞行时间相比,不仅测距精度得到很大提高,整个测量逻辑根据需求被设计于单芯片系统中,不需要其他多余的电路,且可灵活修改;同时还完成其他控制逻辑,如激光触发控制、距离门、回波脉宽测量和数据传输等,进一步缩小体积和功耗;而且现场可编程门阵列本身 1.5 V 的低功耗给激光测高仪长时间稳定工作提供了有利的保障。

## 参 考 文 献

1 D. Timothy. Cole. NEAR laser rangefinder: A tool for the

- mapping and topologic study of asteroid 433 eros [J]. *Johns Hopkins Appl. Technical Digest*, 1998, **19**(2):142~157
- 2 J. B. Abhire, X. Sun, R. S. Afzal. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15):2449~2460
- 3 Huo Yujin, Chen Qiansong, Pan Zhiwen. Review on time-of-flight measurement of pulsed laser radar [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(3):136~139
- 霍玉晶,陈千颂,潘志文. 脉冲激光雷达的时间间隔测量综述 [J]. *激光与红外*, 2001, **31**(3):136~139
- 4 J. Kailisz. Review of methods for time interval measurements with picoseconds resolution [J]. *Metrologia*, 2004, **41**:17~32
- 5 R. Nutt. Digital time intervalometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, **39**(9):1342~1345
- 6 J. Kalisz, R. Szplet, R. Pełka *et al.*. Single-chip low-cost time counter for distance measurements with 3 cm resolution [J]. *J. Opt.*, 1998, **29**(3):199~205
- 7 J. Kalisz, R. Szplet, R. Pełka *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
- 8 Chen Qiansong, Zhao Dalong, Yang Chenwei *et al.*. Study on self-triggering pulsed time-of-flight laser range finding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):745~748
- 陈千颂,赵大龙,杨成伟 等. 自触发脉冲飞行时间激光测距技术研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):745~748
- 9 Qin Laigui, Huo Yujing, He Shufang. Study on pulsed laser range finder based on digital polarity correlation algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):941~944
- 秦来贵,霍玉晶,何淑芳. 基于数字极性相关算法的激光脉冲测距 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):941~944
- 10 Zhao Dong, Liu Liren, Wang Jiming *et al.*. A laser ranging method based on photon statistics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1091~1096
- 赵 栋,刘立人,王吉明 等. 基于光子数目比较的激光测距法 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1091~1096
- 11 Jixin Chen, Zhan Sui, Fushen Chen *et al.*. Output characteristic of Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser at different temperatures [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3):173~174