

超高重频卫星激光测距时序电路实现及应用

喻荣宗¹, 吴志波^{2,3}, 孟文东^{2,3}, 徐 闰¹, 耿仁方^{2,4}, 龙明亮², 程少宇², 张忠萍^{2,3,5}

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
3. 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 南京 210008; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘要:高重频卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)具有精度高、捕获快、观测数据量大、可靠性高等优势。但随着重复频率提升至百千赫兹以上,现有测量时序电路无法达到系统运行处理速度和实时后向散射规避等要求。本文提出超高重频卫星激光测距时序电路设计方法,采用FPGA代替控制计算机进行门控距离实时计算,精确产生门控信号控制探测器开启,并使用了收发交替的方式实时调整激光点火信号以规避后向散射干扰。能够自主完成激光测距中距离门控输出时刻的计算、存储和信号输出,最高工作频率大于500 kHz,满足百千赫兹超高频率测距的要求。该系统已成功应用于上海天文台100 kHz重复率SLR,标准点精度突破200 μm ,验证了基于FPGA的测距时序电路的正确性和潜力。该电路设计简单、分辨率高、上位机交互方便,为百kHz~MHz的超高重频SLR系统时序控制电路设计提供有效解决方案。

关键词:卫星激光测距;距离门控;高重频;时序电路;100 kHz

中图分类号:P228.5;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.017

Implementation and application of timing circuit for ultrahigh repetition frequency satellite laser ranging

YU Rong-zong¹, WU Zhi-bo^{2,3}, MENG Wen-dong^{2,3}, XU Run¹, GENG Ren-fang^{2,4},
LONG Ming-liang², CHENG Shao-yu², ZHANG Zhong-ping^{2,3,5}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
3. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
5. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract:High-frequency Satellite laser ranging (SLR) has the advantages of high accuracy, fast capture, large amount of observation data and high reliability. However, as the repetition frequency increases to more than 100 kHz, the existing measurement timing circuits cannot meet the requirements of system operation processing speed and real-time backscatter avoidance. In this paper, a design method for ultra-high-frequency satellite laser ranging timing circuits is proposed, using FPGAs instead of control computers for real-time calculation of gating distances, accurately

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 12373085; No. 12003056; No. 11903066); 中国科学院战略性先导科技专项课题项目(No. XDA30030500)资助。

作者简介:喻荣宗,男,硕士,主要从事卫星激光测距方面的研究。E-mail: yurongzong@shu.edu.cn

通讯作者:吴志波,男,硕士,正高级工程师,主要从事卫星激光测距方面的研究。E-mail: wzb@shao.ac.cn

收稿日期:2023-10-16; **修订日期:**2023-11-28

generating gating signals to control the detector open, and using an alternating transceiver to adjust the laser ignition signal in real time to avoid backward-scattering interference. It can independently complete the calculation, storage and signal output of the distance gating output moment in laser ranging, and the highest working frequency is more than 500 kHz, which meets the requirement of 100 kHz ultra-high frequency ranging. The system has been successfully applied to the 100 kHz repetition rate SLR at Shanghai Observatory, and the standard point accuracy exceeds 200 μm , which verifies the correctness and potential of the FPGA-based ranging timing circuit. The circuit is simple in design, high in resolution, and easy to interact with the host computer, which provides an effective solution for the design of the timing control circuit of the ultra-high repetition rate SLR system from 100 kHz to MHz.

Keywords: satellite laser ranging (SLR); range gate; high repetition rate; sequential circuit; 100 kHz

1 引言

卫星激光测距 (SLR) 是现代卫星测轨中精度最高的技术, 广泛应用于卫星精密定轨、空间大地观测等领域。千赫兹重复率 SLR 自 2004 年奥地利 Graz 站实现以来, 因其具有观测数据量大、标准点精度高、目标捕获快、采样密集等优点, 受到国际 SLR 领域的高度重视成为热门方向, 在卫星高精度测量、卫星姿态测量^[1] 等科学研究和工程应用中发挥了重要作用。随着 SLR 重复频率向百千赫兹以上发展, 对于时序控制系统的控制精度、处理速度等都有了更高的要求。然而传统时序控制电路由于速度、精度等性能有限, 限制了高重频 SLR 的进一步发展。

传统 kHz SLR 中时序电路大多将距离门控的计算放在在计算机控制软件中, 计算后实时传输给硬件以完成点火信号和门控信号的输出, 如上海天文台早期基于 EPP 接口及 Graz 站基于 ISA 接口开发的距离门控产生器 (Range Gate Generator, RGG)^[2-3], 这种方法可满足 1~2 kHz 重复率 SLR 的需求, 但重复率很难进一步提升。近年来研究者尝试了多种方法提升时序电路性能、提高卫星激光测距系统重复频率。如 2011 年上海天文台提出了基于 FPGA 的实时距离门控电路方案, 完成了门控计算从 PC 端到 FPGA 端的转移。2013 年韩国基于 FPGA 芯片完成距离门控设计并配合 Graz 站的 RGG, 完成 10 kHz 重复频率的距离门控电路^[4-6]。2022 年防灾科技学院朱建春^[7] 等人基于 ARM + FPGA 所设计的距离选通模块实现了 20 kHz 重复频率测距。上述时序电路优化设计都有效提升了高重频 SLR 重复频率及相关性能。但由于 100 kHz 及以上 SLR 测距要求更高的计算速度以及传统后向散射规避方法不再适用, 传统电路设计及上述设计都无法满足其需求, 不利于 SLR 技术的高重频化发展。

本文提出了一种基于 FPGA 的超高重频激光测

距时序控制电路设计方法, 以满足高重复率、高分辨率、后向散射规避和高实时性等要求。使用 FPGA 设计了一套时序控制电路, 用于精确控制激光发射与单光子探测器的开启, 并解决了超高重频 SLR 门控实时计算和后向散射规避等关键问题。电路已经进行了相关性能测试并用于实际观测。结果表明, 无论是实时性还是后向散射规避效果均得到了有效提高, 适用于 100 kHz 以上重复率的卫星激光测距。

2 超高重频 SLR 时序电路原理介绍

激光测距能力可以使用激光测距雷达方程进行评估, 具体可参考文献 [8], 为提高数据标准点精度, 可以通过增加激光的重复频率 f , 降低背景光噪声与暗噪声的光电子数, 系统有效接收面积, 激光器单脉冲能量等方法增大单位时间内的回波平均点数 D 。提高重复频率可以在回波平均点数不变的情况下降低单脉冲能量及系统有效接收面积, 降低测距系统成本。以上海天文台千赫兹激光测距系统为例: 不考虑噪声情况下, 在单位时间平均点数 $D = 100$ 点内的激光输出平均功率 P 与重复频率 f 的关系为:

$$P = fE_i = -0.0207f \ln\left(1 - \frac{100}{f}\right) \quad (1)$$

在单位时间内获得相同的回波数时, 所需要激光输出的平均功率也较低。高重复频率卫星激光测距具有经济适用、标准点精度高等优点, 但是目前门控实时性、精度、分辨率问题与后向散射规避方式等限制了其重复频率的继续提高。

高分辨率的距离门控可有效提高卫星激光测距的精度和可靠性^[2-4]。其原理在于, 通过精确计算门控时刻, 控制探测器于目标返回信号到达前的一个时间窗口内打开, 抑制背景噪声并消除回波干扰。传统激光测距重复频率较低可采用上位机计算再传输至电路的方式, 计算速度与硬件端传输速率均存

在较大限制。由于高重频 SLR 激光发射控制、接收操作频繁,要求短时间内完成大量数据运算及传输,且计算机还需完成在每一个测量循环中主回波时刻匹配、有效回波识别等工作,数据处理工作量大,这对计算机控制软件的实时性和时序控制精度均提出了更高的要求。因此需要采用实时性更强、精度更高的设备进行时序控制。

本文采用上位机对星历预报值进行三组多项式拟合可得秒内任何时刻卫星距离。如式(2)所示:

$$\begin{cases} R_0 = a_0 + a_1(t_0 - t_0) + a_2(t_0 - t_0)^2 + a_3(t_0 - t_0)^3 \\ R_1 = a_0 + a_1(t_1 - t_0) + a_2(t_1 - t_0)^2 + a_3(t_1 - t_0)^3 \\ R_2 = a_0 + a_1(t_2 - t_0) + a_2(t_2 - t_0)^2 + a_3(t_2 - t_0)^3 \\ R_3 = a_0 + a_1(t_3 - t_0) + a_2(t_3 - t_0)^2 + a_3(t_3 - t_0)^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, R_0, R_1, R_2, R_3 为卫星预报距离; t_0, t_1, t_2, t_3 为对应秒时刻值; a_0, a_1, a_2, a_3 为内插参数; a_0 代表卫星初始距离; a_1 为卫星距离变化率; a_2 为卫星距离加速度; a_3 为三次方系数,考虑到门控提前开启量 a_p ,则门控开启时刻 S_i ,可表示为:

$$S_i = R_i + (t_i - t_0) - a_p \quad (3)$$

上位机提前将求解的内插系数传输至电路。通过采用文献[9]所提的方法并进行改进,使用 FPGA 自主计算代替传统上位机计算, FPGA 能够基于点火时刻与点火时刻对应的内插参数提前计算门控值进行存储。门控信号以激光发射脉冲为起点,内插计算得延时 R (卫星与地面台站的往返距离)后输出门控信号开启探测器,可使测量重复率大幅提升,满足 100 kHz 甚至兆赫兹的激光测距需求。

后向散射是高重复频率 SLR 必须解决的关键问题。由于激光发射后的一小段时间内大气后向散射较强,散射光提前回到探测器造成干扰并丢失有效信号,且随着重复率的增加而变得越加严重,极大影响了测距效率,因此时序电路应具有后向散射规避功能^[9-10]。

传统 SLR 系统通过推迟激光点火时刻规避后向散射,当回波进入后向散射影响区间时,推迟所有点火信号。当回波(门控脉冲)进入后向散射影响区间时将此次及以后所有的点火信号推迟,在回波到达探测器之后再发射激光,这就避免了后向散射光对回波信号的影响^[11-14]。该方法需实时判断点火信号与门控信号的间隔,如小于 T_b (后向散射规

避判据),则将此次及之后的点火信号都推迟输出;但这种方法局限在于,对于距离变化较快的卫星以及高重复频率 SLR 时,频繁推迟点火操作会导致点火频率下降,且只适用于后向散射对测量结果的影响持续时间小于两次测量时间间隔的情况。100 kHz及以上测距系统则由于后向散射影响时间远大于测量间隔,在整个过程中都受到后向散射干扰。如果继续通过改变激光发射时刻来规避后向散射影响,需要在测距测量过程中不断地改变其激光发射时刻,最终无法正常完成测距测量任务。此外,由于激光脉冲之间的时间间隔较短,激光在大气中的后向散射强度增加^[9-10],从而可能导致单光子探测器饱和损坏。因此,对于测距频率高于 50 kHz 的卫星激光测距,需要采用新的后向散射规避方法,以保证测量结果的准确性和稳定性。

本文采用收发交替工作模式来减少后向散射的影响。如图 1 所示,首先,激光器接收到指令后发射一系列激光脉冲,系统计算激光脉冲的返回时间,待第一个激光脉冲返回后,系统停止激光发射并输出门控信号,开启探测器以接收卫星的激光回波信号,而后向散射出现时间在脉冲返回时间前,因此不会对探测器造成干扰。当单光子探测器接收完对应的回波信号后停止工作,此时,激光器恢复发射并循环往复。通过脉冲群的交替收发工作模式,在时间上可以将后向散射光与来自卫星的回波信号分离,从而避免后向散射光对测距结果的影响^[8,15]。

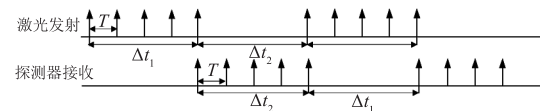


图1 激光脉冲收发交替工作模式时序模式

Fig. 1 Laser pulse transceiver alternate working mode timing mode

脉冲群周期长度主要取决于当前时刻测量卫星的距离、方位、俯仰以及单光子探测器工作模式。在激光发射周期 Δt_1 内,激光脉冲群外触发信号最大持续工作时间为 $2L/c$,其中 c 为光的传播速度, L 为当前时刻卫星距 SLR 站的距离,为激光器发射脉冲间距,故在 Δt_1 内激光发射的脉冲数最大为 $2L/cT$ 。在激光接收周期 Δt_2 内无外触发信号,激光脉冲未发射,而单光子探测器由激光脉冲群对应的门控脉冲群信号开启,接收激光回波信号。对应激光发射周期,单光子探测器开启最大持续工作时间为 $2L/c$ 。此时激光输出的脉冲群周期 T_L 为 $\Delta t_1 +$

$\Delta t_2 = 4L/c, \Delta t_1$ 内激光发射脉冲数的最大占空比为 50%,即发射激光的最大允许脉冲数为激光工作重复频率的一半。脉冲群收发交替工作模式虽然损失了 50% 的激光发射时间,但是能够适用于超过 500 kHz 的高重复频率测距,并且系统减少了点火延时时刻、散射区间计算等过程,节省了系统资源。

3 高重频时序电路硬件设计

高重频 SLR 所使用激光的脉冲能量低,系统信噪比较低,为提高探测成功概率,要求时序电路的门控信号控制精度达纳秒级 ($\leq 5 \text{ ns}$)。考虑到激光测距时序电路对于控制精度、计算实时性、稳定性、可扩展性等要求,可使用 FPGA 进行相关电路设计,从而提高系统的响应速度和准确性。相较于上海天文台原有常规测距时序电路主要升级了门控信号产生模块、点火信号产生模块、通信模块及其他相关接口。

时序控制电路原理框图如图 2 所示,该电路由 Xilinx 公司的 XC3S200 FPGA 芯片,外围配置串口、门控触发信号(主波或点火信号)、门控信号、同步信号以及 10 MHz 时钟、秒信号等接口电路组成。

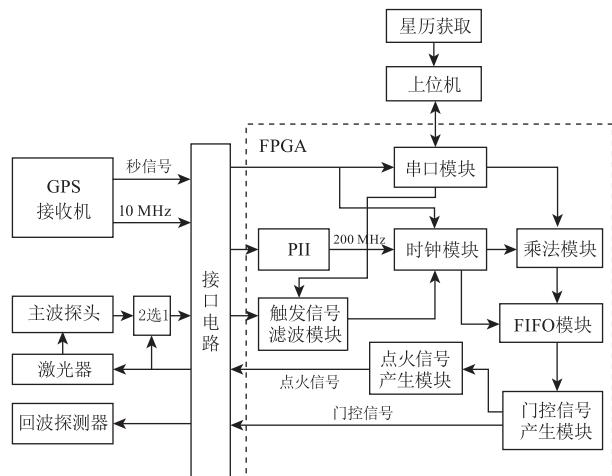


图 2 高重频时序电路设计框图

Fig. 2 Design block diagram of sequential circuit with high repetition rate

10 MHz 和 1 pps 秒信号是整个电路的时钟基准和时间起点,由 GPS 接收机提供。1 pps 秒信号用于同步 UTC 时间。使用 Xilinx 的 PLL 模块将 10 MHz 信号倍频生成 200 MHz 信号作为全局时钟基准,用于计数器、乘法器、上位机指令接收等。上位机以 1 s 为周期向门控发送内插参数及相关指令,串口模块接收上位机消息并反馈内部运行状态。门控模块基于接收的内插系数计算并输出门控信号。点火信号产生模块则根据上位机指令及门控指令,进行后向散射规

避或产生点火信号控制激光器出光。

3.1 串口通信模块设计

串口通信模块主要用于传输相关配制参数以及反馈时序控制电路状态。采用 RS232 串口通信方式。通信数据包括距离门控时刻内插系数、使能指令,点火频率、主波时延等参数。上位机基于卫星星历进行内插参数计算,相关通信数据经过序列化处理后,提前将数据通过串口传输到时序电路的寄存器,等待下一个秒信号到达即赋值生效。

3.2 门控信号产生模块设计

门控信号产生模块主要负责门控时刻的计算、输出。图 3 为距离门控信号产生时序框图,电路上电之后,FPGA 进行内部初始化,各模块复位;待下一个秒信号到达后,上位机下传的内插参数起效;如果接收到使能指令,则根据触发信号的发生时刻以及内插系数,按照公式(1)不断计算门控输出时刻,并存储至 FIFO;查询内部时钟,比较门控输出时刻与当前时刻,相等时则输出门控信号并读取下一个门控输出时刻,否则等待。

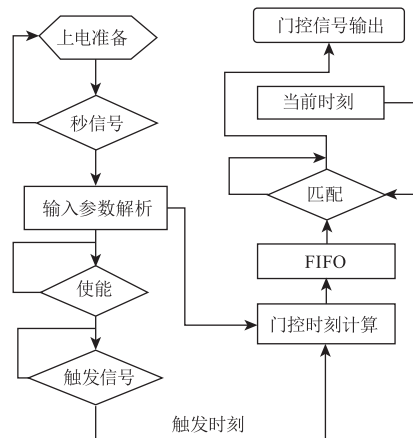


图 3 高重频距离门控信号产生框图

Fig. 3 Block diagram of range gate generation with high repetition rate

本文使用了 48×18 的有符号乘法器实现 5 ns 分辨率的距离门控时刻实时计算;上位机提供的 a_0, a_1, a_2, a_3 系数均转化为 5 ns 单位进行传输,由于距离门控时刻从产生到信号输出的这段时间(卫星往返距离)内,仍有多组距离门控时刻要产生,因此需配置合适大小的 FIFO 以缓存上述数据。FIFO 深度取决于最远观测距离,以四万公里同步轨道卫星为例,往返距离为 267 ms,常规测量频率为 1 ~ 2 kHz, FIFO 大小设置为 534 足够。如果重复率为 100 kHz 时, FIFO 大小需求则为 26700,且随着测量频率的增加而线性增大, FPGA 资源的浪费制约了

时序电路在更高重复率的潜力。如图 4 所示,为减少对 FIFO 大小需求,需缩短门控时刻计算到输出的时间,也即距离门控输出不是由对应的点火信号触发产生,而是由延时 T_B 之后的点火信号触发计算。为此,需要对公式(2)进行变形,如下所示:

$$R' = R - T_B = (a_0 - T_B) + a_1(t_i - t_0 - T_B) + a_2(t_i - t_0 - T_B)^2 + a_3(t_i - t_0 - T_B)^3 \quad (4)$$

由此可计算出更新后的内插系数。TB 取 265 ms 时,则所需 FIFO 大小降为 $200(2 \text{ ms}/10 \mu\text{s})$,使得时序电路的适应性强,能够满足 MHz 的重复频率以及距离更大的如激光测月(LLR)的需求。

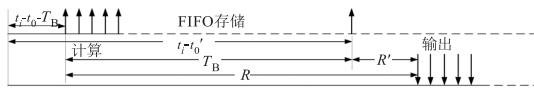


图 4 100 kHz 距离门控产生时序

Fig. 4 Range gate generation sequence with 100 kHz repetition rate

3.3 点火信号产生模块

点火信号产生模块用于控制点火信号输出和后向散射规避。其具体流程如图 5 所示,上电后,FP-GA 内部各模块初始化;待下一个秒信号到达后,使能及频率参数起效;以秒信号作为同步起点,对 200 MHz 进行分频,产生对应频次的内部激光点火信号;门控信号到达后,判断其与最近点火信号的时间间隔,一旦进入散射区,则调整点火时刻,否则直接输出内部点火信号。

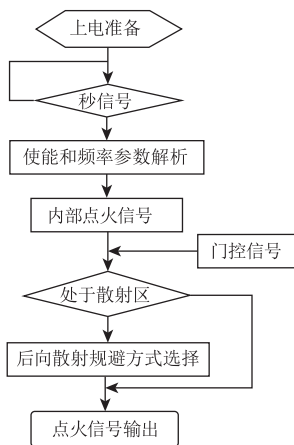


图 5 点火信号输出框图

Fig. 5 Laser firing signal generation diagram

在常规测距时,采用点火信号推迟方法,对于典型的 1 kHz 重复率 SLR,后向散射影响区最大为 $120 \mu\text{s}$ (对应十几公里处的大气散射),一旦判断进入后向散射区,可将点火信号推迟 $150 \mu\text{s}$ 输出。

对于 50 kHz 以上测距需求采用收发交替模式。点火和门控信号的产生时序如图 6 所示,基于门控计算距离值实时产生一路使能信号,并定时对其翻转,将使能信号与原始点火信号进行与运算操作,即可在使能信号高电平时输出点火信号,同样在后半周期使能信号为低电平时能够控制开启单光子探测器接收回波,实现点火信号与门控信号交替输出。

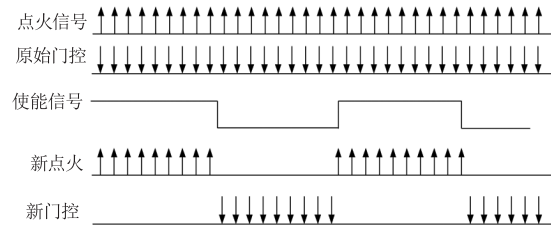


图 6 交替脉冲群点火和门控产生时序

Fig. 6 Generation sequence of alternating burst firing and gating pulse

4 超高重频时序电路试验结果

基于上述电路进行了指标测试和实际观测测试,时序电路表现出了良好的性能。针对该电路进行测量频率和控制分辨率测试。为测试时序电路的测量频率,通过设置点火信号频率设 500 kHz,模拟卫星距离取 1.001 ms。图 7 为时序电路输出的点火信号和门控信号,点火信号和门控信号的重复率均为 500 kHz,信号脉宽 300 ns 左右。需要说明的是,目前时序电路的测量频率受限于距离门控时刻的计算速度,单次计算使用 40 个时钟周期(时钟 200 MHz),后续可以通过提升时钟工作频率、优化乘法器计算速度等方式提高时序电路的测量频率,理论上时序电路的工作频率可以达到 5 MHz。

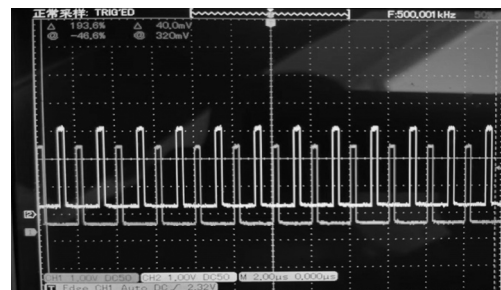


图 7 时序电路工作频率件测试结果

Fig. 7 Repetition rate for the sequential circuit

时序电路的输出精度采用 A033-ET 高精度事件计时器(10 ps 精度)进行记录。通过记录点火信号和门控信号的输出时刻^[16],并与预期距离门控长度进行做残差点图,如图 8 所示。横坐标为时间,纵

坐标为残差点图,距离门控步长设置为 5 ns,可以看到残差点图的宽度为 5 ns,门控提前量每变化 5 ns,残差点图能够清晰反应,这些均说明输出信号分辨率好于 5 ns。因此,通过以上测试结果,可以得出结论:时序电路的输出信号分辨率较高且输出频率满足高重复频率 SLR 要求。

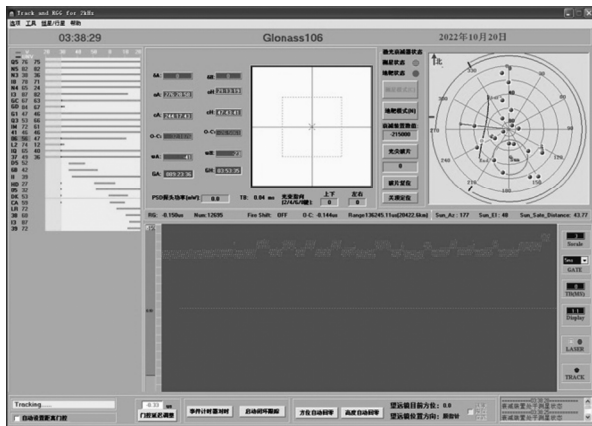


图8 信号输出分辨率测试结果

Fig.8 Output resolution for the sequential circuit

基于上海天文台现有的 60 cm 口径常规 SLR 系统,使用上述电路实现了 100 kHz 重复率激光测距,观测数据及处理结果如表 1 所示,获得了数十圈测量数据,涵盖了从低轨、高轨、同步轨道的卫星测距。根据计算,实测的标准点数据精度好于 200 μm,回波点数和标准精度相较于传统测距系统实现了数量级的提高。其中图 9 为同步轨道 Qzs4 的测量残差结果,由于采用了收发交替的后向散射规避方法,通过去噪处理后的数据点显示呈现周期交替分布,后向散射噪声被抑制。实验结果验证了时序电路设计的正确,以及在 100 kHz 以上重复率 SLR 上的潜力,体现了高重复率卫星激光测距上的精度和数据密度优势。

表 1 100 kHz 重复频率激光测距观测数据结果

Tab.1 Observation data results of 100 kHz repetition rate laser ranging

Satellitename	Echo number	Standard point accuracy/μm
Stella	91911	320.0
Beaconc	587633	158.9
Starlette	184822	155.15
Saral	641436	165.00
Ajisai	484282	173.5
.....

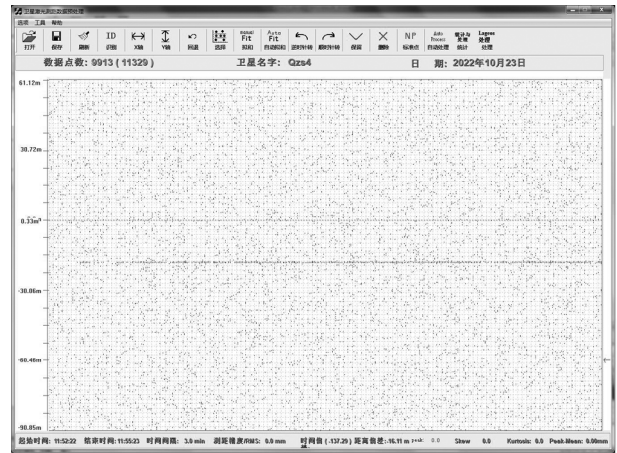


图9 100 kHz SLR 激光回波输出处理 Qzs4

Fig.9 100 kHz SLR laser echo output processing Qzs4

5 结论

综上所述,本文为超高重复 SLR 提供了一种时序电路设计方法,相较传统设计具有高重复率、高分辨率、高自主性等特点。利用 FPGA 的优势实现了超高重复门控距离实时计算,通过收发交替的设计思路,解决了后向散射对结果所造成的干扰。通过实际测距实验,验证了时序电路工作频率、输出精度能够满足高重复 SLR 要求。能够完成激光器与探测器精确控制,最高重复率超过 500 kHz。时序电路成功应用于国内首套 100 kHz 重复率 SLR 系统,实现了对数百公里到数万公里卫星的测量,使标准点精度较传统测距有明显提升,验证了时序电路的正确性和高重复率潜力,为更高重复 SLR 技术的进一步推广和应用奠定了基础。

参考文献:

[1] Deng Huarong, Zhang Haifeng, Long Mingliang et al. 4 kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 233 - 239. (in Chinese)
 邓华荣,张海峰,龙明亮,等. 4 kHz 重复频率卫星激光测距系统及其应用[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 233 - 239.

[2] Wu Zhibo, Zhang Zongping, Chen Juping. The implementation of range-gate control circuit with high-repetition-rate based on FPGA[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 919 - 922. (in Chinese)
 吴志波,张忠萍,陈菊平. 基于 FPGA 的高重复率距离门控电路实现[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 919 - 922.

[3] G Kirchner, F Koidl. Graz kHz SLR system; design, expe-

- riences and results [C]//Proc 14th ILRS Workshop on Laser Ranging, San Fernando, Spain, 2004.
- [4] Seung-Cheol Bang, Nung-hyun Ka, Hyung-Chul Lim. Range gate generator development for 10 kHz laser ranging[C]//Proc 18th ILRS Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan, 2013.
- [5] Choi E J, Bang S C, Sung K P, et al. Design and development of high-repetition-rate satellite laser ranging system [J]. *Astron. Space Sci*, 2015, 32(3): 209 – 219.
- [6] S C Bang, N H Ka, E J Choi, et al. A-RGG development for 10 kHz laser ranging of daedeok station [C]//Proc 19th ILRS Workshop on Laser Ranging, Annapolis, USA, 2014.
- [7] Zhu Jianchun, Li Xin, Zhu Wei. Implementation method of range-gating for mobile satellite laser ranging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 145 – 155. (in Chinese)
朱建春, 李欣, 朱威. 流动卫星激光测距系统的距离选通实现方法 [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(12): 145 – 155.
- [8] Cheng Shaoyu, Long Mingliang, Zhang Haifeng, et al. Research on satellite laser ranging at pulse repetition frequency of 100 kHz [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(11): 190 – 198. (in Chinese)
程少宇, 龙明亮, 张海峰, 等. 百 kHz 重复频率卫星激光测距 [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(11): 190 – 198.
- [9] Fan Haibo, Wu Zhibo, Zhang Haifeng. A method of realization of range gate generator with high realtime [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 2010, 26(31): 170 – 176. (in Chinese)
范海波, 吴志波, 张海峰, 等. 一种高实时性的距离门控实现方法 [J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2010, 26(31): 170 – 176.
- [10] Zhang Zongping, Wu Zhibo, Zhang Haifeng, et al. Experiment of high-repetition-rate SLR [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(12): 1267 – 1270. (in Chinese)
张忠萍, 吴志波, 张海峰, 等. 高重复频率卫星激光测距实验研究 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(12): 1267 – 1270.
- [11] Wo Zhibo, Deng Huarong, Zhang Haifeng, et al. Interference and avoidance of atmospheric backscattering on satellite laser ranging with high repetition rate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 58 – 63. (in Chinese)
吴志波, 邓华荣, 张海峰, 等. 高重复率卫星激光测距中后向散射干扰及规避 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 58 – 63.
- [12] Paul Titterton. System/usage impact of operating the SLR2000 at 2 kHz [C]//11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf, Germany, 1998.
- [13] Wo Zhibo, Zhang Haifeng, Li Pu, et al. Report on satellite laser ranging observations at shanghai observatory in 2013 [J]. *Ann Shanghai Astron Obs*, 2014, (1): 10. (in Chinese)
吴志波, 张海峰, 李朴, 等. 2013 年上海天文台卫星激光测距观测报告 [J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2014, (1): 10.
- [14] Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, et al. The preliminary results of SLR with 10 kHz laser system at shanghai station [C]//Proc 18th ILRS Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan, 2013.
- [15] Geng Renfang, Wu Zhibo, Tan Kai, et al. Precise control of laser emission epoch in laser time transfer with high repetition rate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50: 135 – 143. (in Chinese)
耿仁方, 吴志波, 汤凯, 等. 高重复率激光时间比对激光发射时序精确控制 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50: 135 – 143.
- [16] Qin Si, Wu Zhibo, Zhang Haifeng. High precise event timer and its application to satellite laser ranging [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(4): 419 – 423. (in Chinese)
秦思, 吴志波, 张海峰, 等. 高精度事件计时器及其在卫星激光测距应用 [J]. *激光与红外*, 2019, 49(4): 419 – 423.