

多波束单光子雷达的多通道计时测量

汪琳莉, 吴琛怡, 祁慧宇, 郑天翔, 潘海峰, 杨雷*, 李召辉, 吴光**

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241

摘要 多波束单光子雷达在对地测绘和远距离成像等领域具有重要应用, 而多通道计时测量技术很大程度上决定了整个系统的性能。因此, 提出了一种基于时钟相移法的多通道时间数字转换并行测量方法。该方法可在单块 Xilinx Artix-7 系列现场可编程门阵列芯片上实现了 100 通道单光子信号的同时计时测量, 计时分辨率可达到 1.0 ns, 测量精度为 360 ps, 量程为 65 μ s。基于该装置可实现稳定性高、功耗小、速度快、结构紧凑的多通道单光子回波信号的高精度测量, 满足多波束单光子雷达系统的计时需求。

关键词 探测器; 单光子雷达; 时钟相移法; 现场可编程门阵列; 计时测量

中图分类号 TH714

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0204001

Multi-Channel Timing Measurement for Multi-Beam Single-Photon Radar

Wang Linli, Wu Chenyi, Qi Huiyu, Zheng Tianxiang, Pan Haifeng, Yang Lei*,

Li Zhaohui, Wu Guang**

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract Multi-beam single-photon radar has important applications in fields such as earth surveying and long-range imaging, and multi-channel timing measurement technology significantly determines the performance of the entire system. Therefore, we propose a parallel measurement method of multi-channel time-to-digital conversion based on clock phase shifting method. Through a single Xilinx Artix-7 series field-programmable gate array chip, the method can realize the simultaneous timing measurement of 100 channels single-photon signal. The timing resolution of 1.0 ns, the measurement accuracy is 360 ps, and the range of 65 μ s. Based on the device, the multi-channel single-photon echo signal measurement are remarked on the advantages as high stability, low power consumption, high speed, and compact structure, which meets the timing requirements of the multi-beam single-photon radar.

Key words detectors; single-photon radar; clock phase shifting method; field-programmable gate array; timing measurement

1 引言

激光雷达主要将激光主动照射在目标物体上, 通过接收目标物体漫反射产生的回波信号获取目标物体的距离和位置信息。多波束激光雷达广泛应用于地形探测、对地测绘、星地探测等领域。多

波束单光子雷达能够快速获取超远距离目标的多点高精度距离信息^[1-8], 如何并行测量多路激光回波光子信号的飞行时间是其中的关键技术之一, 即同时实现回波信号时间的高精度探测和多通道回波的并行计时。

回波信号的时间测量本质上是高精度时间数字

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-03-09; 录用日期: 2021-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(11804099, 11774095)

通信作者: *lyang@lps.ecnu.edu.cn; **gwu@phy.ecnu.edu.cn

转换(TDC)技术,本文使用的测量装置是平均时间抖动为 800 ps 的多通道低噪声高效单光子探测器^[9]。单光子雷达系统的平均时间抖动包含激光器的脉冲宽度、探测器的时间抖动以及计时系统的时间抖动。为了平衡测量精度和系统资源,将计时系统的时间分辨率设定为 1.0 ns。专用 TDC 芯片^[10-11]的测量精度较高,甚至能达到百皮秒量级,但在通道数量上的提升空间有限,如 TDC720x 系列芯片最多支持 2 通道测量, TDC-GPX2 系列芯片最多支持 12 通道测量。为了突破测量通道的限制,基于现场可编程门阵列(FPGA)的 TDC^[12-18]测量技术得到了人们的广泛研究,但受 FPGA 自身带宽的限制,通常无法在 FPGA 内部直接实现分辨率为 1 ns 的计数,一定程度上限制了该技术的应用。延迟链法^[12-13]和时钟相移法^[14-15]可突破这些限制,其中,延迟链法中多个超前快速进位逻辑结构(CARRY4)在底层呈链状分布,利用不同单元间的延时单元构成最小分辨率,从而使分辨率达到皮秒量级,但该方法占用的底层资源过大;时钟相移法将 FPGA 内部最小的时钟单元利用锁相环(PLL)时钟产生器进行相位偏移,并等分成具有固定相移的多通道时钟信号,从而提高计数器的分辨率,占用的资源相对较少、性价比较高。为了实现 1 ns 的测量精度,选用时钟相移法得到资源利用小、结果稳定、无需过多校准的测量结果,且该方法采用自带的固有资源,测量方便、快捷。为了匹配多通道单光子探测器系统,对 100 个光束的回波单光子探测信号实现同时响应和采集,本文提出了一种基于 FPGA 时钟相移法的多通道计时方法,并结合 100 通道单光子探测器完成了实验验证。

2 时间间隔的测量原理

单光子测距系统采用脉冲飞行时间测距(TOF)方法与时间相关单光子符合计数(TCSPC)技术进行测距。TCSPC 系统可以记录每个激光脉冲周期内激光同步信号(START)与回波光子计数脉冲信号(STOP)之间的时间间隔,经过多个激光脉冲周期的累积,光子信号与激光同步信号之间的时间间隔形成光子计数峰分布。

TDC 主要是对时间间隔进行测量,将一个频率已知的方波信号作为参考时钟信号,在时间间隔内对时钟信号进行计数,获取时间值。时间间隔一般由上升沿的时间差决定,本方法将传统基于脉冲计数的时间间隔测量方法转换成粗细计数结合的方

式。其中,粗计数以主时钟为参考信号进行脉冲计数,细计数采用时钟相移采样方法进行计数,基本思路是将传统基于脉冲计数的时间间隔测量转换成用多路固定相移时钟同时对一路输入信号进行采样,将周期时钟等效量化为固定间隔的不同时钟区域。

图 1(a)为时钟相移采样的原理,在时钟相移采样过程中,将时钟信号进行数字移相后得到 4 路频率相同、相位依次相差 $\pi/2$ 的多路时钟信号(CLK_1、CLK_2、CLK_3、CLK_4),4 路时钟信号用 D-寄存器对输入信号进行采样(D-寄存器内,D 为信号输入接口,C 为触发时钟输入接口,Q 为信号输出接口,Rst 为复位接口)。图 1(b)为时钟相移的采样时序图,其中,INPUT 信号表示含有边沿跳变的输入信号,采样信号分别为 4 个时钟采样的信号。这 4 个信号合成 4 位寄存器输出信号,寄存器输出信号存在三个状态,分别为采样前“0000”、采样中“0001”、采样后“1111”,其中,采样中“0001”就是细计数的输出值。

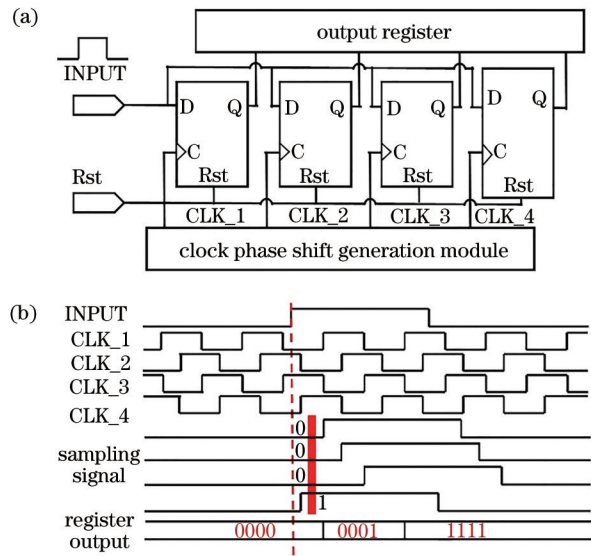


图 1 时钟相移采样的原理。(a)底层结构图;(b)采样时序图
Fig. 1 Principle of clock phase shift sampling. (a) Low-level structure diagram; (b) sampling timing diagram

3 多波束单光子雷达的设计与实现

多波束单光子雷达系统主要由激光发射端、接收端和 FPGA 控制模块组成,如图 2 所示。激光发射端由激光器和将光纤光转换成空间光的准直器组成;激光接收端由接收光信号的 1×100 光纤阵列和通过 100 根光纤连接的 100 通道单光子探测器组成;FPGA 控制模块主要包括产生多路均匀相移的时钟模块、实现 TDC 功能的计时模块、用于数据传

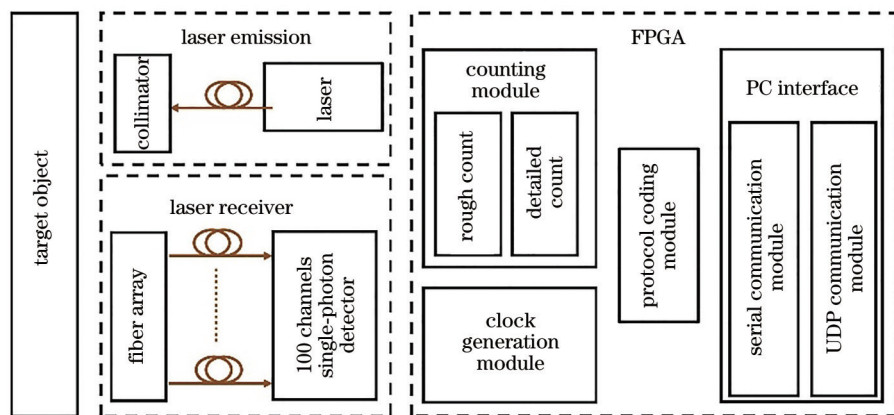


图 2 基于FPGA的多波束激光雷达系统装置框图

Fig. 2 Block diagram of multi-beam radar system based on FPGA

输的协议编码模块、协助网口连接的串口通信模块和实现高速数据传输的UDP网口通信模块。通过UDP通信模块将测量后的100通道数据传输给计算机,由基于LabVIEW开发的上位机软件进行后续的数据分析和显示。

本系统基于单块Xilinx Artix-7系列XC7A100T芯片实现100通道TDC的计时与传输功能。XC7A100T是一款基于28 nm工艺的低功耗、高性能FPGA,本系统采用自顶向下的设计方法,将系统功能划分成4个模块,分别为时钟产生模块、单通道计时模块、数据处理模块以及通信接口模块。为了实现对多通道的TDC,采用模块复用方法将单通道计时模块重复调用101次,输入每个通道的数据信号并产生对应的数据信号,然后将其传输至数据处理模块进行后续处理。粗计数的计时数据位宽为14位,计数最大值为16384,计时间隔为4 ns,探测量程为65 μs 。

单光子雷达最显著的特点就是利用单光子探测器实现对回波光子信号的极限灵敏度响应。即使在无光子入射的情况下,APD器件内部的热噪声与量子隧穿效应也会导致探测器输出误计数^[18]。相比光信号,随机产生的误计数不具备时间相关性,但仍不可忽略。原因是误计数信号同样会转换成电信号输出,导致每个激光频率周期中单个通道接收到的回波信号不止一个。因此,根据探测器的性能判断激光频率周期中可能产生的误计数率,扩大每个通道存储的寄存器深度。图3为多波束单光子雷达信号的传输时序图,其中, T_{laser} 为激光脉冲(START信号)的时钟周期。为了便于分析,经后续处理解析获取时间间隔数据,经过多个激光脉冲周期累积,信号光子与激光发射信号具有时间相关

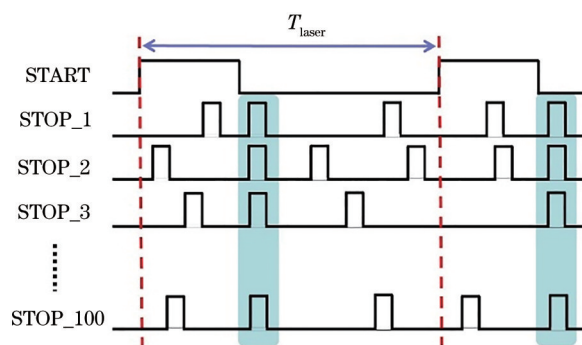


图 3 多波束单光子雷达信号传输时序图

Fig. 3 Transmission sequence of multi-beam single-photon radar signal

性,形成光子计数峰,而误计数呈随机分布,可通过筛选光子计数峰剔除。

4 实验结果与分析

4.1 时间分辨率和精度测试

为了测试TDC的性能,用双通道信号发生器产生频率为10 kHz,高电平脉冲宽度为100 ns的2路连续脉冲信号模拟START信号和STOP信号;通过信号发生器改变2路待测信号上升沿之间的时间间隔,以模拟实际测量中的激光测距距离。2路待测信号从2根等长电缆线进入Artix-7芯片,采集得到的数据经过网口传输给LabVIEW开发的上位机软件,经TCSPC累积后显示数据。TDC的分辨率为系统能分辨的最小时间间隔,由时间相移法设计最小分辨率为1.0 ns,测试时间间隔在200.0~203.5 ns范围,步进为0.5 ns的8组数据。图4为单通道的时间分辨率测试结果,计算得到测量值的分辨时间为1.0 ns。此外,测试结果中的延时与设定的时间间隔不一致是由2路信号的传输路径不一致造成的。

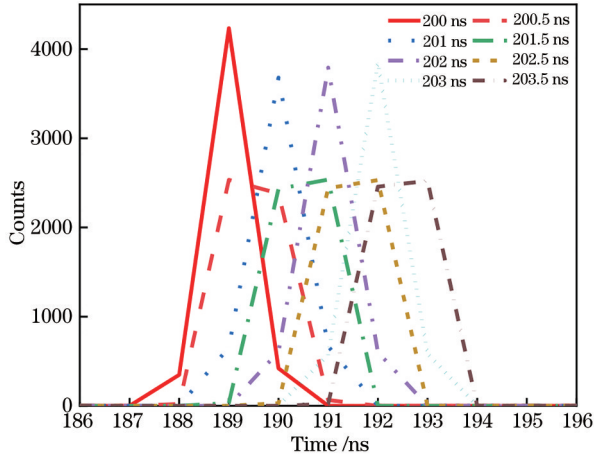


图 4 单通道的时间分辨率测试结果

Fig. 4 Time resolution test results of single channel

精度测试中,对同一通道进行多次测量后得到 1 组测量值,取其均方根值(RMS)为测量精度,可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (1)$$

式中, x_i 为实际测量值, \bar{x} 为所有测量值的平均值, n 为测量次数。

分别对 100 个通道的 TDC 进行数据采集,得到时间间隔在 200.0~400.0 ns 范围,步进为 1.0 ns 的 200 组数据。为了求其 RMS,增大数据的可靠性,每组数据测量了 20000 次,通过 LabVIEW 采集保存后用 Matlab 软件进行精度计算,测试结果如图 5 所示。可以发现,多数通道的测量精度集中在 300~

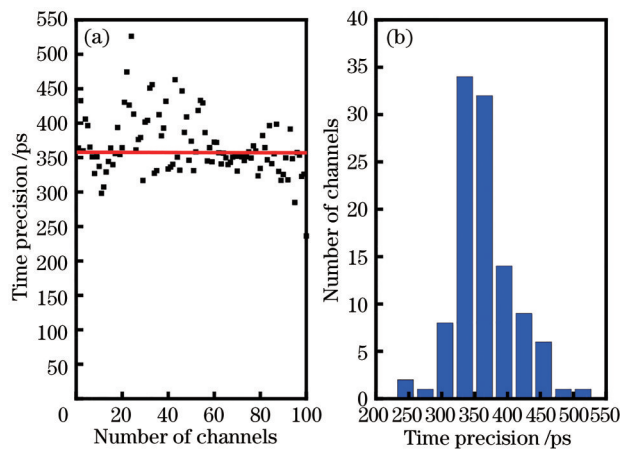


图 5 测量精度。(a) 100 通道的 TDC 测量精度;

(b) 测量精度的统计图

Fig. 5 Measurement precision. (a) TDC measurement precision of 100 channels; (b) statistical graph of measurement precision

400 ps 范围内,最小测量精度为 250 ps,最大测量精度为 525 ps,平均测量精度为 360 ps。

4.2 多波束激光雷达测试方案

4.2.1 系统误差校准

激光出射路径、光纤和信号线的长度以及电路板中各通道的布线会使各通道输出数据之间存在一个固定偏差。其中,激光的出射路径、光纤以及信号线间的延时由实际测试环境决定,而电路板中布线导致的偏差是固定误差,可通过标定修正。本系统中第 1 通道为延时最小的通道,对其余 99 通道与第 1 通道的相对延时进行标定后,通过上位机对每个通道的输出值进行修正,使各通道的测量数据一致。为了修正各通道的布线误差,用同一个光源、光纤、信号线逐一对每个通道进行测试,得到 100 个通道的系统误差如图 6 所示。

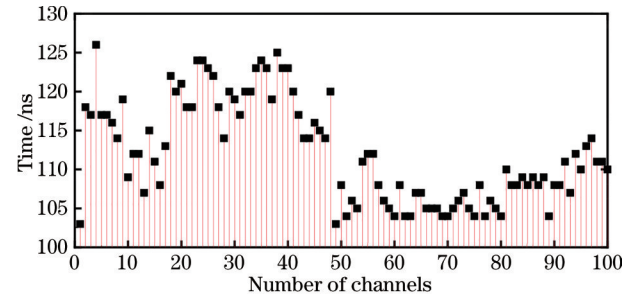


图 6 100 通道测量系统的误差校准

Fig. 6 Error calibration of 100 channels measurement system

4.2.2 单光子雷达多通道并行探测和计时测试

基于 100 通道单光子雷达系统,开展了测距精度的测试实验。影响系统测距精度的主要因素是其时间抖动和探测器探测到的回波光子数。统计数据分布曲线的半峰全宽(FWHM)对应探测系统的时间抖动,分布曲线的 RMS 对应探测系统的时间精度,FWHM 与 RMS 的换算关系可表示为

$$X_{FWHM} = 2 \times \sqrt{2 \times \ln 2} \times X_{RMS} \approx 2.35 \times X_{RMS}. \quad (2)$$

为了避免多光子漂移误差^[19],将回波率设置为每脉冲 0.06 个回波计数,整个测试系统的时间抖动包含激光的脉冲宽度 ΔT_{laser} 、探测器本身的时间抖动 ΔT_{APD} 以及计时系统的抖动 ΔT_{TDC} ,可表示为

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_{laser}^2 + \Delta T_{TDC}^2 + \Delta T_{APD}^2}. \quad (3)$$

实验中采用波长为 709 nm 的脉冲激光,脉冲宽度为 68 ps,单光子探测器的平均时间抖动为 800 ps,TDC 的平均时间测量精度为 360 ps,根据(2)式得到平均时间抖动为 846 ps,系统的时间抖动为 1166 ps。选取一块平整的墙面作为目标物体。

激光脉冲频率为 100 kHz, 经过衰减后照射到墙面, 用 1×100 的光纤阵列接收墙面反射的光子, 通过调节光纤衰减器控制激光的强弱, 以保证每个通道的回波率为每脉冲 0.06 个回波计数, 即每秒 6×10^3 个计数。实验测量时间为 100 s, 可得到 6×10^5 个回波测量结果, 根据 TOF 原理得到测量距离, 用其 RMS 作为每个通道的测距精度, 测距精度的计算结果如图 7 所示。可以发现, 系统对 100 通道的测距精度在 0.05~0.09 m 范围内, 平均精度为 0.075 m, 对应的平均时间精度为 500 ps, 时间抖动为 1175 ps, 与理论值(1166 ps)相符。

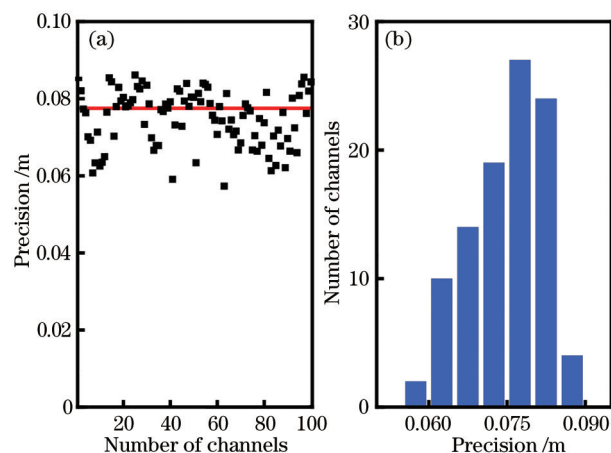


图 7 实验计算的测距精度。(a)散点图;(b)柱状图

Fig. 7 Ranging precision calculated by experiment.

(a) Scatter plot; (b) histogram

本系统利用 FPGA 的高速并行处理能力同时采集和处理 100 个通道的信号, 在采集与编码模块中用多级寄存器组进行数据流水线缓存并通过乒乓操作将数据存储和发送过程分开进行, 从而降低 TDC 传输的死区时间, 测量计算后的数据通过高速千兆网口传输。本系统将采集到的所有数据全部通过网口传输, 对上位机软件的解析及处理速率要求较高。如果将每通道数据在 FPGA 芯片中累积一段时间, 基于 TCSPC 进行去噪操作后再传输, 可提高测量速率, 进一步提升并行处理的通道数量, 满足更大规模的多波束单光子雷达系统。

5 结 论

提出了一种应用于多波束单光子雷达多通道并行计时测量的技术, 能高效测量 100 通道的时间信息, 时间分辨率为 1.0 ns, 时间测量精度达到 360 ps。结合皮秒脉冲激光器和 100 通道单光子探测器后, 系统的平均测距精度为 0.075 m。多通道

计时测量系统的集成度较高, 传输速度较快, 可应用于大规模的多波束单光子雷达系统, 在单光子远距离成像、遥感探测等领域发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] Ma J P, Shang J H, Sun J T, et al. Laser ranging system based on high-speed pulse modulation and echo sampling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0810004.
马建平, 尚建华, 孙嘉瞳, 等. 基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距系统[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0810004.
- [2] Yao J Q, Tang X M, Li G Y, et al. Cloud detection of laser altimetry satellite ICESat-2 and the related algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131408.
么嘉祺, 唐新明, 李国元, 等. 激光测高卫星 ICESat-2 云检测及其相关算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131408.
- [3] Lin J X, Hu C Y, Wang P W, et al. Improvement of photon-counting correlated imaging quality by multi-channel parallel detection[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0511001.
林俊秀, 胡晨昱, 王鹏威, 等. 多路并行探测提高光子计数关联成像质量研究[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0511001.
- [4] Dixon A R, Dynes J F, Sharpe A W, et al. Ultrashort dead time of photon-counting InGaAs avalanche photodiodes[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(23): 231113.
- [5] Komiyama S, Astafiev O, Antonov V, et al. A single-photon detector in the far-infrared range[J]. Nature, 2000, 403(6768): 405-407.
- [6] Liang Y, Zeng H P. Single-photon detection and its applications[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57(7): 1218-1232.
- [7] Yan P Q, Meng W D, Wang Y R, et al. Si-APD single-photon detector with high stability based on auto-compensation of temperature drift[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 080403.
颜佩琴, 孟文东, 王煜蓉, 等. 基于温漂自动补偿的高稳定性 Si-APD 单光子探测器[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 080403.
- [8] Quan J X, Zhang D S, Ding L E. Single photon detector of Si-APD with active technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(5): 43-46.
权菊香, 张东升, 丁良恩. Si-APD 单光子探测器的全主动抑制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43

- (5): 43-46.
- [9] Li Z, Wu E, Pang C, et al. Multi-beam single-photon-counting three-dimensional imaging lidar[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10189-10195.
- [10] Hou Z J, Ma H J, Wang K, et al. Design of a precise time interval measuring instrument base on TDC-GPX2[J]. Journal of Time and Frequency, 2017, 40(4): 213-220.
侯志军, 马红皎, 王康, 等. 基于 TDC-GPX2 的精密时间间隔测量仪设计[J]. 时间频率学报, 2017, 40(4): 213-220.
- [11] Yan F F, Ma H J, He Z M, et al. Development of high precision time interval counter based on FPGA and TDC chip[J]. Journal of Time and Frequency, 2019, 42(1): 33-42.
闫菲菲, 马红皎, 何在民, 等. 基于 FPGA 和 TDC 芯片的高精度时间间隔计数器研制[J]. 时间频率学报, 2019, 42(1): 33-42.
- [12] Zhao L, Hu X Y, Liu S B, et al. The design of a 16-channel 15 ps TDC implemented in a 65 nm FPGA [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(5): 3532-3536.
- [13] Zhang M Z, Wang H C. 8-channel high precision TDC technology based on FPGA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131203.
张孟翟, 王华闯. 基于 FPGA 的 8 通道高精度 TDC 技术[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131203.
- [14] Wang W, Li J, Dong Y M, et al. A FPGA-based time-to-digital converter with shifted clock sampling technique[J]. Microelectronics, 2016, 46(1): 58-61.
王巍, 李捷, 董永孟, 等. 一种基于 FPGA 的时钟相移时间数字转换器[J]. 微电子学, 2016, 46(1): 58-61.
- [15] Büchele M, Fischer H, Gorzellik M, et al. A 128-channel time-to-digital converter (TDC) inside a Virtex-5 FPGA on the GANDALF module[J]. Journal of Instrumentation, 2012, 7(3): C03008.
- [16] Pan W B, Gong G H, Li J M. A 20-ps time-to-digital converter (TDC) implemented in field-programmable gate array (FPGA) with automatic temperature correction [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(3): 1468-1473.
- [17] Wang J H, Liu S B, Shen Q, et al. A fully fledged TDC implemented in field-programmable gate arrays [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(2): 446-450.
- [18] Zhao F, Zheng L M, Liao C J, et al. Dark count probability for single-photon detector at infrared wavelengths[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(8): 29-32.
赵峰, 郑力明, 廖常俊, 等. 红外单光子探测器暗计数的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(8): 29-32.
- [19] Huang K, Li S, Ma Y, et al. Detection probability model of single-photon laser altimetry and its range accuracy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1110001.
黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子模式激光测高探测概率模型与精度分析[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1110001.