

基于 FPGA 的远距离单光子精细化时间数字转换电路

谢 达¹, 王春阳^{1,2*}, 袁 凯¹, 卫旭阳², 刘雪莲²

(1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 西安工业大学 西安市主动光电成像探测技术重点实验室, 陕西 西安 710021)

摘 要: 针对星载 GM-APD 单光子测距系统难以兼顾宽量程高精度测量问题, 文中设计了一种基于等效脉冲粗精两级的精细化时间数字转换电路 (Time-to-Digital Converter, TDC)。该 TDC 首先基于分段式计数原理, 设计了粗精两级的计数架构, 保证了 TDC 宽量程测量; 其次, 针对精计数单元, 采用时钟等相差相移 π/N , 生成等效高频脉冲时钟, 将精计数单元的计时精度提升 N 倍; 再次采用多计数器双沿间隔计数方法, 将精计数单元计时精度进一步提升至 $2N$ 倍; 最后通过模拟仿真与实验验证对文中设计的 TDC 进行远距离单光子测距性能测试。仿真与实验结果表明: 文中面向远距离单光子测距设计的精细化时间数字转换电路在参考时钟为 50 MHz 时, 计时分辨率为 416.67 ps, 计时量程达 1.31 ms。对室内 10 m 处目标进行 100 次测距重复实验, 测距误差为 5.62 cm, 对室外参考距离为 2 616.5 m 处目标进行测距实验, 测距的方差为 0.001 7 m, 由此可见, 基于文中等效脉冲粗精两级精细化时间数字转换电路的单光子测距系统可以实现远距离目标的高精度、宽量程测量。

关键词: 单光子; 激光测距; 时间数字转换; 等效脉冲; GM-APD

中图分类号: TN743 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230094

0 引 言

单光子测距系统是利用 GM-APD 探测器光子级探测灵敏度, 基于光子飞行时间测距原理, 获取远场目标距离信息的系统^[1-3]。该系统具有作用距离远、测距精度高的优势, 在激光成像、目标检测等领域具有巨大应用潜力^[4-6]。时间数字转换电路作为单光子测距系统的核心模块, 其转换量程和精度直接决定了测距系统的工作量程和测距精度。而在星载探测领域, 要求测距系统具有百公里以上的测距量程和厘米级的测距精度, 此时传统的时间数字转换电路, 受计数器位数的限制, 为了保证测距精度, 往往导致系统的测量范围受限, 而如果增大系统的量程, 则系统的测距精度又难以满足需求, 为此文中设计了一款同时满足宽量程和高精度的时间数字转换电路, 实现对光子飞行时间间隔的宽量程、高精度测量^[7-12]。为星载激光探测领域单光子测距提供技术支撑。

目前, 针对单光子测距系统的 TDC 设计主要包括游标法、双边采样法、延时线内插和分段等方法, 钟宇民等人采用 800 M 时钟双边沿采样 TDC 设计方案, 其时间数字转换的时间分辨率仅为 625 ps^[13]。侯利冰等利用延时线内插在 FPGA 内部实现了高精度的时间间隔测量, 在 125 MHz 时钟周期下, 时间分辨率为 27 ps, 系统的测时精度为 421 ps^[14], 该方法测量精度较高, 可达皮秒级, 但受计数器最大计数值限制, 当计数器为 16 位时, 其计时量程难以达到毫秒级, 测距量程无法突破 10 km。章琪文等设计了一款游标型 TDC 电路, 在 120 MHz 主频时钟下采用粗精两级的计数方法, 计时量程为 500 ns, 时间分辨率优于 300 ps^[15]。该方法 TDC 结构较为复杂, 且计时量程较低。刘煦等人设计了一款三段式 TDC 时间数字转换电路, 在 250 MHz 参考时钟下, 采用 8 位计数器, 计时量程为 4 μ s, 时间分辨率仅为 0.5 ns^[16]。李恩丞提出

收稿日期: 2023-02-26; 修订日期: 2023-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3803702)

作者简介: 谢达, 男, 博士生, 主要从事单光子探测方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 王春阳, 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光相控阵雷达技术、先进控制理论及技术方面的研究。

了一种多相采样的高精度时间间隔测量方法,通过同频时钟相移生成等效高频时钟,在 100 MHz 参考时钟下,计时精度为 0.416 ns^[17]。王巍等提出了一种基于 FPGA 的时钟相移时间数字转换器,采用 16 路同频时钟相移,其时间分辨率为 156.25 ps^[18],该方法虽然采用时钟相移的方案提升了计时精度,但计时量程受限。德国 ACAM 公司基于粗精两级的计数架构设计了一款 TDC-GP21 时间数字转换芯片,该芯片量程为 4 ms,时间分辨率为 90 ps,具有较宽的量程和较高的计时精度,但其精计数模块采用延时线内插法实现时间的精密测量,虽然获得了较高的时间转换精度和较大的测距量程,但该芯片内部电路结构复杂,内插的超高频计数时钟会产生非线性输出,引起测距误差。

目前,单光子测距系统的 TDC 设计方法多集中于提升 TDC 的计时精度,针对提升 TDC 宽量程的研究较少,而 TDC 的宽量程和高精度两个指标相互制约,为解决宽量程和高精度相互矛盾的问题,文中提出了一种远距离单光子测距的精细化时间数字转换电路设计方法,该方法首先基于分段式计数原理,设计了粗精两级的计数架构,保证了 TDC 宽量程测量;其次,针对精计数单元,采用时钟等相差相移 π/N ,生成等效高频脉冲时钟,将精计数单元的计时精度提升 N 倍;再次采用多计数器双沿间隔计数方法,将精计数单元计时精度进一步提升至 $2N$ 倍,最后基于文中所提 TDC 设计方案,设计了基于 FPGA 的远距离单光子测距系统,对文中所提 TDC 性能进行验证。

1 GM-APD 单光子测距原理

GM-APD 单光子测距原理如图 1 所示,上位机输入激光器出射激光和 GM-APD 探测参数,由 FPGA 输出两路 Start 信号分别触发脉冲激光器出光和 TDC 开始计数,出射激光经发射光学系统整形后照射至目标区域,在目标表面发生漫反射后经超窄带滤波片滤除杂光及背景光然后经接收光学系统汇集到 GM-APD 感光面上,GM-APD 完成光电转换,并经过信号处理电路,产生 Stop 信号输入至 TDC, TDC 停止计数。至此完成光子飞行时间 T 的测量^[19]。

采用直接计数法进行 GM-APD 单光子测距的工作时序图如图 2 所示。GM-APD 接收到使能信号 EN,系统进入工作状态,当 TDC 接收到 Start 信号后,

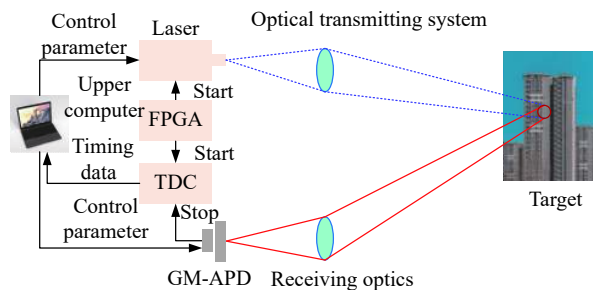


图 1 GM-APD 激光测距原理

Fig.1 Principle of GM-APD laser ranging

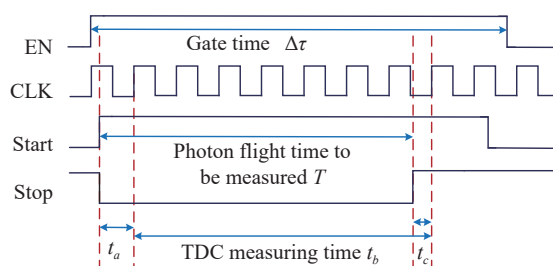


图 2 测距系统的时序图

Fig.2 Timing diagram of the ranging system

开始计时,计时频率为系统的参考时钟 CLK,当 TDC 接收到 Stop 信号后停止计时。TDC 的计时时间为 t_b ,由公式 (1) 解算目标的距离 L ,可表示为:

$$L = c \cdot t_b / 2 \tag{1}$$

式中: c 为光速。

由图 2 可知,待测的光子飞行时间 T 与 TDC 测量的时间间隔 t_b 存在一定误差,其关系可表示为:

$$T = t_a + t_b - t_c \tag{2}$$

通过时钟内插不断提高系统时钟的帧频可以提高测距精度,但随着时钟频率的增高会引起非线性误差,且系统只有一个最小 LSB,计数器位数的限制,采用此方法系统难以做到远距离宽量程探测。

2 基于等效脉冲粗精两级精细化时间数字转换电路

2.1 等效脉冲 TDC 工作原理

GM-APD 激光测距系统基于光子飞行时间 TOF (Time-of-Flight) 原理实现对目标的距离探测,时间数字转换器 TDC 作为测距系统的核心模块其计时量程和计时精度直接决定了 GM-APD 激光测距系统的性能。采用时钟等相差相移结构生成等效的高频脉冲

取代脉冲计数法中的高频计数时钟,在提升 TDC 测量精度的同时,避免了延时线内插产生的非线性误差,其等效的高频计数时钟产生原理如图 3 所示。

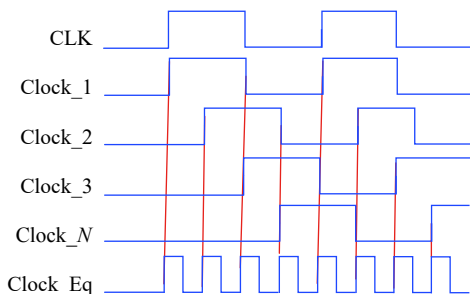


图 3 等效高频计数时钟产生原理

Fig.3 Generation principle of equivalent high frequency counting clock

CLK 为系统的参考时钟, Clock_1~Clock_N 为 CLK 经过同频等相差相移后的低频时钟,使每个时钟分别连入 N 个计数器 Counter, Clock_Eq 为本系统等效的 TDC 高频计数时钟。当参考时钟 CLK 的初始频率为 f 时,经过相差相移后的时钟相位分别为 $0, 2\pi/N, 4\pi/N, \dots, 2(N-1)\pi/N$, 每路 Clock 上升沿均会驱动相应的 Counter 计数,将计数器结果相加即等效为单计数器被倍频为 N 倍,此时的脉冲等效时钟频率为 Nf 。采用等效脉冲计数法的最终等效计数频率 Clock_Eq 可以表示为:

$$\text{Clock_Eq} = Nf \quad (3)$$

因此采用时钟等相差相移的等效脉冲计数法可以替换直接计数法中的高频计数时钟,相较于延时线内插方法,结构更为简单。

2.2 基于等效脉冲粗精两级精细化时间数字转换电路

为实现 GM-APD 单光子测距系统的远距离宽量程高精度探测,基于 2.1 节等效脉冲 TDC 工作原理,文中提出了一种基于等效脉冲粗精两级的精细化 TDC 设计方案。首先将待测的时间间隔分为粗计数和精计数两部分,如图 4 所示。

其中 Start 为启动计数的触发信号, Stop 为停止计数的触发信号,两个信号之间的时间段 T_{actual} 即为待测的 TOF 时间。对于待测时间量 T_{actual} ,首先通过时间间隔为 T_{LSB1} 的周期性时钟对待测时间进行粗量化,即为粗计数,所得高段位量化值 $T_1 = mT_{LSB1}$,其中 m 为计数器粗测量的计数值,粗量化产生的量化误差为 T_{e1} 。

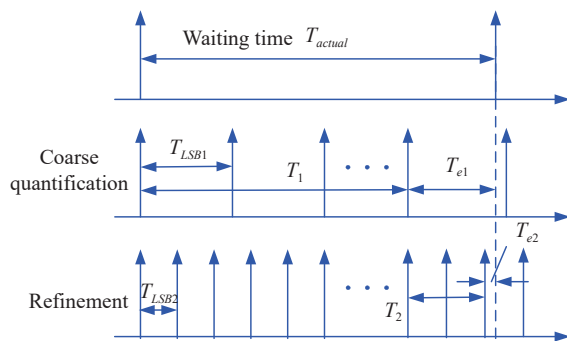


图 4 两级 TDC 时间量化原理

Fig.4 Principle of two-stage TDC time quantization

$$T_{e1} = T_{actual} - mT_{LSB1} \quad (4)$$

再将粗计数量化产生的量化误差 T_{e1} ,采用等效脉冲的高频时钟周期进行精量化,即为精计数,量化值 $T_2 = nT_{LSB2}$,其中 n 为精测量的计数值,精量化产生的误差为 T_{e2} 。

$$T_{e2} = T_{e1} - nT_{LSB2} \quad (5)$$

总的量化时间 T_{actual} 的表达式如下:

$$T_{actual} = T_1 + T_2 + T_{e2} = mT_{LSB1} + nT_{LSB2} + T_{e2} \quad (6)$$

两段式 TDC 总的量化误差为 T_{e2} ,且 T_{e2} 满足:

$$0 \leq |T_{e2}| \leq T_{LSB2} \quad (7)$$

量化时间 T 主要由 mT_{LSB1} 构成,即粗量化决定其量程。当 TDC 参考时钟为 CL Hz 时,其粗量化的最小 LSB 为 $1/CL$,假定计数器的位数为 M ,则粗计数的量程为:

$$\Delta T = 2^M \times \frac{1}{CL} \quad (8)$$

此时 GM-APD 单光子测距的距离量程为:

$$\Delta L = 2^M \times \frac{1}{CL} \times 3 \times 10^8 \times \frac{1}{2} \quad (9)$$

分段 TDC 的最终分辨率 LSB 由 LSB_2 决定,即 $LSB = LSB_2$ 。粗精两级的时间数字转换工作时序如图 5 所示。

当激光器出射激光后同时发送 Start 信号至 TDC,此时粗量化 Coarse TDC 开始计时,其测量精度为参考时钟信号周期,同时精量化 Fine TDC 模块也量化出 Start 信号与 CLK 信号的余量;当 GM-APD 接收到目标回波信号后,通过光电转换,将其转换为 Stop 信号输入至 TDC 当中,Coarse TDC 停止计数,与此同时 Fine TDC 量化出 Stop 信号与 CLK 信号的余量,主

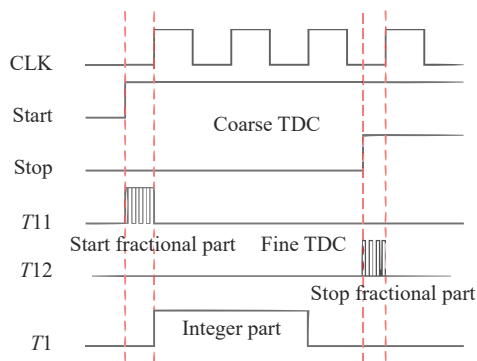


图 5 粗精两级 TDC 时序

Fig.5 TDC timing of coarse and fine two stages

机读取 Coarse TDC 和 Fine TDC 的数据, 处理得到目标距离。

为了进一步提升系统的计时精度, 提高资源利用率, 采用时钟双沿计数方法, 即将各时钟分别连接两个计数器 Counter, 分别为上升沿触发和下降沿触发, 当 TDC 的原始输入时钟频率为 f 时, 经过相差相移后的时钟相位分别为 $0, \pi/N, 2\pi/N, \dots, (N-1)\pi/N$, 时钟间

的相位差为 π/N , 此时, 等效脉冲的高频时钟频率为:

$$\text{Clock_Eq} = 2Nf \quad (10)$$

其原理如图 6 所示。

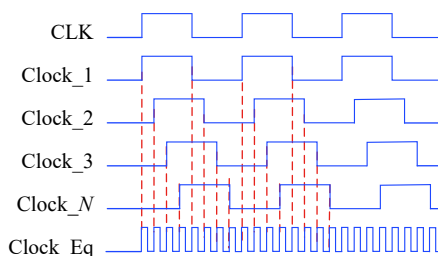


图 6 等效高频计数时钟产生原理

Fig.6 Generation principle of equivalent high frequency counting clock

CLK 为 TDC 的原始相位时钟, $\text{Clock}_1 \sim \text{Clock}_N$ 为经过同频等相差相移后的计数时钟, 从 $\text{Clock}_1 \sim \text{Clock}_N$ 每个时钟后分别连接两个 Counter, Clock_Eq 代表着该设计 TDC 的等效高频计数时钟, 其结构如图 7 所示。

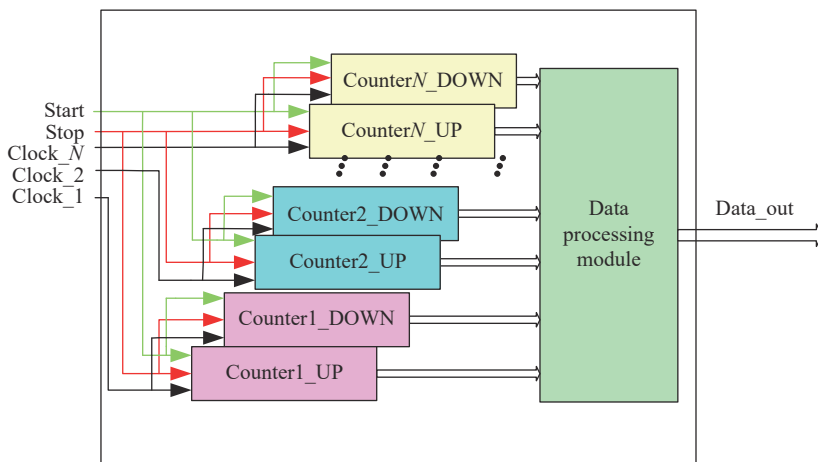


图 7 TDC 内部计数器单元结构

Fig.7 Internal counter unit structure of TDC

因此使用时钟等相差相移取代直接计数法中的高频计数时钟、多计数器双沿间隔计数取代进位延时线复杂结构, 不但减小 TDC 模块非线性误差, 同时将 TDC 的精计时的时间分辨率提升了 $2N$ 倍。

3 基于等效脉冲两级时间数字转换的 GM-APD 激光测距系统设计

文中采用的 FPGA 芯片型号 xc7 z100 ff900-2, 其参考时钟为 50 MHz, 首先, 文中将参考时钟作为该

测距系统的粗计数时钟, 此时粗计数 (Coarse TDC) 周期为 20 ns (50 MHz); 其次, 并采用 FPGA 内部自带的 MMCM 模块配置 IP, 输出多路同频等相差相移时钟, 该 FPGA 的 MMCM 模块最大输出时钟路数为 7, 最大工作频率为 709.723 MHz。为提升测距系统的精度, 采用倍频模块将系统的参考时钟倍频为 200 M, 通过配置 MMCM 模块, 输出 6 路同频等相差相移 $\pi/6$ 的时钟, 即 6 路相移分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 125^\circ, 150^\circ$, 周期为 200 MHz 的时钟。每路时钟分别与两个

计数器相连接,分别为上升沿和下降沿触发,其等效时钟为 2400 MHz,此时精计数 (Fine_TDC) 周期为 416.67 ps (2400 MHz),系统的距离分辨率可表示为:

$$\Delta L = \frac{416.67 \text{ ps} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2} = 0.0625 \text{ m} \quad (11)$$

每个计数器的存储为 16 bit, TDC 的最大量程为:

$$\Delta T = 20 \text{ ns} \times 2^{16} = 1.31072 \text{ ms} \quad (12)$$

此时,GM-APD 单光子测距系统的最大探测距离为:

$$L = \frac{1}{2} \times 1.31072 \text{ ms} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 196.608 \text{ km} \quad (13)$$

GM-APD 激光测距系统的工作时序由 FPGA 提供,系统的整体工作时序见图 8,系统上电后首先完成系统的初始化,配置 GM-APD、激光器以及 TDC 模块的参数,初始化完成后,FPGA 分别发送两路 Start 信号分别触发激光器出射激光和 TDC 开始计数,激光在目标表面发生漫反射后经接收光学镜组汇集到 GM-APD 焦平面,通过读出电路生成 Stop 信号发送至 TDC,TDC 接收到停止信号,停止计时。TDC 未接收到 Stop 信号其会持续计数直至计数器计满,并将计时数据进行输出,同时系统复位准备下一次探测。

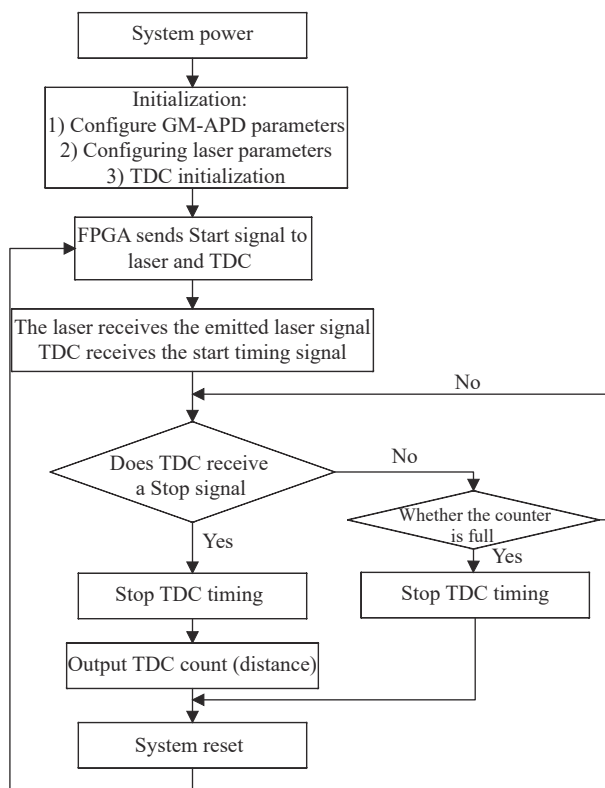


图 8 激光测距系统的工作流程

Fig.8 Work flow of laser ranging system

4 模拟仿真与实验验证

4.1 TDC 仿真实验

4.1.1 TDC 精度仿真

文中基于 Vivado 软件仿真验证基于等效脉冲粗精两级时间数字转换电路性能。设置 TDC 电路参考时钟为 50 MHz,此时粗计数 (Coarse TDC) 周期为 20 ns,将系统 50 MHz 参考时钟倍频为 200 MHz 输入至分频模块,分频模块分别输出 0°、30°、60°、90°、120°、150°相位延时周期为 200 MHz 的时钟。其 RTL 结构图如图 9 所示。

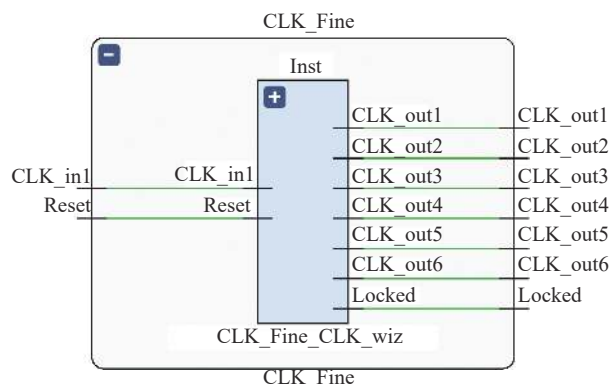


图 9 分频模块 RTL 结构图

Fig.9 RTL structure diagram of frequency division module

每一路时钟信号分别连接两个计数器,分别为上升沿触发和下降沿触发,最后将所有计数器结果进行累加输出,即为精计数值。结合粗计数结果,即可实现高精度计时。基于等效脉冲粗精两级精细化时间数字转换电路 RTL 结构图如图 10 所示。

设置起始信号 Start 到达时间为 19980 ns,停止信号 Stop 到达时间为 20474 ns。其中精计数 (Fine) 周期为 416.67 ps,对单通道计数单元计时结果进行仿真,如图 11 所示。

由此可见,Start 信号触发 TDC 开始计时,时刻 t_1 为 19980 ns,Stop 信号触发 TDC 结束计时,时刻 t_2 为 20474 ns,粗计数值 N 为 25, n_1 与 n_2 为精计数值分别为 98、156,结合计时分辨率,可得到光子飞行时间为:

$$t = (n_1 - n_2) \times 0.4167 + N \times 20 = 494.1662 \text{ ns} \quad (14)$$

仿真输入 Start 信号与 Stop 信号上升沿之间的时间间隔为 494 ns, TDC 的最小有效单元 LSB 为 1 s / (200 M×12)=0.4167 ns,因此计数结果为 494.1662 ns,

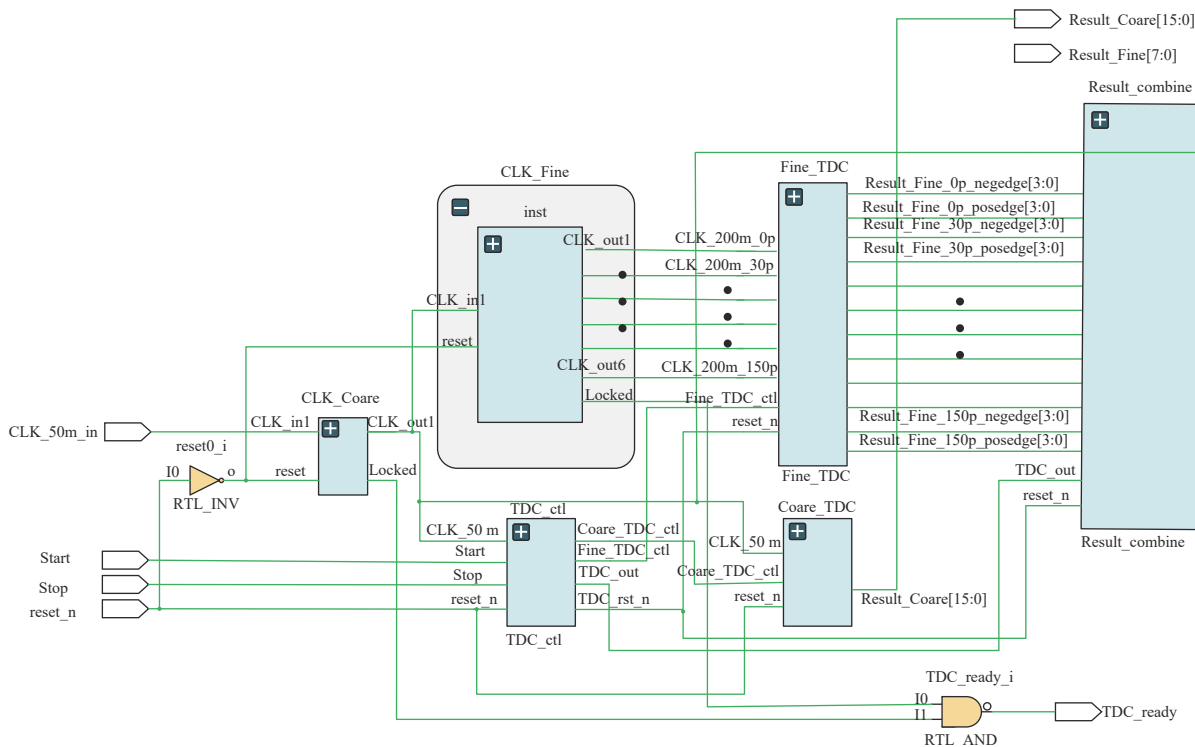


图 10 精细化时间数字转换电路 RTL 结构图

Fig.10 RTL structure of fine time digital conversion circuit

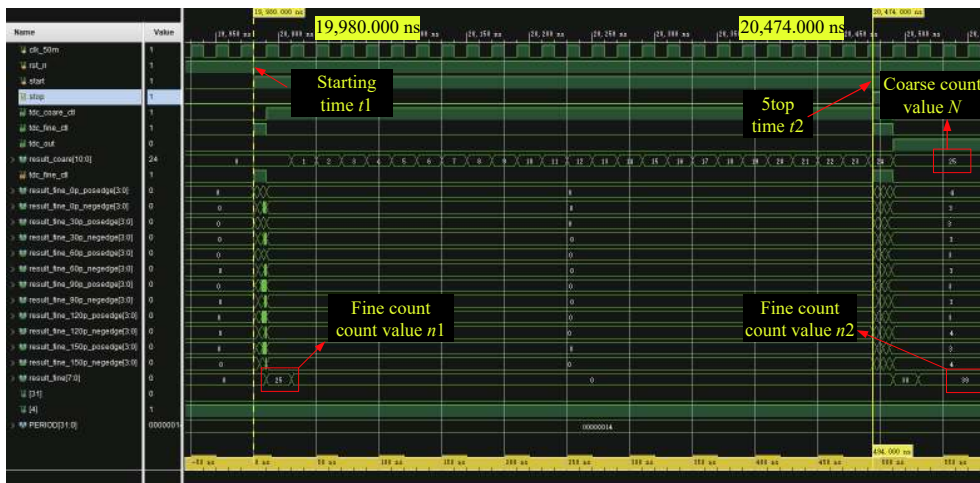


图 11 TDC 计时结果

Fig.11 Timing results of TDC

总误差为 0.1662 ns, 此时的 TDC 模块的测量结果与设计相符。

4.1.2 TDC 量程仿真

为验证文中设计的基于等效脉冲粗精两级时间数字转换 (TDC) 电路量程, 采用 16 bit 计数器, 设置 Start 信号到达时间为 10010 ns, Stop 信号到达时间为 1400000 ns, 基于 Vivado 软件进行仿真, 计时结果如

图 12 所示。

可见计数器的最大计数值为 65 535, 计时时间为 1 320 730 ns, 则 TDC 的计时量程为:

$$M = 1\ 320\ 730 - 10\ 010 = 1\ 310\ 720\ \text{ns} \quad (15)$$

与理论值相符, 此时测距系统的最大测距量程可表示为:

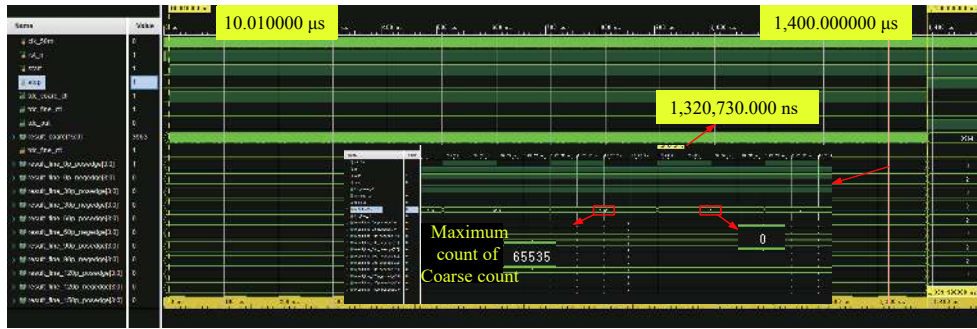


图 12 TDC 计时结果

Fig.12 Timing results of TDC

$$L = \frac{1\,310\,720\text{ ns} \times 3 \times 10^8\text{ m/s}}{2} = 1\,966\,08\text{ m} \quad (16)$$

4.2 测距系统精度测试

为进一步验证文中设计的基于等效脉冲两级时间数字转换的 GM-APD 激光测距系统性能, 分别进行室内、室外测距实验, 由于 GM-APD 为概率统计型器件, 需要多帧统计获得目标的距离值, 文中采用 100 帧探测数据进行关联, 通过直方统计法获得一次探测的距离值^[20]。

4.2.1 室内测距实验

为验证基于文中所提 TDC 的单光子测距系统的距离测量精度, 将目标分别置于 6、7、8、9、10 m 位置, 目标场景如图 13 所示。



图 13 室内实验场景

Fig.13 Laboratory experiment scene

采用文中设计的测距系统进行测距实验, 针对每一个距离值, 分别进行 100 次探测, 取均值作为该位置的探测距离, 测距结果如表 1 所示。

表 1 室内实验

Tab.1 Laboratory experiment

L/m	L_Max/m	L_Min/m	Mean/m	RMSE/m	Error/cm
6	6.0938	5.9063	5.9512	0.0938	4.88
7	7.1250	6.9375	6.9694	0.0768	3.06
8	8.1563	7.9688	7.9856	0.0556	1.44
9	9.0938	8.8125	8.9812	0.0919	1.88
10	10.2188	9.7500	10.0562	0.0967	5.62

可见室内实验最大均方根误差为 0.0938 m, 表明测距系统测距结果较为稳定; 最大测距误差为 5.62 cm, 该误差主要来源于激光器出光抖动、激光器脉宽和 GM-APD 的统计特性, 实测的平均测距误差均小于测距系统的距离分辨率 6.25 cm, 与设计结果相符, 说明基于文中设计 TDC 的单光子测距系统可以较为准确的测得目标的距离信息。

为进一步分析文中所提两级时间数字转换电路的稳定性, 分别对 6、7、8、9、10 m 处目标的 100 次相对位置测距进行分析, 如表 2 所示。

表 2 相对位置测距实验

Tab.2 Relative position ranging experiment

Relative position/m	Truth/m	Mean/m	RMSE/m	Error/cm
6-7	1	1.0181	0.1084	1.81
7-8	1	1.0163	0.0958	1.63
8-9	1	0.9956	0.1017	0.44
9-10	1	1.0012	0.1068	0.12

对目标相对位置进行测量时, 其最大的测距误差为 1.81 cm, 小于对各个位置距离测量的绝对误差, 其主要原因为对各个位置测量时, 测距系统的各个模块

对测距结果均有影响,而相对位置测量的误差主要来源于文中设计的时间数字转换电路。该误差小于时间分辨率 6.25 cm,证明文中设计的 TDC 具有较强的稳定性。

4.2.2 室外测距实验

为验证文中设计时间数字转换电路在远距离测距的性能,对两处居民楼进行测距实验。首先采用 Onick 10000 CI 测距仪对两处居民楼距离进行初步测量,作为文中设计的单光子测距系统实测距离值的参考。两处居民楼的距离值约为 1457 m 和 2616.5 m,实验场景如图 14~15 所示。



图 14 (a) 1457 m 居民楼; (b) 测距仪测距结果

Fig.14 (a) 1457 m residential building; (b) Ranging results of the rangefinder

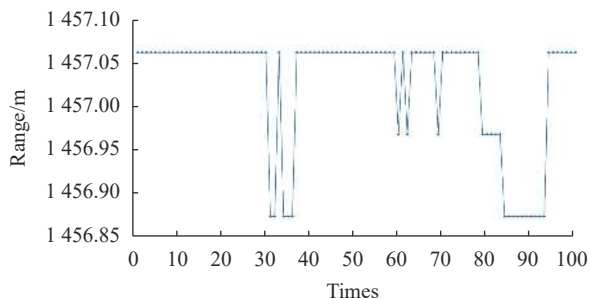


图 16 1457 m 测距结果

Fig.16 Ranging results at 1457 m

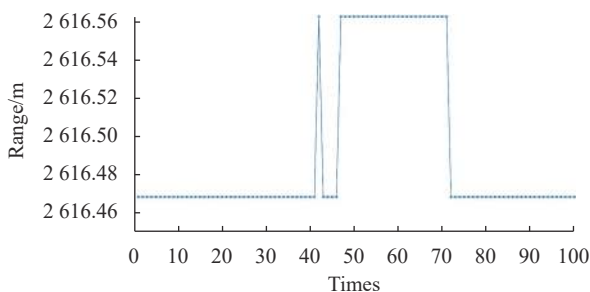


图 17 2616.5 m 测距结果

Fig.17 Ranging results at 2616.5 m

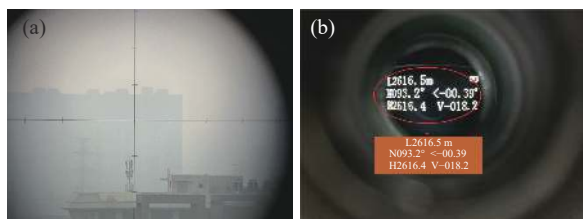


图 15 (a) 2616.5 m 居民楼; (b) 测距仪测距结果

Fig.15 (a) 2616.5 m residential building; (b) Ranging results of the rangefinder

采用文中设计的测距系统分别对两处居民楼进行行距离探测,重复实验 100 次,获得测距结果图 16~17 所示。对探测的数据进行分析,如表 3 所示。

实验表明:文中搭建的单光子测距系统对两处居民楼的测距结果分别为 1457.0269 m 和 2616.4930 m,与参考距离较为接近;且测距系统的方差分别为 0.0048 m 和 0.0017 m,表明测距系统获得的距离值波动较小。综上,文中基于等效脉冲粗精两级精细化时间数字转换电路的单光子测距系统具备远距离探测能力,若进一步增加激光器的出射能量,测距系统可以完成最大 196.608 km 目标的距离探测。

表 3 室外实验

Tab.3 Outdoor experiment

Reference range/m	L_Max/m	L_Min/m	Mean/m	Var/m
1457	1457.0625	1456.8750	1457.0269	0.0048
2616.5	2616.5625	2616.4687	2616.4930	0.0017

5 结论

为实现 GM-APD 激光测距系统的高精度、宽量程探测,文中设计了一种远距离单光子测距的精细化时间数字转换电路,并在 FPGA 上实现了一个高精度、高稳定性、易扩展的 TDC 模块。该方法采用粗精两级计数、同频相移等相位差时钟信号、双边沿精密时间计数的 TDC 设计方法,实现对光子飞行时间的宽量程、高精度测量。实验结果表明:采用粗精两级计数体制后,可有效地降低 TDC 计时精度对其量程的限制,解决了宽量程与高精度矛盾的问题;经等相差相移结构生成等效高频脉冲时钟可以有效地取代 FPGA 系统内部的高频时钟,当参考时钟为 50 MHz,精计数采用 6 路时钟等相差相移 $\pi/6$ 时,TDC 的计时

分辨率为 416.67 ps, 计时量程达 1.31 ms, 即距离分辨率为 6.25 cm, 测距量程为 196.608 km。对室内 10 m 处目标进行 100 次测距重复实验, 测距误差为 5.62 m, 对室外参考距离为 2616.5 m 处目标进行测距实验, 测距的方差为 0.0017 m, 表明基于文中等效脉冲粗精两级精细化时间数字转换电路的单光子测距系统具备远距离探测能力, 可以实现远距离目标的高精度、宽量程测量。

此外, 文中所提精细化时间数字转换电路结构相对简单灵活, 采用的计数器位数为 16 位, 同频等相差相移的时钟个数为 6, 通过提升计数器位数和相移的时钟个数可进一步提升 TDC 转换量程和计时精度, 因此, 在其他高精度时间间隔测量领域均具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Xu Z Y, Tang L Z, Zhang H X, et al. Simultaneous real-time ranging and velocimetry via a dual-sideband chirped lidar [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(24): 2254-2257.
- [2] Liu Bo, Jiang Yun, Wang Rui, et al. Technical progress and system evaluation of all-time single photon lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(1): 20220748. (in Chinese)
- [3] Shen Shanshan, Chen Qian, He Weiji, et al. Research and realization on performance of single photon counting ranging system optimizing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0217001. (in Chinese)
- [4] Shen G Y, Zheng T X, Du B C, et al. Near-range large field-of-view three-dimensional photon-counting imaging with a single-pixel Si-avalanche photodiode [J]. *Chinese Physics Letters*, 2018, 35(11): 114204.
- [5] Liu Qiaoli, Liu Chang, Wang Yitong, et al. Development of silicon single photon detector and its application in high-precision satellite-to-ground time comparison (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 20211004. (in Chinese)
- [6] Wu Jingyun, Liu Zhaoguo, Zhang Tong. Research progress of infrared single-photon detection with high gain (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 20211016. (in Chinese)
- [7] Liu Bo, Yu Yang, Jiang Shuo. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 21-33. (in Chinese)
- [8] Shan Jie, Tian Xiangxi, Li Shuang, et al. Advances of spaceborne laser altimetry technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 964-982. (in Chinese)
- [9] Zhang M, Wang H, Liu Y. A 7.4 ps FPGA-based TDC with a 1024-unit measurement matrix [J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 865.
- [10] Xie W, Chen H, Li D. Efficient time-to-digital converters in 20 nm FPGAs with wave union methods [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 99: 1.
- [11] Pa K M, Strzempek P, Korcyl G, et al. Multichannel FPGA based MVT system for high precision time (20 ps RMS) and charge measurement [J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12(8): 08001.
- [12] Zheng Yangde, Yin Jun, Bai Xiao, et al. Single-channel time-amplitude conversion circuit design [J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2017, 37(7): 663-666. (in Chinese)
- [13] Zhong Yumin, Kong Wei, Qiu Yanqing, et al. Design of a multi-channel time-resolved single-photon detection system for laser induced spectrum detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(12): 1204001. (in Chinese)
- [14] Hou Libing, Guo Ying, Huang Genghua, et al. A time-to-digital converter used in photon-counting LIDAR [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(3): 243-247. (in Chinese)
- [15] Zhang Qiwen, Chen Honglei, Ding Ruijun. High precision time-to-digital conversion circuit for mercury cadmium telluride APD detector at 77 K [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(1): 362-369. (in Chinese)
- [16] Liu Xu, Li Yunduo, Ye Lianhua, et al. Pixel-level high resolution and low error rate time-to-digital converter circuit of single photon detection InGaAs avalanche focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210009. (in Chinese)
- [17] Li Encheng, Huang Ming, Zhou Yuanhan, et al. High resolution short time interval measurement system based on FPGA [J]. *Industrial Technology Innovation*, 2022, 9(5): 81-90. (in Chinese)
- [18] Wang Wei, Li Jie, Dong Yongjian, et al. A FPGA-based time-to-digital converter with shifted clock sampling technique [J]. *Microelectronics*, 2016, 46(1): 58-61. (in Chinese)
- [19] Xu Lu, Yang Xu, Wu Long, et al. Restrain range walk error of Gm-APD lidar to acquire high-precision 3D image [J]. *Infrared*

and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20200218. (in Chinese)

accuracy analysis of single photon ranging system [J]. *Infrared*

[20] Liu Chenghao, Chen Yunfei, He Weiji, et al. Simulation and

and Laser Engineering, 2014, 43(2): 382-387. (in Chinese)

Long distance single photon precision time digital conversion circuit based on FPGA

Xie Da¹, Wang Chunyang^{1,2*}, Yuan Kai¹, Wei Xuyang², Liu Xuelian²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Active Photoelectric Imaging Detection Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract:

Objective Single photon ranging system is a system that uses the photon level detection sensitivity of GM-APD detector and obtains the distance information of far-field target based on the principle of photon time-of-flight ranging. The system has the advantages of long range and high ranging accuracy, and has great application potential in laser imaging, target detection and other fields. As the core module of single photon ranging system, the range and accuracy of time digital conversion circuit directly determine the working range and ranging accuracy of the ranging system. And in the field of spaceborne detection, the ranging system is required to have the ranging range of more than 100 km and centimeter-level ranging accuracy. At this time, the traditional time digital conversion circuit, limited by the counter number, in order to ensure the ranging accuracy, often lead to the limited system's measuring range, and if the system's range is increased, the system's ranging accuracy is difficult to meet the needs. In this paper, a time digital conversion circuit satisfying both wide range and high precision is designed to realize the wide range and high precision measurement of photon flight time interval. It provides technical support for single photon ranging in the field of spaceborne laser detection.

Methods In order to solve the contradiction between wide range and high precision, a refined time digital conversion circuit design method for long-distance single photon ranging is proposed. Firstly, based on the piecewise counting principle, a coarse and fine two-stage counting architecture is designed to ensure the wide range measurement of TDC (Fig.5, Fig.10). Secondly, for the fine counting unit, the clock equal phase shift π/N is used to generate an equivalent high-frequency pulse clock (Fig.6), which improves the timing accuracy of the fine counting unit by N times. The timing accuracy of the fine counting unit was further improved to $2N$ times by using the multi-counter double-edge interval counting method (Fig.7).

Results and Discussions Vivado software was used to verify the accuracy and range of the proposed algorithm, and the simulation results of the accuracy (Fig.11) and range (Fig.12) were given. In order to further verify the performance of GM-APD laser ranging system designed in this paper based on equivalent pulse two-stage time digital conversion circuit, the indoor and outdoor ranging experiments were carried out respectively, and the indoor ranging results (Tab.1) and outdoor ranging results (Fig.16-17, Tab.3) were given. The experimental results show that the coarse and fine two-stage counting system can effectively reduce the limit of TDC timing accuracy to its range. The timing resolution of TDC is 416.67 ps, and the ranging range is 196.608 km, which solves the contradiction between wide range and high precision.

Conclusions A fine time digital conversion circuit for distance single photon ranging is designed, and a TDC module with high precision, high stability and easy to expand is implemented on FPGA. By using the TDC design method of coarse and fine two-stage counting, the clock signal of the same frequency phase shift and equal phase difference, and the two-side edge precision time counting, the wide range and high precision measurement of photon flight time are realized. The structure of the proposed refined time digital converter circuit is relatively simple and flexible. The number of counter bits is 16 and the number of clocks with equal phase shift in the same frequency is 6. The range and timing accuracy of TDC conversion can be further improved by increasing the number of counter bits and the number of clocks with phase shift.

Key words: single photon; laser ranging; time digital conversion; equivalent pulse; GM-APD

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2022YFC3803702)