

一种高精度大动态范围的距离模拟脉冲发生方法研究

何 韵, 许文渊

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 现有的产生距离模拟脉冲的方法中, 数字延时电路只能达到 ns 量级的精度, 模拟延时电路的延时范围又不足够作为距离模拟脉冲的使用, 为了实现高精度大动态范围的延时, 来产生激光测距仪的距离模拟脉冲, 在研究了现有方法的基础上, 采用了数模结合的方案, 设计了一种同时满足高精度和大动态范围的延时脉冲信号发生电路, 并对其精度和重复性进行了测试, 可以实现 $2\ \mu\text{s}$ ~ $4\ \text{ms}$ 的延时范围并具有 $0.1\ \text{ns}$ 的延时精度, 即可以模拟 $300\ \text{m}$ ~ $600\ \text{km}$ 的距离并具有 $1.5\ \text{cm}$ 的距离精度。解决了现有的距离模拟电路无法同时满足高精度、大动态范围的矛盾。

关键词: 高精度; 大动态范围; 距离模拟; 数模结合

中图分类号: TN784 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)11-3408-05

A method of generating high precision large dynamic range distance simulation pulse

He Yun, Xu Wenyan

(School of Instrument Science and Opto Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Among the existing methods of generating distance simulation pulses, digital delay circuit can only achieve the accuracy of ns order, while analog delay circuit does not have enough delay range used as distance simulation pulse. In order to realize delay of high precision and large dynamic range to produce the distance simulation pulse of laser range finder, based on the analysis of the current circuit, the circuit structure combining both the digital circuit and analog circuit was proposed in this article, which would satisfy both the high accuracy and large dynamic range. Its accuracy and repeatability were tested, and the results can reach $2\ \mu\text{s}$ ~ $4\ \text{ms}$ range of delay and $0.1\ \text{ns}$ delay precision, which can simulate the distance of $300\ \text{m}$ ~ $600\ \text{km}$ and achieve the distance accuracy of $1.5\ \text{cm}$. The method of generating distance simulation pulse proposed in this article can solve the problem of incapable of achieving high precision and large dynamic range simultaneously, existing in current distance simulation circuit.

Key words: high precision; large range; distance simulation; analog and digital combination

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-03

作者简介: 何韵(1990-), 女, 硕士生, 主要从事脉冲激光测距、非线性光学等方面的研究。Email: heyunmimi@126.com

导师简介: 许文渊(1981-), 男, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电子技术、微米光学、非线性光学等方面的研究。

Email: xuwenyuan1981@gmail.com

0 引言

距离模拟技术用于对激光测距仪进行标定。这种技术能够在对测距范围达到几百米至几百千米的星载激光测距仪进行地面性能测试时,减小目标及环境条件对测试的影响,同时提高测试的易操作性和精确性。原理是:产生两个间隔的脉冲信号,分别模拟激光雷达的发射主波和接收回波,调整其间隔时间即可改变模拟的目标距离,被测激光测距仪接收这两个脉冲信号,将其测得的距离与此时脉冲间隔所代表的距离相对比,即可对测距仪的灵敏度、距离分辨率以及测距精度等性能参数进行测试。主波脉冲与回波脉冲之间时间间隔的精度即为所模拟距离的精度。

近年来对于提高激光测距仪距离模拟精度的研究却较少,现有的延时方法不足以直接用于激光测距仪的标定^[1-3]。例如通用的延迟单元一般采用可编程逻辑器件来实现,具有动态范围大、设计简单等优点,但是数字电路延迟精确度却受到器件工作时钟的限制,一般在 ns 级别。用在电子和通信领域的专用延迟单元,虽然可以达到较高的延时精度,但由于其一般为模拟电路,延时的动态范围有限,无法作为距离模拟源提供用于激光测距仪系统标定的模拟距离。

基于以上研究背景,文中的研究重点在于设计了一种距离模拟脉冲的发生方法,采用数字电路和模拟电路相结合的方案,能够同时满足高精度大动态范围的使用要求,并进行了延时精度和重复性测试,验证了此方法能够用于激光测距仪系统的标定,作为激光测距仪系统地面测试支撑设备的关键技术。

1 方案设计

1.1 电路结构选择

要使延时电路能够满足激光测距仪距离模拟器的使用要求,需要模拟的距离范围为 300 m~600 km,同时距离模拟精度达到 1.5 cm,即延时动态范围为 2 μ s~4 ms 的同时,延时精度达到 0.1 ns。针对高精度、大动态范围无法同时满足这一矛盾,近年来的许多篇文献中都进行了这方面研究^[4-6]。

其中一种方案是模拟器件串联^[7]。例如将两片 8

位的 AD9501 等效成一片 16 位可编程脉冲延时芯片,可以达到的测量范围 0.6 μ s~2.6 ms,三片 AD9501 串联的延时范围可以达到 0.17 ms~0.67 s。全模拟的方法可达到较高的精度,但系统结构比较复杂,而且需要 3 片 AD9501 串联才能满足延时范围要求,不利于系统集成。

另一种解决方案是使用全数字电路^[8]。该电路可以在 Virtex5 系列的 FPGA 上实现,其核心由粗延时单元和精延时单元两部分组成,粗延时单元采用计数器法实现,精延时单元的核心由 IODELAY 基元构成。能够实现 0.1 ns 的延迟度精度和 10 ms 的动态范围。但电路为全数字结构,内部必然存在一些固有延时和不可预知的干扰,影响方案的稳定性和可靠性。

因此,文中在结合了以上两种电路设计优点的基础上,采用了数模结合的方法,设计了一个两级延时的电路结构,第一级数字延迟部分使用 FPGA,完成延迟量高位部分控制,扩大动态范围;第二级模拟延迟部分使用 AD9501,完成延迟量低位部分控制,提高延时精度。原理框图如图 1 所示。

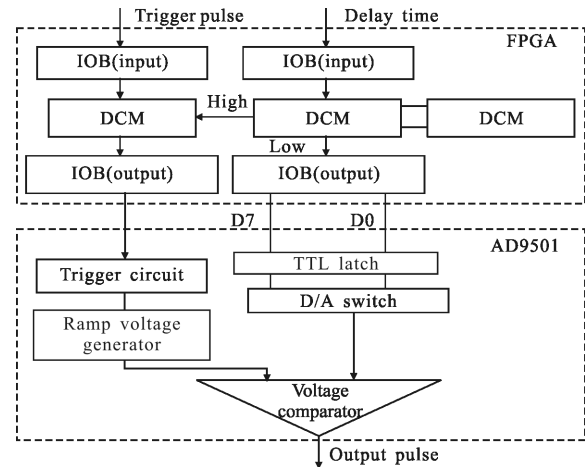


图 1 两级延时电路原理框图

Fig.1 Principle diagram of the two-stage delay circuit

1.2 精度分析

这种方法的关键在于实现大动态范围的同时保证较高的延时精度,并且具有较高的重复性和稳定性,因此所使用的每个器件都需要适当选取、会产生误差的每个环节都需要考虑到,不仅要满足精度要求,还要尽量减少随机误差保证稳定性,并通过一些方法补偿延迟过程产生的固定误差,只有每个产生误差的环节都满足精度要求,才能使整个系统达到

所要求的参数指标。

1.2.1 器件误差

晶振作为第一级延迟的输入时钟信号,晶振的频率决定了计数器的最小计数单位即 FPGA 所能达到的精度,而且保证晶振较高的稳定度也是整个系统具有良好重复性的关键,所以,应在保证稳定度足够的情况下选择频率尽可能高的晶振作为时钟。文中选择型号为 JKOC36 的高稳定度恒温晶振,其频率最高可达到 100 MHz,稳定度也达到了 $\pm 2.0 \times 10^{-8}$ 。

AD9501 的满程延迟范围由外接电阻器和外接电容器确定,并满足关系:

$$\text{Trange} = R_{\text{set}} \times (C_{\text{ext}} + 8.5 \text{ nF}) \times 3.84 \quad (1)$$

系统中第二级的延时为小于 10 ns 的部分,不需要外接电容。所以选择高精度的电阻十分重要,决定了 AD9501 最大延时的精度,从而影响总延时的精度。选择 RJ73-76 系列高精度电阻可满足使用要求,其最高精度可以达到 $\pm 0.1\%$,温度系数最高可以达到 $\pm 25 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

1.2.2 数字误差

数字器件容易在很多环节产生误差,所以成为保证系统精度的关键。FPGA 内部的误差可分为两部分:可补偿部分和不可补偿部分。可补偿部分指 FPGA 输入输出端口、逻辑模块之间传输信号时形成的固定误差,可以根据数据手册查到确定的值,FPGA 程序编译和下载完毕之后这部分的总误差就是确定不变的值了,所以可以对其进行补偿。不可补偿部分指由于 FPGA 内部延时不确定度造成的误差,这部分误差无法通过现有资料计算得到,无法补偿,只能通过器件的选取等措施来尽量减小。

1.2.3 模拟误差

AD9501 除了外接电阻带来的误差之外,还有本身线性度的问题。给出的 8 位延时数字量与实际完成的延时时间是否具有良好的线性关系,是保证 AD9501 延时精度甚至整个系统延时精度的重要因素。为了确定 AD9501 线性度是否达到要求,给出了一组延时数字量并测量了实际延时时间,数据表格如表 1 所示,可以看出线形度还是非常良好的。将这两组数据拟合合成直线,并计算其相关系数,可以得到:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{t}_i - \bar{t})^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \hat{t})^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = 0.999\ 546\ 325 \quad (2)$$

表 1 AD9501 线性度测试数据表

Tab.1 Data table of AD9501 linearity test

Digital data	Average/ns	Digital data	Average/ns	Digital data	Average/ns
0	9.3	60	12.902	120	16.938
10	9.786	70	13.596	130	17.536
20	10.292	80	14.288	140	18.162
30	10.852	90	15.002	150	18.784
40	11.462	100	15.688	-	-
50	12.174	110	16.326	-	-

说明两组数据有显著的线性关系,满足要求。

1.3 方案流程

首先,PC 给出延时时间的数字量,FPGA 通过 IOB 模块接收,大于分级点的部分给计数器模块存储,小于分级点的部分再通过 IOB 模块输出给 AD9501 的 8 位数据输入端;PC 给出的开始脉冲到达时,FPGA 开始计数,计数完毕达到延时时间后,发出脉冲;脉冲触发 AD9501,AD9501 开始延时,延时结束后给出结束脉冲;结束脉冲通过 SMA 接口输出即整个延时过程结束。若以 10 ns 为两级延时的分级点,流程图如图 2 所示。

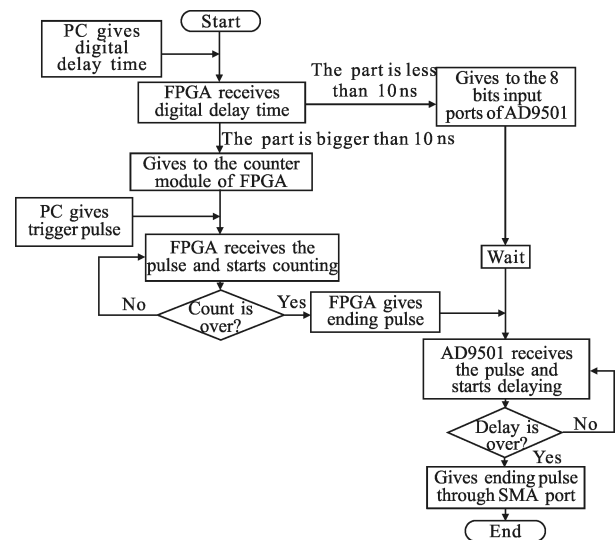


图 2 方案流程图

Fig.2 Flow diagram of the scheme

2 测试及分析

2.1 测试方案

测试的硬件连接如图 3 所示。电路板通过串口接口连接 PC 机;示波器一个通道接主波输出端口,

另一个通道接回波输出口。

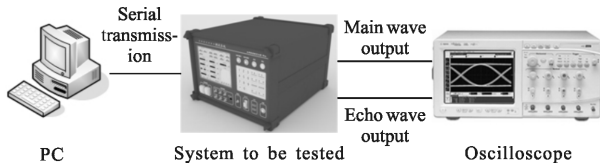


图 3 测试硬件连接图

Fig.3 Hardware diagram of the test

PC 从串口向电路给出延时时间的数字量,记录示波器测得的延时时间。首先固定 FPGA 的延时时间,给出一组 AD9501 的延时数字量 $T_0, T_1, T_2, \dots, T_n$ (例如 0、10、20、 \dots 、150),每个数字量测量 5~10 组延时时间:

$$\begin{aligned} & t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, \dots, t_{1m}, \\ & t_{20}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, \dots, t_{2m}, \\ & \dots, \\ & t_{n0}, t_{n1}, t_{n2}, t_{n3}, \dots, t_{nm}, \end{aligned}$$

每组求平均值,得到:

$$\bar{t}_0, \bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{t}_3, \dots, \bar{t}_n$$

再减去数字量为 0 时的固有延时时间,得到补偿后的延时时间:

$$\begin{cases} \bar{t}'_1 = \bar{t}_1 - \bar{t}_0 \\ \bar{t}'_2 = \bar{t}_2 - \bar{t}_0 \\ \dots \\ \bar{t}'_n = \bar{t}_n - \bar{t}_0 \end{cases} \quad (3)$$

最后与数字量所代表的理论延时时间相减,则可得到延时时间测量的偏移误差:

$$\begin{cases} \Delta \bar{t}'_1 = \bar{t}'_1 - T_1 \\ \Delta \bar{t}'_2 = \bar{t}'_2 - T_2 \\ \dots \\ \Delta \bar{t}'_n = \bar{t}'_n - T_n \end{cases} \quad (4)$$

此偏移误差的方差可作为衡量系统延时精度的指标,应在 0.1 ns 的范围之内。

对上述每个延时时间的 5~10 组数据求算术平均值的标准差:

$$\begin{cases} \sigma_{t_1} = \sqrt{\sum_{i=1}^m t_{1i}^2 / m(m-1)} \\ \sigma_{t_2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m t_{2i}^2 / m(m-1)} \\ \dots \\ \sigma_{t_n} = \sqrt{\sum_{i=1}^m t_{ni}^2 / m(m-1)} \end{cases} \quad (5)$$

此标准差可作为衡量系统重复性的指标,应在 0.05 ns 的范围之内。

2.2 测试结果分析

按以上步骤处理的一组数据的偏移误差方差和标准差如图 4 所示,实测时间与延时数字量的线性关系如图 5 所示。

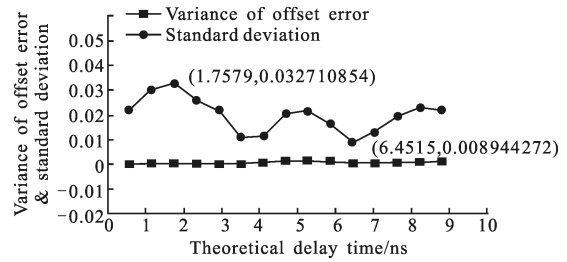


图 4 精度与重复性测试数据图

Fig.4 Data diagram of the precision and repeatability test

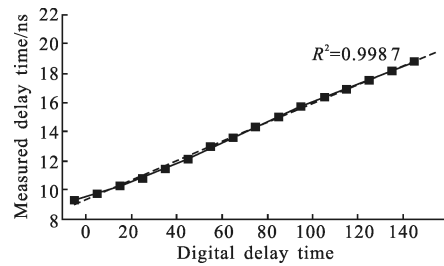


图 5 实测延时时间与延时数字量关系图

Fig.5 Relationship between digital delay time and measured delay time

首先,由图 5 可以看出,实测的延时时间与给出的延时数字量基本呈显著线性关系,拟合成直线的相关系数为 $r^2=0.9987$ 。其次,由图 4 可知,每个延时时间的偏移误差方差都远远小于 0.1 ns,说明所测得的时间与理论延时间接近程度较好,系统的精度满足要求。最后,标准差也都在 0.05 ns 之内,说明每次测量值的分布较为集中,系统具有较好的重复性。

3 结 论

为了解决激光测距仪距离模拟器的研究中,延时电路无法同时满足高精度和大动态范围这两个使用要求的矛盾,文中提出了一种数模结合、两级延时的方法:第一级数字延时部分使用 FPGA,完成延时量高位部分控制,扩大动态范围;第二级模拟延时部分使用 AD9501,完成延时量低位部分控制,提高延

时精度。基于该方法设计了电路,并对延时结果进行了测试,验证了该方法能够发出精确间隔的两个脉冲信号,能够实现 0.1 ns 的延时精度,2 μs ~4 ms 的延时动态范围,并且具有较好的重复性和稳定性,因此可作为距离模拟脉冲的发生方法,用于激光测距仪的标定和校准。

参考文献:

- [1] Lin Yingkan, Guo Ying, Huang Genghua, et al. Research and precision analysis on laser range finder distance simulation source technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1089-1093. (in Chinese)
林盈侃, 郭颖, 黄庚华, 等. 激光测距仪距离模拟源技术研究及精度分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1089-1093.
- [2] Zhang Jin, Wang Boxing, Cui Yuanyuan, et al. High-precision echo time of flight measurement method and its FPGA implementation [C]//2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), IEEE, 2011: 6021-6024.
- [3] Wang Weiming, Chen Zhibin, Shen Xiaoyan, et al. Circuit-delay simulated testing for infrared range finders[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 72-76. (in Chinese)
王伟明, 陈志斌, 沈晓彦, 等. 红外测距仪电路延时模拟检测研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 72-76.
- [4] Yang Chengwei, Chen Qiansong, Lin Yan, et al. Measurement on time interval in pulsed laser ranging and error analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(2): 123-126. (in Chinese)
- [5] Li Hao, Li Jiaqi, Wu Siliang, et al. Design of a large dynamic range and high resolution pulse delay unit [J]. *The Dual-Use Technology and Products*, 2006, 5: 36-38. (in Chinese)
李浩, 李加琪, 吴嗣亮, 等. 一种大动态范围高分辨率的脉冲延迟器设计[J]. 军民两用技术与产品, 2006, 5: 36-38.
- [6] Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, et al. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3234-3238. (in Chinese)
杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 采用高速伪随机码调制和光子计数技术的光纤激光测距系统 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3234-3238.
- [7] Zhang Baodong, Wang Shengshu, Zhan Dejun, et al. Sequential equivalent time sampling design based on AD9501 series [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2008, 31(11): 66-67. (in Chinese)
张宝东, 王省书, 战德军, 等. 基于 AD9501 串联的顺序等效时间采样设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(11): 66-67.
- [8] Liu Peng, Xu Ke. Design of a high precision and high dynamic digital delay unit based on FPGA [J]. *Micro Computer Information*, 2010, 26(8): 132-134. (in Chinese)
刘鹏, 许可. 一种基于 FPGA 的高精度大动态数字延迟单元的设计[J]. 微计算机信息, 2010, 26(8): 132-134.