

文章编号: 1672-8785(2014)04-0018-07

基于恒比定时鉴别的激光雷达 时间测量前沿技术研究

许万鹏^{1,2} 黄庚华¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 通过 FPGA 设计了基于恒比定时时刻鉴别直接实现机载激光雷达时间测量系统的方案。详细阐述了时刻鉴别尤其是恒比定时时刻鉴别的原理及性能特点, 对传统恒比定时时刻鉴别误差进行了估算, 并设计了恒比定时时刻鉴别的简易电路。最后给出了通过抽头延迟线法实现机载激光雷达时间测量的初步方案, 对后期提高该时间测量系统的精度提出了改进意见。

关键词: 机载激光雷达; 恒比定时; 时间测量; 抽头延迟线法

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.04.004

Research on Advanced Technology of Time Measurement for LIDAR Based on Constant-fraction Discrimination

XU Wan-peng^{1,2}, HUANG Geng-hua¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A time measurement system for an airborne LIDAR based on constant-fraction discrimination is designed by using FPGA. The principle and characteristics of time discrimination, especially of constant-fraction discrimination are described in detail. The error of the traditional constant-fraction discrimination is estimated and a simple circuit for constant-fraction discrimination is designed. Finally, a preliminary scheme for implementing time measurement for a LIDAR by using a tapped delay line method is given. Some suggestions on the improvement of the time measurement system in accuracy are made.

Key words: airborne LIDAR; constant-fraction discrimination; time measurement; tapped delay line method

0 引言

国内的机载激光雷达起源于 20 世纪 80 年代, 目前多采用半导体激光器进行脉冲激光测距。机载激光雷达具有使用寿命长、重复频率高、可靠性好、成本低和体积小等优点。脉冲激

光测距技术属于直接探测方式^[1], 它利用激光器对目标发射一窄激光脉冲, 测量它到达目标后再由目标折回至接收机的往返时间, 然后根据光速和该往返时间计算出目标到接收机的距离。假设空气中光速为 c , 激光的往返时间为 t , 那

收稿日期: 2014-03-24

作者简介: 许万鹏 (1989-), 男, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为机载激光雷达高分辨率多回波信息获取技术。E-mail: lgqtdzb@gmail.com

么目标距离 R 则为

$$R = \frac{1}{2}ct \quad (1)$$

目前国外高精度成像激光雷达的精度一般在 0.1 m 左右。为使国内研究也达到这一水平, 根据式 (1) 可知, 总体的时间测量误差要小于 0.67 ns。而总体的误差主要包含两方面, 即时间间隔测量误差和时刻鉴别误差。为了使测距精度达到 0.1 m, 必须使时间间隔测量误差与时刻鉴别误差之和小于 0.67 ns。因此, 时刻鉴别显得尤为重要。

1 时刻鉴别常用方法概述

由于受到目标散射特性以及大气传输等因素的影响, 接收到的激光脉冲和发射的激光脉冲在形状和幅度上会有很大的不同。这给我们准确地确定起止时刻增加了困难, 由此引起的误差是漂移误差。另外, 由于输入噪声会引起时间抖动, 这也会给测量造成误差。如何通过设计高精度的时刻鉴别单元达到有效抑制漂移误差以及时间抖动, 便成为脉冲激光测距的重要研究方向之一。目前时刻鉴别方法主要包括前沿时刻鉴别、恒比定时时刻鉴别以及高通容阻时刻鉴别 [2]。

1.1 前沿时刻鉴别法

前沿时刻鉴别法如图 1 所示, 通过固定阈值的方式确定时间的起止时刻 [3], 即以脉冲前沿的幅度等于所设阈值的时刻作为起止时刻。由

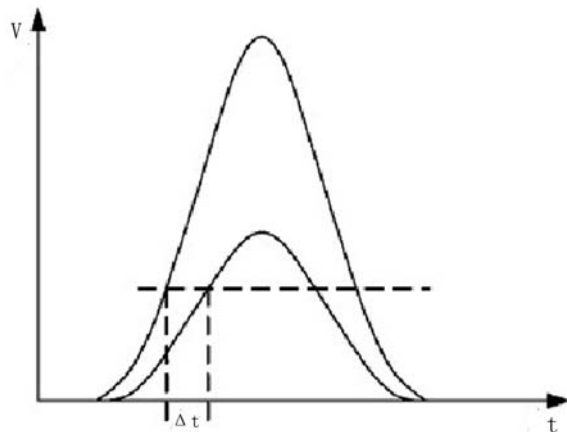


图 1 前沿时刻鉴别的示意图

脉冲形状和幅度的变化引起的漂移误差为 Δt , 它的大小与阈值的大小有关, 最大值可能接近脉冲的上升时间。

1.2 恒比定时时刻鉴别法

恒比定时时刻鉴别法的示意图如图 2 所示。触发比取为 50%, 即以脉冲上升到半高点的时刻作为时间的起止时刻。此时, 如不考虑噪声和波形畸变等因素带来的影响, 那么由于幅度变化所引起的误差就为 0。由此可见, 恒比定时时刻鉴别法可以有效消除由于脉冲幅度变化所引起的误差。

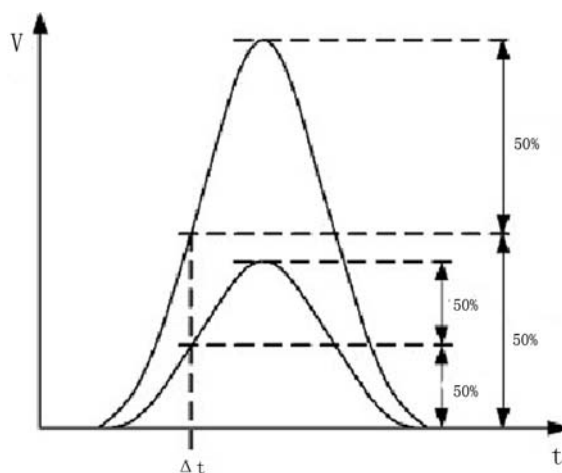
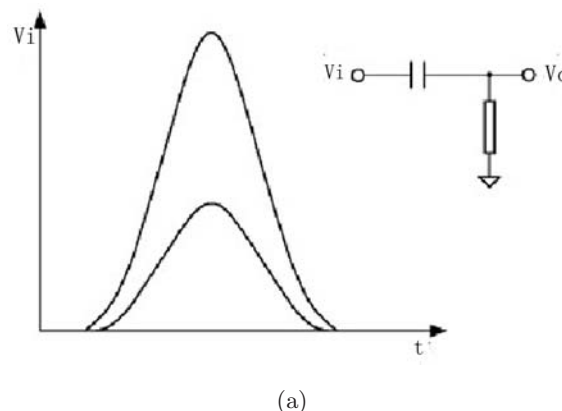


图 2 恒比定时时刻鉴别的示意图

1.3 高通容阻时刻鉴别法

高通容阻鉴别法如图 3 所示。接收机放大电路输出信号脉冲 (V_i), 信号脉冲通过高通容阻滤波后变为双极性信号 (V_o), 原先的极值点转变成零点。用它作起止时刻时, 由于幅度变化所带来的误差是 0, 它的误差所受到的影响主要来自信号脉冲在其极大值附近的斜率。



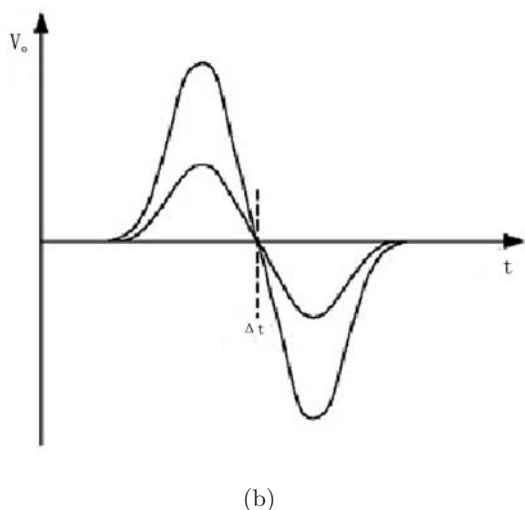


图 3 高通容阻鉴别的示意图

由于受半导体驱动电源性能的限制, 目前半导体脉冲激光器所输出的激光的脉宽至少为 4~10 ns, 上升沿则为 2~5 ns。如果采用前沿时刻鉴别法, 则时刻鉴别的误差大于 2 ns, 不能满足系统测距精度的要求^[4]。从原理上来看, 虽然恒比定时时刻鉴别与高通容阻时刻鉴别都能达到纳秒以下的精度, 但是由于实验室半导体脉冲激光器的驱动电源的输出电流脉冲的上升沿短于下降沿, 而且斜率在极大值的附近变化很慢, 所以选用恒比定时鉴别法较为合适。

2 恒比定时鉴别法的原理及实现

2.1 恒比定时时刻鉴别的原理

恒比定时时刻鉴别根据信号幅度动态调整阈值电平大小, 因而可避免信号幅度变化引起的时间漂移。恒比定时器 (CFD) 利用比较器的差分输入, 在输入脉冲和延迟脉冲差分的基线位置, 也就是过零点进行触发^[5], 如图 4 所示。

理论上, 基线交叉点的时间位置与脉冲幅度无关。实际上, 由于鉴别器的固有延迟与信号的斜率速度以及过冲量有关, 因此还会产生残余抖动。通过将触发阈值选在略微偏离零值的位置, 可以将这种抖动减至最小。

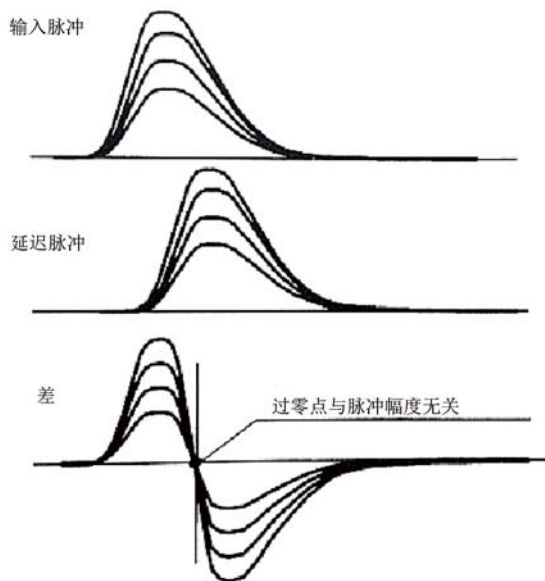


图 4 恒比 (过零) 触发

实际上, 要在信号水平正好为零值时实现直接触发是不可能的。超快速的鉴别器往往会在零值输入电压附近振荡, 而光电倍增管以外任何小的噪声振幅脉冲都会导致鉴别器的触发。因此, 在实际应用过程中需要把上升沿鉴别器和过零触发器相结合, 原理如图 5 所示。

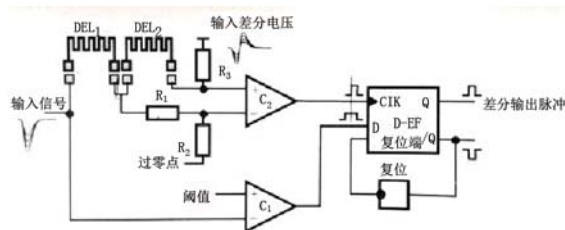


图 5 利用过零触发的恒比鉴别器

将上升沿触发鉴别器的比较器 C_1 直接连到输入端, 当输入电压超过设定的阈值电压时将会引起触发。

过零触发器 C_2 经过两个无源延迟线 DEL_1 和 DEL_2 获得输入信号, 其有效输入信号是 DEL_2 端的输入与输出脉冲的差分信号。在差分电压的基线渡越处, C_2 触发并在输出端产生一个正的渡越脉冲信号。此脉冲用作一个快速发射极耦合逻辑 D 触发器的时钟输入。当 C_2 的输出脉冲上升沿到达 D 触发器的时钟输入端时, D 触发器在输入端 S 处开始存储信息, D 的输入信

号来自上升沿鉴别器。因此, 当输入电压信号超过上升沿鉴别器的阈值电压时, 如果产生了过零触发, D 触发器将被置位。电路触发之后, D 触发器通过外部复位或外加逻辑门进行复位。通过改变 DEL_2 以及电阻 R_1 和 R_2 , 可以优化过零信号的有效波形, 而通过选择 DEL_1 , 则可将 C_2 的脉冲沿置于 C_1 所输出的脉冲周期内。

2.2 传统恒比定时时刻鉴别的误差分析

首先, 假设 $V_i(t)$ 为输入信号

$$V_i(t) = V_0 f_0(t) \quad (2)$$

式中, V_0 为信号的幅度, $f_0(t)$ 是信号随时间变化的归一化函数。如果阈值 V_T 始终为

$$V_T = pV_0 \quad (3)$$

式中, 触发比 p 为常量。那么, 由以上两式可知, 定时点 t_T 满足以下的关系式

$$V_0 f_0(t_T) = pV_0 \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 如果输入信号的形状 $f_0(t)$ 不变而只是幅度 V_0 改变, 则定时点 t_T 与幅度 V_0 无关。

恒比定时时刻鉴别主要由延时器、衰减器以及比较器组成。假设将输入信号 $V_i(t)$ 同时输入至延时器以及衰减器, 而将延时后信号假设为 $V_1(t)$, 将衰减后信号假设为 $V_2(t)$, 则将 $V_1(t)$ 输入至比较器同相的输入端, 将 $V_2(t)$ 输入至比较器反相的输入端。

将延时器的延时设为 t_d , 并将衰减器的衰减系数设为 α_A , 由式 (2) 可得

$$V_1(t) = V_s(t - t_d) = V_0 f_0(t - t_d) \quad (5)$$

$$V_2(t) = \alpha_A V_s(t) = \alpha_A V_0 f_0(t) \quad (6)$$

在定时点 t_T 处, $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 相等, 由此可得

$$V_0 f_0(t_T - t_d) - \alpha_A V_0 f_0(t_T) = 0 \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 定时点 t_T 、延时 t_d 都与衰减系数 α_A 有关, 和输入信号的幅度 V_0 无关。则由式 (2) 和式 (7) 可知, 触发比可表示为

$$p = \frac{\alpha_A V_0 f_0(t_T)}{V_0} = \alpha_A f_0(t_T) \quad (8)$$

而比较器的输入端的电压差为

$$V_3(t) = V_1(t) - V_2(t) = V_0 f_0(t - t_d) - \alpha_A V_0 f_0(t) \quad (9)$$

比较器对 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 的比较等效于对 $V_3(t)$ 作过零比较。但是一般延时器、衰减器以及比较器的总噪声远比输入信号的噪声小, 可忽略不计。假设输入信号噪声为白噪声, 并设噪声电压均方根为 V_n 。由式 (9) 可知, $V_3(t)$ 噪声是 $V_1(t)$ 与 $V_2(t)$ 的噪声之和。 $V_1(t)$ 为 $V_i(t)$ 的延时信号, 噪声不变。 $V_2(t)$ 为 $V_i(t)$ 衰减 α_A 后的信号。因此, $V_3(t)$ 的噪声可以表示为

$$V_{n3} = V_n \sqrt{1 + \alpha_A^2} \quad (10)$$

由 $V_3(t)$ 的噪声引起时刻鉴别的标准差可以用 $V_3(t)$ 在 $t = t_T$ 处的导数来表示, 如图 6 所示。

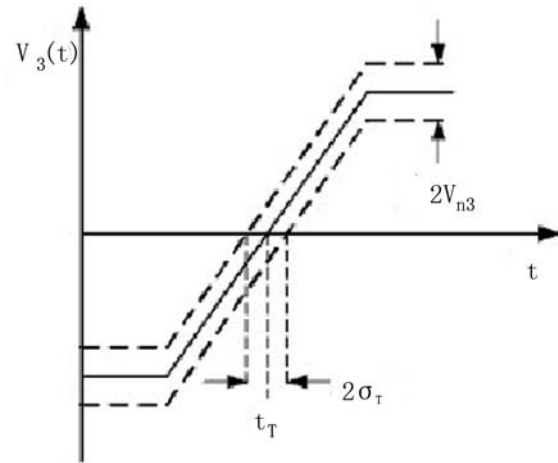


图 6 噪声引起的时刻鉴别误差

$V_3(t)$ 在 $t = t_T$ 处的斜率等于 $V_3(t)$ 在 $t = t_T$ 处的导数。由图 (6) 可知, $V_3(t)$ 的噪声引起的时刻鉴别标准差可以表示为

$$\sigma_T = \frac{V_{n3}}{\frac{dV_3(t)}{dt} \big|_{t_T}} = \frac{V_{n3}}{V'_3(t_T)} \quad (11)$$

由式 (11) 可见, 时刻鉴别的标准差与噪声 $V_{n3}(t)$ 成正比, 与 $V_3(t)$ 在 $t = t_T$ 处的导数成反比。

假设信号的上升沿近似为直线, 上升时间为 t_r , 则信号可以表示为

$$V_i(t) = \frac{V_0 t}{t_r} (0 < t < t_r) \quad (12)$$

为将触发比控制在 0.5 左右, 衰减系数必须超过 0.5。由式 (12) 可知, 经过衰减器衰减后的信号 $V_2(t)$ 可以表示为

$$V_2(T) = \frac{\alpha_A V_0 t}{t_r} \quad (13)$$

经过延时器延时后的信号 $V_1(t)$ 可表示为

$$V_1(T) = \frac{V_0(t - t_d)}{t_r} \quad (t_d < t < t_d + t_r) \quad (14)$$

由以上两式可知, $V_3(t)$ 的导数可表示为

$$V'_3(t_T) = \frac{V_0}{t_r} - \frac{\alpha_A V_0}{t_r} \quad (15)$$

由式 (10)、式 (11) 和式 (15) 可知, 由输入信号噪声带来的时刻鉴别标准差可表示为

$$\sigma_{T1} = \frac{V_n t_r \sqrt{1 + \alpha_A^2}}{V_0 (1 - \alpha_A)} \quad (16)$$

由此可见, 由噪声带来的时刻鉴别标准差与输入信噪比 V_0/V_n 成反比, 与信号上升沿的上升时间 t_r 成正比。当 $V_n=500$ mV、 $V_0=1.5$ V、

$\alpha_A=0.6$ 、 $t_r=3$ ns 时, 经计算可得, $\sigma_{T1}=292$ ps, 显然符合本论文引言所述的要求。

2.3 恒比定时鉴别电路的实现

恒比定时鉴别电路的简化图如图 7 所示, 它主要由输入部的比较器以及 D 触发器所构成。图 7 中的上半部分是信号的输入部分, 它的 AD8330NO 端口与压控放大电路的相应端口连接, 从这个端口输入的信号(负脉冲)经电压缓冲器 U1 后被分成三路, 其中电压缓冲器的增益为 2。第一路先经过电阻 R1 端接到地, 然后连接 MAX9601 中的 A 比较器的反相输入端; 第二路先经电阻 R2 和 R3 以及电容 C1 所构成的低通滤波器进行衰减与展宽, 然后连接 MAX9601 中的 B 比较器的同相输入端; 第三路先经电感 L1、L2 以及电容 C2、C3 所构成的延迟器, 然后连接 MAX9601 中的 B 比较器的反相输入端, 其中 R4 是匹配端接电阻。

图 7 中 U3 为 MAX9601 的高速比较器, 它由两个比较器组成, 其中 A 比较器是预鉴别比较器, B 比较器是恒比定时时刻鉴别比较器, 这

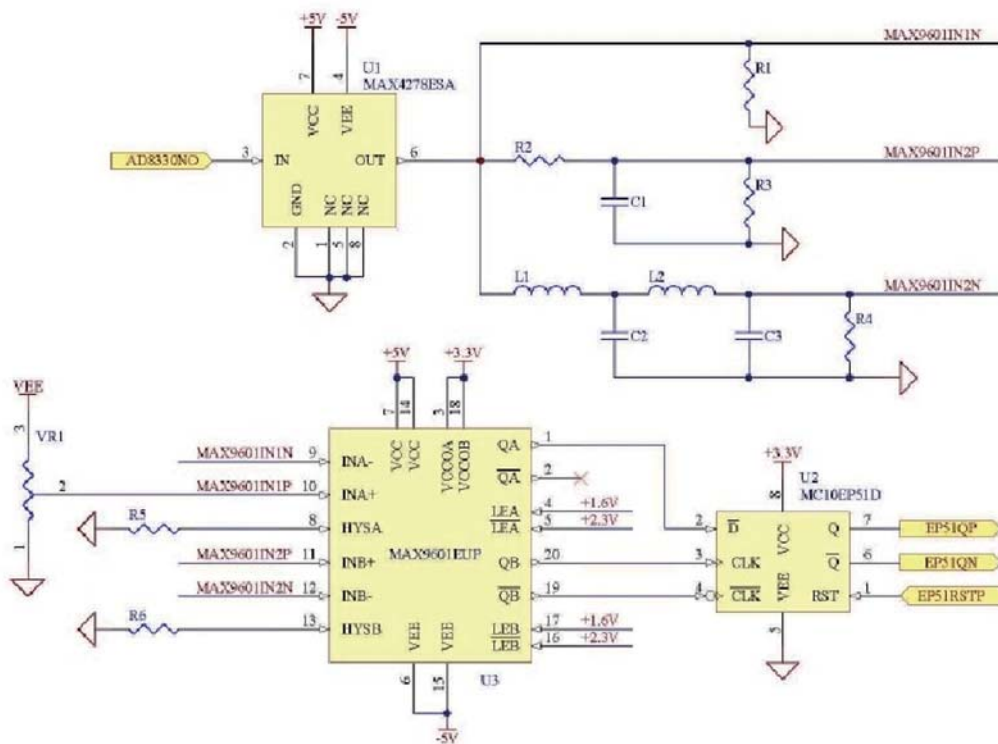


图 7 恒比定时鉴别电路的电路简化图

两个比较器的输出均为 LVPECL 电平。VR1 是可调电阻, 用来调节预鉴别即比较器 A 的阈值电平。差分输出 NE5210 有效电压的最大幅度是 3.0 V, 另外它的单端输出有效电压的最大幅度是 1.5 V, 由电路参数的计算易得 A 比较器的输入信号的电压最大幅度是 1.81 V。压控放大电路输出信号的幅度变化主要由目标反射率变化引起。如果要求探测反射率处于 0.1~1 间的目标, 反射率所引起的信号幅度变化范围则为 10 倍, 而 A 比较器输入信号的电压的最大幅度大约是 1.81 V, 所以 A 比较器输入信号的电压的最小幅度是 181 mV。U2 是 LVPECL 电平的 D 触发器, 其主要作用是根据预鉴别比较器以及恒比定时时刻鉴别比较器所输出的结果产生最终的鉴别输出信号。D 触发器能通过 EP51RSTP 端口进行复位, 可实现时间选通功能, 但它只被允许在探测的距离范围及相应的时间范围内工作, 而在其它的时间范围内它一直处于复位状态。这样可提高整个系统的抗干扰能力, 降低虚警概率。

3 时间测量原理及方法

激光雷达的主波、回波分别通过恒比时刻鉴别后会产生两个脉冲信号, 这两个脉冲信号在时间轴上的差便是我们最终所要做的时间测量。

3.1 时间间隔测量的原理

时间间隔测量始于真空管年代。几十年来, 其测量方法不断被改进发展, 从最早的时间间隔扩展法到现在的插值法以及延迟线法, 可以说种类繁多^[6]。所有的测量方法譬如插值法、扩展法、游标法、延迟线法等划分并不绝对。在实际应用中, 往往不会单纯使用某一种方法, 一般会将多种方法结合起来使用。譬如插值法, 它要与其它的方法结合使用, 因此在此将简单介绍插值法的基本原理。

插值法按定义是确定由两个函数界定一个函数的逼近值的一种方法。但是在时间间隔的测量中, 它指的是将一个时间的间隔分成两部分即粗计数器周期整数倍的部分以及分数部分,

如图 8 所示。整数倍部分由粗计数器读出, 分数部分则由插值的测量单元读出。它的数学表达式如下:

$$T = nT_p + \Delta T_1 - \Delta T_2 \quad (17)$$

式中, T_p 为参考时钟周期。

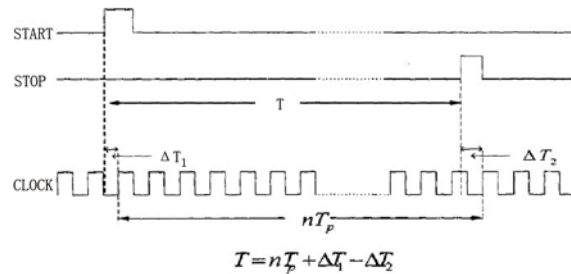


图 8 插值法的原理图

如图 8 所示, 时间间隔 T 可分成三部分, 即从 Start 启动开始至标准时钟相邻的上升沿的 ΔT_1 、从 Stop 启动开始至标准时钟相邻的上升沿的 ΔT_2 以及上面两上升沿之间的基准时钟间隔 nT_p 。

3.2 时间测量的具体实现

为了提高 FPGA 的资源利用率, 我们摒弃时间测量芯片 TDC, 直接采用 FPGA 实现高精度的时间测量。选用的方法为抽头延迟线法。

抽头延迟线法又叫时延法。抽头延迟线由一组理论上相同的延迟单元组成, 这一整组延迟单元的传播时延是相等的, 都为 τ 。时间间隔测量便是通过用 Stop 信号对 Start 信号在整个延迟线上的传播进行采样实现的, 其中 Stop 信号为关门信号, Start 信号为开门信号。图 9 是一种由专用延迟单元与采样单元实现抽头延迟线法的简易结构。

如图 9 所示, 延迟时间是 τ 的单元, 它总与一个 FF(Flip-Flop) 触发器相配合。这里的 FF 触发器不是由电平触发的, 而是由上升沿触发的。时间间隔 T 开始时 Start 信号的上升沿在延迟线上传播, 结束时则用 Stop 信号的上升沿对触发器进行采样。而触发器为高的最高位位置便决定了测量的结果, 最后通过译码实现时间到数字的转换。

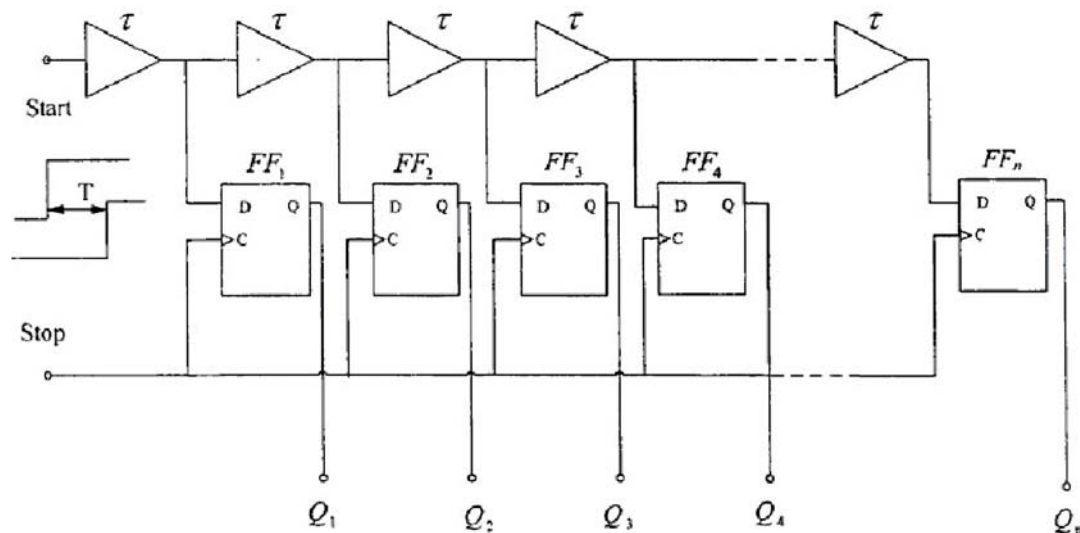


图 9 抽头延迟线法的简化结构示意图

4 结束语

由于半导体激光雷达技术的流行,脉冲激光测距的重要性变得尤为突出,而恒比定时时刻鉴别技术也变得尤为重要。本文阐述了时刻鉴别尤其是恒比定时鉴别技术的原理及电路实现,以及基于时刻鉴别进行时间测量的具体方法。

由于噪声可能触发过零比较器,通过预鉴别判断信号的有无就必不可少。另外,实际时间间隔测量电路中,如果时间间隔太小,粗计数器则可能误判一个周期。后期可以考虑对 ΔT_1 、 ΔT_2 采用 Start、Stop 到相邻的第二个基准时钟上升沿的间隔。通过这两方面的改进,可为进一步提高恒比定时鉴别以及时间测量精度奠定良好的基础。

参考文献

- [1] 熊辉丰. 激光雷达 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994.
- [2] 陈千颂, 杨成伟, 潘志文. 激光的飞行时间测距的关键技术的进展 [J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 7-10.
- [3] Araki T. Optical Distance Meter Using a Short Pulse Width Laser Diode and a Fast Avalanche Photodiode [J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(1): 43-47.
- [4] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [5] 贝克尔著. 屈军乐译. 高级时间相关单光子计数技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] 张延. 用 FPGA 实现高精度时间间隔测量 [D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2006.

新闻动态 News

法国空中客车国防与航天公司 获得气象仪器研制合同

据 www.spacenews.com 网站报道,法国空中客车国防与航天公司最近从欧洲空间局 (ESA) 获得了一份价值 1.44 亿欧元的气象仪器研制合同。他们将为计划于 2021 年发射的一颗欧洲第二代 MetOP 极地轨道气象卫星提供一台工作在紫

外、可见光、近红外和短波红外波段的 Sentinel-5 成像光谱仪。Sentinel-5 有效载荷预计于 2019 年交付。

Sentinel-5 是欧洲正在为“哥白尼计划”研制的一系列低轨环境有效载荷中的一员。Sentinel-1~3 均是专用卫星,其中的首颗卫星——Sentinel-1A 卫星已于 2014 年 4 月 3 日发射升空。Sentinel-4/5 是装载在欧洲气象卫星上的次级有效载荷。

□ 岳桢千