

## 百 kHz 重复频率卫星激光测距

程少宇<sup>1,2</sup>, 龙明亮<sup>2\*</sup>, 张海峰<sup>2,3</sup>, 吴志波<sup>2,3</sup>, 秦 思<sup>2</sup>, 张忠萍<sup>2,3,4</sup>

- (1. 上海大学 计算机工程与科学学院, 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, 江苏南京 210008;
4. 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:** 对卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 回波数与重复频率、脉冲能量及功率关系进行分析, 表明单位时间内相同激光回波数, 重复频率越高所需激光脉冲能量和平均功率越低; 同时对 SLR 单次测量精度及标准点数据精度进行分析, 表明标准点时长内测距点数越多, SLR 标准点精度越高。提出点火脉冲群与门控脉冲群收发交替的工作模式, 解决超高重复频率后向散射光噪声对激光回波干扰问题。开发多缓冲区存储模式, 使测量软件数据实时处理与储存效率提升 4~6 倍。基于中国科学院上海天文台 60 cm 口径 SLR 系统, 以快速事件计时器、脉冲群生成器、低噪声单光子探测器等, 采用脉冲间隔 5  $\mu\text{s}$ 、单脉冲能量 80  $\mu\text{J}$  的皮秒激光, 收发交替脉冲群模式下实现 100 kHz 重复频率低轨至高轨卫星的 SLR 测量, 近地星 Hy2b 标准点精度达到 28.55  $\mu\text{m}$ , 远地星 Galileo218 标准点精度达到 136.51  $\mu\text{m}$ , 为发展更高重频和高精度空间目标激光测距提供了有效方法。

**关键词:** 卫星激光测距; 重复频率; 后向散射规避; 激光收发交替

**中图分类号:** P228.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220121

## Research on satellite laser ranging at pulse repetition frequency of 100 kHz

Cheng Shaoyu<sup>1,2</sup>, Long Mingliang<sup>2\*</sup>, Zhang Haifeng<sup>2,3</sup>, Wu Zhibo<sup>2,3</sup>, Qin Si<sup>2</sup>, Zhang Zhongping<sup>2,3,4</sup>

- (1. School of Computer Engineering and Science, 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 Sciences, Nanjing 210008, China;
4. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** The relationship between the number of satellite laser ranging (SLR) echoes and the repetition rate, laser pulse energy and power are analyzed, it shows that under the same laser echoes, the higher the repetition rate, the lower the laser pulse energy and laser average power are required. Meanwhile, single-shot accuracy and normal point (NP) accuracy of SLR are analyzed, it shows that the more measuring points within the NP time are, the higher the NP accuracy would be. The working mode of firing pulse trains and receiving pulse trains triggered by a fixed period range gate is proposed to solve the interference problem of laser echo caused by back-scattered

收稿日期: 2022-02-24; 修订日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金 (12003056); 上海市自然科学基金面上项目 (20ZR1467500);

上海市仪器共享配套操作与应用技术研究项目 (21142201900)

作者简介: 程少宇, 男, 硕士生, 主要从事卫星激光测距数据处理方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 龙明亮, 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间碎片/卫星激光测距技术及应用方面的研究。

laser noise with ultra-high pulse repetition frequency (PRF). The multi-buffer storage mode is developed to improve the real-time processing and storage efficiency of data in measurement software by 4-6 times. Based on the telescope aperture of 60 cm SLR in Shanghai Astronomical Observatory, CAS, the PRF of 100 kHz SLR is realized by using fast event timing, ultra-high pulse trains generator, low noise single photon detector and picosecond laser with pulse spacing of 5  $\mu\text{s}$ , single pulse energy of 80  $\mu\text{J}$ . Measured data of satellites by the PRF of 100 kHz SLR is from low earth orbit (LEO) and high earth orbit (HEO). The NP accuracy for Hy2b satellite in LEO is 28.55  $\mu\text{m}$ , and that of Galileo218 satellite in HEO is 136.51  $\mu\text{m}$ . This study provides an effective method for higher frequency and high-accuracy space target laser ranging.

**Key words:** satellite laser ranging; repetition rate; back-scatter avoidance; laser emission and reception alternation

## 0 引言

卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 通过精确测定激光脉冲从地面观测点到卫星反射器往返时间间隔, 从而获取卫星与站点之间的高精确距离<sup>[1]</sup>。北斗导航卫星激光测距定轨残差均方根值 (Root Mean Square, RMS) 好于 1 cm<sup>[2]</sup>, 天宫二号飞行器激光数据轨道检核精度达到 1.7 cm<sup>[3]</sup>。SLR 测距频率由早期使用低重复频率 (小于 20 Hz) 已发展到目前普遍使用的千赫兹<sup>[4-9]</sup>, 由于高重复频率激光测距具有目标搜索快、激光回波数据量大的特点, 能够增大测量标准点时长内的回波数, 获得更高精度激光标准点数据, 在国外得到快发展, 并向更高的重复频率激光测距发展。2018 年, 中国科学院上海天文台激光测距站在 4 kHz 重复频率激光测距下分析测距数据量与标准点精度, 表明 4 kHz 比 1 kHz 重复频率的测量数据量和标准点数据精度分别提高了约 2.62 倍和 1.62 倍, 4 kHz 的 SLR 对低轨卫星标准点精度平均为 135  $\mu\text{m}$ , 对高轨卫星标准点精度平均为 405  $\mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>。次年, 通过升级激光及距离门控, 使用激光点火信号移动的方式进行后向散射激光规避, 实现全天时从低轨到同步轨道的 10 kHz 的激光测距测量<sup>[6-9]</sup>。然而, 测距数据中依旧存在明显的后向散射激光对激光回波数据影响情况<sup>[8]</sup>。随着激光技术及激光探测技术的不断发展, 低噪声的红外 1064 nm 得到应用, 2020 年, 中国科学院上海天文台通过红外相机监视光束指向实现了白天 1064 nm 的 SLR<sup>[10]</sup>; 中国科学院云南天文台使用超导纳米线单光子探测器实现了白天 SLR<sup>[11]</sup>, 并于次年通过阵列探测技术提高了弱回波信号的探测效率<sup>[12]</sup>。

目前, 国际上超高重复 (100 kHz 及以上) 激光测

距主要采用脉冲调频 burst 脉冲群及自由模式运转的单光子探测器来实现。2018 年, 德国 Daniel Hampf 等人采用体积小的光纤纳秒激光器实现了激光发射脉冲数 100 k 对 20000 km 高轨 SLR, 测得标准点精度达 5~15 mm<sup>[13]</sup>, 接着完成了小尺寸超高重复频率 100 kHz 激光测距系统, 其尺寸仅为 1.8 m  $\times$  1.2 m  $\times$  1.6 m, 质量 200 kg<sup>[14]</sup>。2019 年, 在德国斯图加特 (Stuttgart) 国际激光测距网组织的全球技术大会上, 意大利 D. Dequal 等人分析了 100 kHz 激光测距标准点精度有望突破亚毫米量级<sup>[15]</sup>; 法国 C. Courde 等人报告了 100 kHz 激光测距测量<sup>[16]</sup>; 奥地利 Graz 的 SLR 站报告了 500 kHz 的 SLR<sup>[17]</sup>, 并于 2020 年基于收发交替频率实现了 1 MHz 重复频率白天 SLR<sup>[18]</sup>。然而, 对于超高重复频率激光测距, 激光脉冲数目多, 测量数据需要高速采集和储存, 且激光脉冲之间脉冲间距短, 激光后向散射光极易对卫星激光回波信号干扰, 增大了激光回波信号识别难度。

文中从激光测距雷达方程对平均回波数进行分析, 给出了超高重复频率技术优势, 提出了单光子探测器门控模式下收发交替的脉冲群方式, 分析了收发交替周期随卫星距离变化的关系, 解决了大气后向散射噪声光对激光回波干扰。研究了不同数据储存模式的时效性, 以保证数据采集处理的实时性, 最后以中国科学院上海天文台 SLR 系统为平台, 采用工作在 Geiger 模式的低噪声外触发单光子探测器, 实现了 100 kHz 重复频率 532 nm 波长 SLR。

## 1 高重复频率 SLR 探测分析

### 1.1 回波数探测分析

激光测距雷达方程是评估激光测距系统测量能

力的基础,其公式如下<sup>[19]</sup>:

$$n_0 = \frac{16}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda \eta_q}{hc} \cdot \frac{E_t A_r A_s}{R^4 \theta_t^2 \theta_s^2} \cdot T^2 \cdot K_t \cdot K_r \cdot \alpha \quad (1)$$

式中:  $n_0$ 为系统接收平均激光回波光电子数;  $\lambda$ 为激光波长;  $h$ 为普朗克常量;  $c$ 为光速;  $\eta_q$ 为探测器探测效率;  $E_t$ 为激光器单脉冲能量;  $A_r$ 为系统有效接收面积;  $A_s$ 为目标反射器反射面积;  $T_2$ 为双程大气透过率;  $K_t$ 为发射光学系统效率;  $K_r$ 为接收光学系统效率;  $\theta_t$ 为目标反射器发散角;  $\theta_s$ 为激光束发散角;  $R$ 为目标卫星到测距站点的距离;  $\alpha$ 为大气衰减因子。激光测距一般采用单光子探测器,其光电转换产生的光电子数服从泊松分布,由此产生一个以上光电子的概率为:

$$P(0, N) = \sum_1^{\infty} p(m, N) = 1 - P(0, N) = 1 - e^{-N} \quad (2)$$

激光测距过程中不考虑后散信号的光子数,当单光子探测器探测到为背景噪声与暗噪声光电子时,卫星激光回波的光电子将得不到探测,故单个激光脉冲的卫星激光回波探测概率为:

$$P(0, n_0) = e^{-(n_1+n_2)}(1 - e^{-n_0}) \quad (3)$$

式中:  $n_1$ 为背景光噪声产生的光电子数;  $n_2$ 为单光子探测器自身暗噪声光电子数。由上式可知,为了提高卫星激光回波的探测概率,应降低  $n_1$ 与  $n_2$ 。在重复频率  $f$ 下,结合公式(1),单位时间内的回波平均点数  $D$ 为:

$$D = f e^{-(n_1+n_2)} \left( 1 - e^{-\frac{16}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda \eta_q}{hc} \cdot \frac{E_t A_r A_s}{R^4 \theta_t^2 \theta_s^2} \cdot T^2 \cdot K_t \cdot K_r \cdot \alpha} \right) \quad (4)$$

由公式(4)得,为了增大单位时间内的回波平均点数  $D$ ,可以增加激光的重复频率,降低背景光噪声  $n_1$ 与暗噪声的光电子数  $n_2$ 、系统有效接收面积  $A_r$ 、激光器单脉冲能量  $E_t$ 。由此,在  $D$ 恒定的情况下,  $f$ 可以降低激光器单脉冲能量及系统有效接收面积,即可用口径小的接收望远镜以及高重复频率、低脉冲能量的激光器系统,降低系统成本,利于系统小型化发展。在中国科学院上海天文台千赫兹激光测距系统测量中<sup>[20]</sup>:  $\lambda=532 \text{ nm}$ ,  $h=6.6260693 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ,  $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $\eta_q=20\%$ ,  $T=0.6$ ,  $A_r=0.251 \text{ m}^2$ ,  $K_t=0.6$ ,  $K_r=0.4$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $\theta_t=30 \mu\text{rad}$ ,  $A_s=0.1 \text{ m}^2$ ,  $R=20000 \text{ km}$ ,  $\theta_s=30 \mu\text{rad}$ ,在不考虑噪声的情况下,  $D=100$ 点内,  $E_t$ 与  $f$ 的关系为:

$$E_t = -0.000207 \ln \left( 1 - \frac{100}{f} \right) \quad (5)$$

根据公式(5)得到的关系曲线如图1(a)所示,可以看出,重复频率越高,在单位时间内获得相同回波数时所需要单脉冲能量越低。由公式(5)可得激光输出平均功率随重复频率的变化为:

$$P = f E_t = -0.000207 f \ln \left( 1 - \frac{100}{f} \right) \quad (6)$$

根据公式(6)得到的关系曲线如图1(b)所示,可以看出,重复频率越高,在单位时间内获得相同回波数时所需要激光输出的平均功率较低。

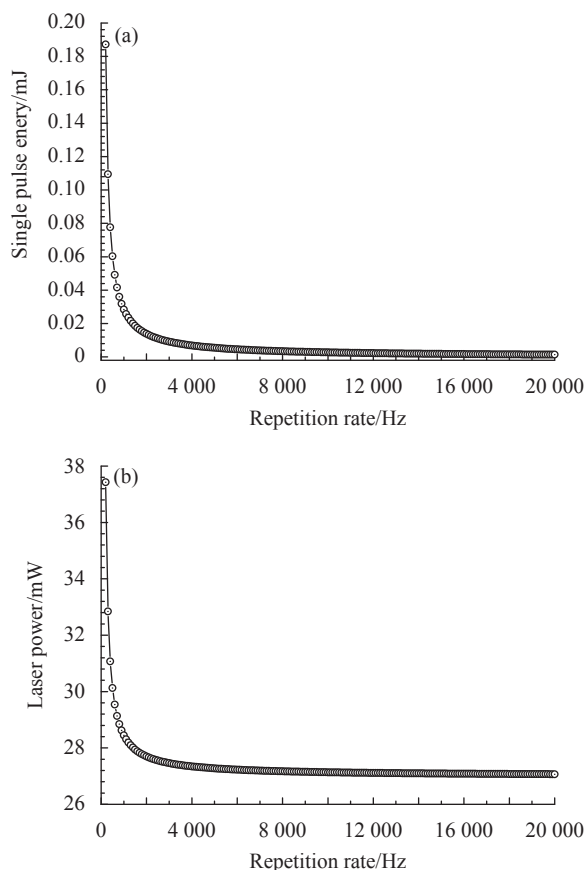


图1 同样测量回波点数下 ( $D=100$ ) 的关系: (a) 单脉冲能量与重复频率; (b) 激光平均功率与重复频率

Fig.1 Relationship on the same laser echo ( $D=100$ ): (a) Between single pulse energy and repetition rate; (b) Between laser average power and repetition rate

### 1.2 测量精度分析

由参考文献 [13],对 SLR 系统的单次测量精度  $\sigma_{\text{single}}$ 进行估计:

$$\sigma_{\text{single}} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{D1}^2 + \sigma_{D2}^2 + \sigma_{ET}^2 + \sigma_S^2} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_L$  为由激光脉冲引起的的时间偏差 (与脉冲持续时间有关);  $\sigma_{D1}$  为探测器开门时间的偏差,  $\sigma_{D2}$  为探测器关门时间的偏差;  $\sigma_{ET}$  为事件计时器响应的偏差;  $\sigma_s$  为测距目标脉冲响应偏差。目前国际激光测距规范采用标准点反映数据精度<sup>[21]</sup>, 标准点精度  $\sigma$  计算公式如下<sup>[4,13,22]</sup>:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{single}}}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

式中:  $N$  为激光标准点时长内数据点数。由公式 (7) 可知, 激光测量的工作频率基本不影响  $\sigma_{\text{single}}$ , 由此, 增加激光测距的工作频率可增加卫星激光标准点时长内的回波数 (低轨卫星标准点时长为 30 s, 高轨卫星标准点时长为 300 s)<sup>[21]</sup>, 从而可获得更高精度的标准点精度。

## 2 时序控制与数据处理

超高重复频率下, 激光脉冲之间的间距短, 激光在大气中的后向散射光比较强, 此时若探测器打开, 一方面很容易导致探测器饱和而损坏, 另一方面后向散射激光会干扰卫星激光回波, 增大卫星激光回波的识别难度, 以收发交替脉冲群模式进行激光后向散射规避。相比常规 1 kHz 重复频率 SLR 测距数据, 超高重复频率 (100 kHz) 的 SLR 测距数据量将提高两个数量级, 常规数据储存模式将造成计算机操作系统产生大量阻塞而崩溃, 采用多缓冲区异步数据储存模式有效避免阻塞, 提高大数据量的处理效率。

### 2.1 收发时序控制

采用收发交替脉冲群模式进行后向散射光规避, 其工作模式如图 2 所示, 激光器输出激光脉冲, 发送一定脉冲数后停止发送。由于激光已经停止输出, 待其在大气散射光至望远镜的光子返回后, 开启单光子探测器收集远距离卫星激光回波, 避免后向散射光的

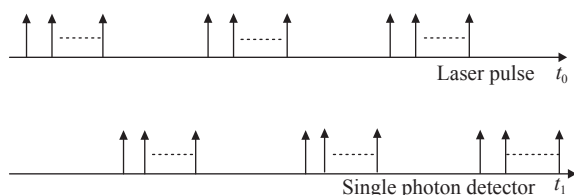


图 2 激光脉冲收发交替工作模式时序模式

Fig.2 Time sequence of alternated working mode of laser emission and reception

干扰; 单光子探测器接收对应的回波后, 停止工作, 此时激光发射, 以此循环往复。

为了确定脉冲群周期, 并考虑激光脉冲输出与单光子探测器工作模式, 设计的触发时序如图 3 所示。

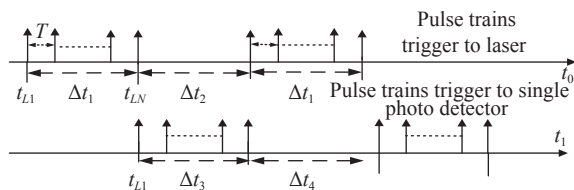


图 3 激光与单光子探测器的脉冲群外触发信号时序

Fig.3 External trigger pulse trains signal timing for laser and single photon detector

图 3 中, 激光脉冲群外触发信号最大持续工作时间为:

$$\Delta t_1 = \frac{2L}{c} \quad (9)$$

式中:  $c$  为光的传播速度;  $L$  为卫星距 SLR 站的距离, 测距过程中  $L$  随测量卫星的方位、俯仰而变。假定  $T$  为激光器发射脉冲间距, 故在  $\Delta t_1$  内激光发射的脉冲数最大为:

$$N_L = \frac{2L}{cT} \quad (10)$$

此时  $\Delta t_2$  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, 则对应单光子探测器开启最大持续工作时间  $\Delta t_2 = \Delta t_1$ , 此时激光输出脉冲群周期  $T_L$  为:

$$T_L = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{4L}{c} \quad (11)$$

$\Delta t_1$  内激光发射脉冲数的最大占比  $DR$  为:

$$DR = \frac{\Delta t_1}{T_L} = 50\% \quad (12)$$

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。对不同轨道距离的卫星, 由公式 (10)、(11) 可得对应的脉冲群周期, 例如对某时刻距 SLR 站距离为 3 750 km 近地卫星, 脉冲群周期  $T_L$  为 50 ms, 对应脉冲群收发交替频率为 20 Hz, 相应脉冲群内的脉冲发射最大时间为 25 ms。而对于 37 500 km 的同步卫星, 脉冲群周期为  $T_L$  为 0.5 s, 对应收发交替频率为 2 Hz, 对应脉冲发射最大时间为  $T_L/2$ , 即 0.25 s。实际测距过程中, 卫星距离随着卫星轨道与 SLR 站

的夹角变化,  $T_L$  也对应变化。对不同卫星轨道预报距离, 可以根据公式 (10)、(11) 计算脉冲群的重复频率及脉冲群内的脉冲数目, 文中结合已有 SLR 系统中的固定低频门控与脉冲群生成器的方式实现脉冲群的收发交替模式, 根据目标预报的特定距离确定低频脉冲群周期, 实现超高重复频率 100 kHz 测量。使用低频门控触发脉冲群生成器获得脉冲群, 部分激光脉冲将得不到在对应有效的距离门控下的单光子探测器的外触发工作, 因此得不到探测而带来损失。图 4 展示了脉冲群周期的激光脉冲数损失,  $T_R$  表示固定的脉冲群周期,  $\Delta T$  表示实际能接收到回波的距离门控

下开启单光子探测器的有效接收窗口大小。

由图 4 可知, 脉冲群周期固定时, 回波损失率  $Q_{\text{loss}}$  为:

$$Q_{\text{loss}} = \begin{cases} 1 - \frac{2T_R - T_L}{T_L}, & T_R < T_L \\ 1 - \frac{2T_R - T_L}{T_L}, & T_R \geq T_L \end{cases} \quad (13)$$

以脉冲群周期为 50 ms 的近地卫星为例, 若实际距离为 3 500 km, 由公式 (11) 可知对应的脉冲群周期  $T_L$  应为 47 ms, 由公式 (13) 可知发射的脉冲群内将有 6.38% 的脉冲因得不到探测而损失。

### 2.2 数据实时高效率处理

常规千赫兹重复率卫星激光测距系统中使用了无缓冲区或单缓冲区同步模式实时采集、储存测距数据, 其工作原理如图 5(a) 和图 5(b) 所示。无缓冲区模式每次采集测距数据后直接写入磁盘, 单缓冲区模式将测距数据暂存在缓冲区, 缓冲区满后持久化到磁盘, 等待写入完毕后继续采集。无缓冲区或单缓冲区都在写入磁盘时造成采集过程阻塞, 降低了数据采集效率。使用中国科学院上海天文台激光测距系统测试<sup>[23]</sup>, 缓冲区与单缓冲区采集模式对应最大采集频率, 无缓冲区模式在激光发射频率为 20 kHz 时软件出现阻塞, 单缓冲区模式在激光发射频率为 80 kHz 时软件出现阻塞, 不能满足高重复频率 100 kHz 的 SLR, 必须采用新的采集、储存方法。

文中提出采用多缓冲区异步数据储存模式进行

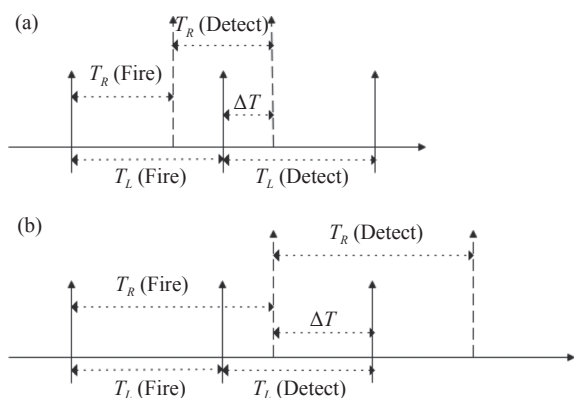


图 4 固定低频脉冲群周期下的激光损失: (a) 固定低频周期小于实际周期; (b) 固定低频周期大于实际周期

Fig.4 Laser loss under the fixed pulse trains: (a) The fixed period is shorter than the actual period; (b) The fixed period is longer than the actual period

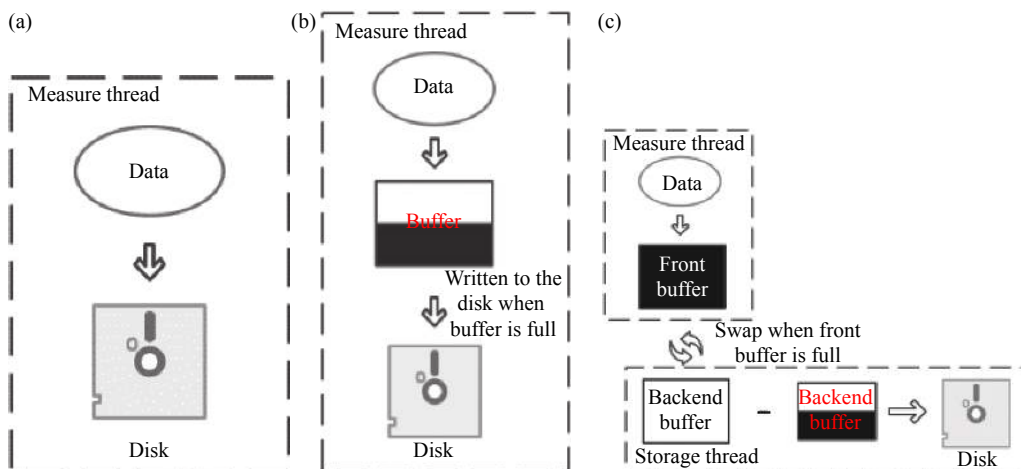


图 5 卫星激光测距系统数据储存模式: (a) 无缓冲区同步模式; (b) 单缓冲区同步模式; (c) 多缓冲区异步模式

Fig.5 Data storage mode of SLR system: (a) No buffer in synchronous mode; (b) Single buffer in synchronous mode; (c) Multi-buffer storage in asynchronous mode

数据实时储存,其工作原理如图 5(c) 所示,具有一个前台缓冲区和多个后台缓冲区,每个缓冲区在不同线程中工作。数据储存过程中,采集线程向前台缓冲区存入测距数据,同时储存线程将后台缓冲区的数据写入到磁盘,若后台缓冲区均为空,则储存线程将休眠。前台缓冲区接收数据达到设定的阈值时,将空的后台缓冲区与前台缓冲区交换,此时原本的前台缓冲区变为后台缓冲区,而原本空的后台缓冲区变为新的前台缓冲区,接收采集线程传输的数据。由于数据写入磁盘在后台储存线程中进行,采集线程不会受限于磁盘 IO 带来时间损失。使用计算机读取实际测距数据至内存中,进行仿真比较三种模式储存 1~200 k 的

等量数据所消耗时间,测试使用的计算机配置为: Intel i5-9300H 八核 CPU, 8 GB RAM, 测得多缓冲区异步数据储存模式储存 200 k 测距数据消耗时间分别是无缓冲区和单缓冲区的 0.1452 与 0.2238 倍,经测试,多缓冲区异步数据储存模式可满足 100 kHz 重复率激光测量要求。

### 3 系统搭建与结果分析

#### 3.1 系统搭建

以中国科学院上海天文台激光测距系统为平台,根据参考文献 [23] 中激光测距基本框架,100 kHz 重复频率激光测距系统框图如图 6 所示。

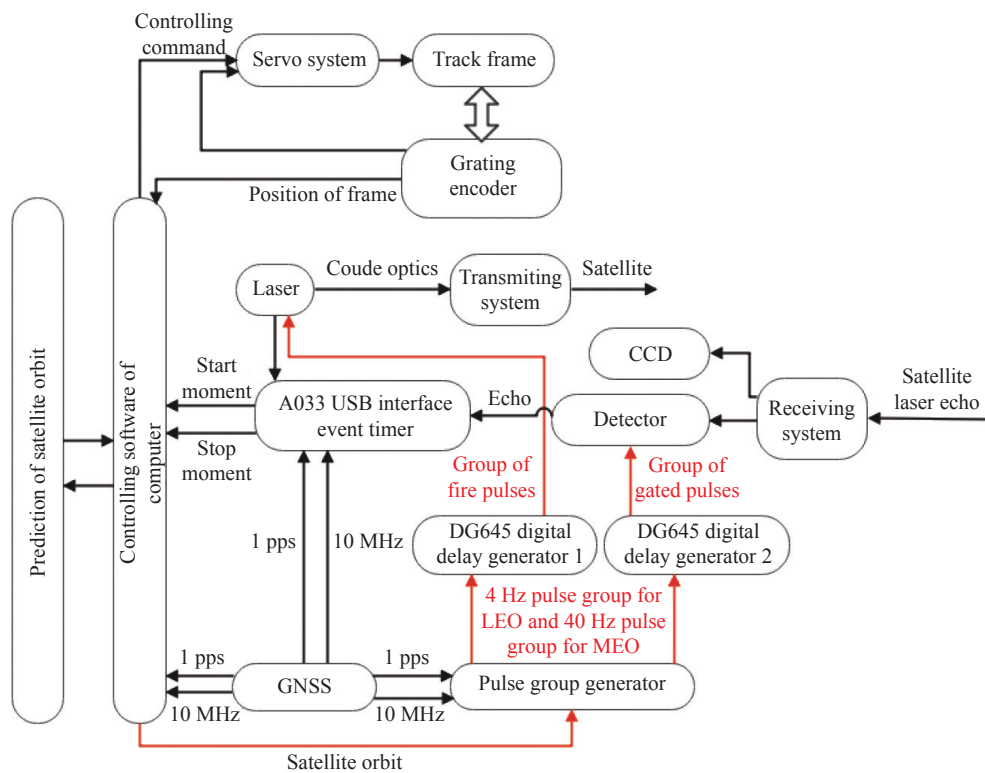


图 6 100 kHz 重复频率 SLR 系统框图

Fig.6 Block diagram of SLR system with 100 kHz PRF

图 6 中,相对于参考文献 [23] 中常规千赫兹重复率激光测距系统,脉冲群发生器基于低频 SLR 的卫星轨道预报值确定给出对应预报的低频 SLR 激光与单光子探测器开启触发信号,低频 SLR 激光开启触发信号触发脉冲群生成器 1 (Pulse group generator 1, 型号为 DG645) 产生脉冲间距  $5 \mu\text{s}$  (200 kHz) 的点火脉冲群信号, 占空比 50%, 激光器经点火脉冲群触发,

发射脉冲群激光脉冲; 同样, 低频 SLR 单光子探测器开启触发信号给脉冲群生成器 2 (Pulse group generator 2, 型号为 DG645) 产生脉冲群信号触发, 再触发单光子探测器。由此, 对应单位时间内总脉冲数为 100 k, 此时频率为 100 kHz。采用华东师范大学提供的低暗噪声 APD 单光子探测器, 同时对接收到的卫星激光回波进行光谱滤波及空间滤波, 降低背景光噪声, 提高

激光回波信号探测成功率。激光脉冲发射时,单光子探测器关闭;单光子探测器开启时,激光脉冲停止发射,由此实现脉冲群收发交替模式,避免单光子探测器在开启时,激光在大气中后向散射光被单光子探测器探测接收,实现后向散射激光的规避。事件计时器(产地:拉脱维亚,型号 USB, A033)记录激光脉冲的主波与单光子探测器的回波时刻,并传输到计算终端,计算终端进行信号识别后,使用多缓冲区数据储存模式存储数据。

经过低频 SLR 触发产生的脉冲群触发信号如图 7 所示,其中波形 1 为低频 SLR 产生的低频 SLR 周期信号,波形 2 为触发脉冲群生成器 1 生成的脉冲激光点火脉冲群信号,触发激光器输出激光脉冲,波形 3 为触发脉冲群生成器 2 生成的单光子探测器触发信号,触发单光子探测器工作。波形 2 与波形 3 中的脉冲群内脉冲之间的间距为 5  $\mu\text{s}$ 。采用重复频率 200 kHz (脉冲间距 5  $\mu\text{s}$ ) 的激光器,激光发射、回波探测交替工作模式 (100 kHz) 下,激光平均输出功率为 8 W,单脉冲能量 80  $\mu\text{J}$ ,各脉冲之间幅值相等。为了

降低回波损失率,根据卫星预报距离的平均值,对近地星 (LEO) 采用 40 Hz 低频,群内脉冲数为 2500 个,远地星 (HEO) 采用 4 Hz,群内脉冲数为 25000 个,即对应单位时间的脉冲数为 100 k。

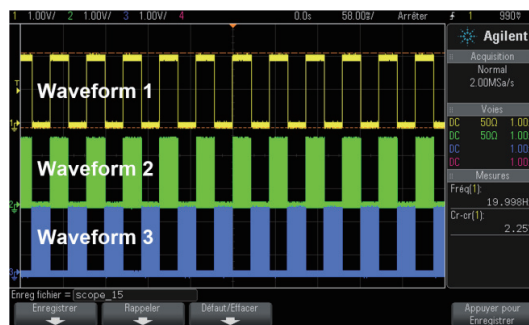


图 7 脉冲群周期信号

Fig.7 Pulse trains periodic signal

### 3.2 测量结果及分析

基于中国科学院上海天文台 60 cm 口径 SLR 系统,由图 6 建立 100 kHz 测距系统,对近地轨道、远地轨道合作目标开展了 100 kHz 重复率激光测量,数据测量及处理结果如表 1 所示。

表 1 100 kHz 重复率激光测距系统观测数据结果

Tab.1 Data result from 100 kHz satellite laser ranging system

Sate name	Number of laser echoes	RMS/cm	Number of normal point	Normal point RMS/ $\mu\text{m}$
Starlette	358 812	0.97	4	32.39
Ajisai	203 465	1.59	2	49.85
Beaconc	393 709	1.85	6	72.22
Lageos2	6 402	1	2	176.75
Stella	225 466	1.1	1	23.17
Glonass105	9 736	2.03	1	205.73
Galileo203	8 401	1.27	1	138.56
Galileo210	4 747	1.1	1	159.66
Galileo218	5 154	0.98	1	136.51
Glonass133	6 706	2.01	1	245.45
Hy2b	363 051	0.86	4	28.55

图 8 为 Ajisai 卫星的脉冲群超高重复频率激光测距激光回波探测实时软件测量显示 (图 8(a)) 与测量数据处理 (图 8(b)), 图 9 为远地星 Glonass105 卫星的测量数据处理, 图 8 和图 9 的数据显示及处理呈现周期性状态,表明单光子探测器在工作时是启停交替方式,体现脉冲群的收发交替模式。

根据参考文献 [21] 中标准点时长以及表 1 中测距点数可以推算出每圈观测数据能够生成的标准点个数及每个标准点内测距数据点数,由公式 (8) 可以计算出每圈观测数据的标准点精度。对近地星的测量,精度最好的结果为 Hy2b 卫星的 28.55  $\mu\text{m}$ ;对远地星的测量, Galileo218 卫星的精度达到 136.51  $\mu\text{m}$ ,相

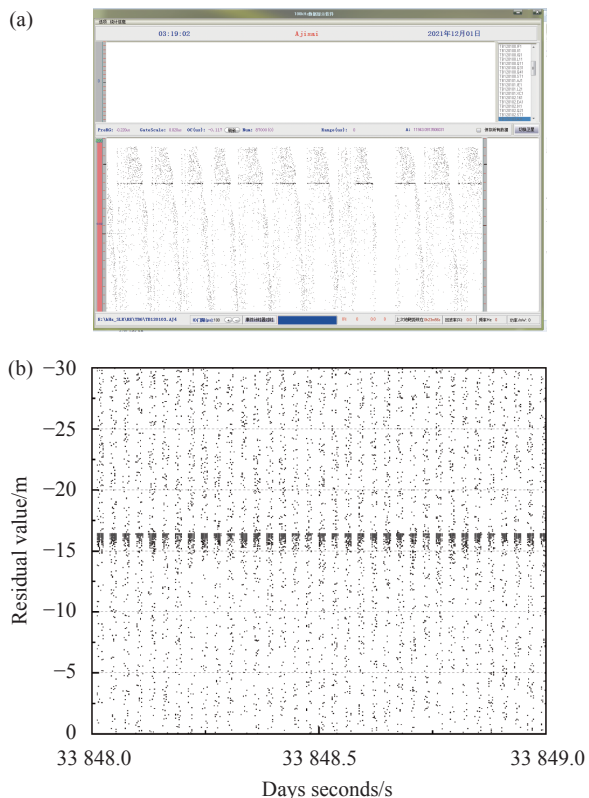


图 8 Ajisai 卫星的 100 kHz SLR 激光回波探测实时显示 (a) 与输出处理 (b)

Fig.8 Real-time display (a) and data processing (b) for 100 kHz SLR laser echoes from the Ajisai satellite

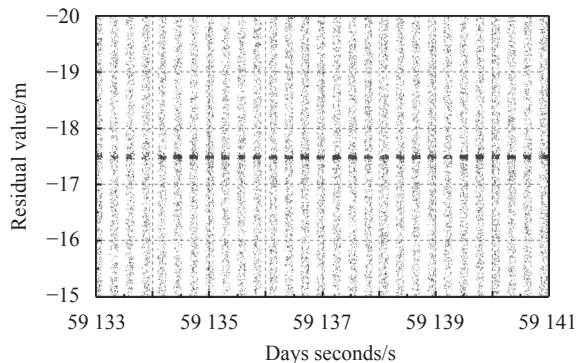


图 9 Glonass105 卫星 100 kHz 重复频激光数据处理结果

Fig.9 Data processing result for 100 kHz SLR for Glonass105 satellite

比德国 Daniel Hampf 等人采用光纤纳秒激光器测量标准点精度<sup>[13]</sup>, 实现了数量级的提高, 体现了皮秒激光在超高重复百千赫兹卫星激光测距上的优势。

### 4 结 论

从激光测距雷达方程出发, 得出单位时间内的回波平均点数与重复频率及回波探测概率关系, 表明测

距重复频率越高, 可降低对激光输出功率、激光脉冲能量、接收望远镜的尺寸的需求。通过重复频率 100 kHz 的 SLR 发射时间段与卫星激光回波接收时间段分隔开, 解决后向散射光对卫星激光回波的干扰; 提出多缓冲区异步数据储存模式, 满足 100 kHz 高重复频率数据采集要求。基于中国科学院上海天文台卫星激光测距系统, 设置激光收发交替控制, 实现 100 kHz 重复频率激光测距, 近地星标准点测距精度最优结果可达到 28.55  $\mu\text{m}$ , 远地星最优标准点测距精度达到 136.51  $\mu\text{m}$ , 验证了脉冲群收发交替对避免后向散射光的有效性。后期进一步通过高速的距离门控编程实现脉冲群可变, 避免脉冲损失。通过文中的研究与试验, 脉冲群交替模式将成为超高重复频率激光测距实现的有效方法, 有力促进了激光测距技术的发展与应用。

**致谢** 该文得到大恒新纪元科技股份有限公司在超高重复频率皮秒激光器与华东师范大学在单光子探测器上的大力支持, 在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] Lucchesi D, Anselmo L, Bassan M, et al. General relativity measurements in the field of earth with laser-ranged state of the art and perspectives [J]. *Universe*, 2019, 5(6): 141.
- [2] Zhang Zhongping, Cheng Zhien, Zhang Haifeng, et al. Global laser ranging observation of beidou satellites and data application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0404004. (in Chinese)
- [3] Shao Kai, Gu Defeng, Ju Bing, et al. Analysis of Tiangong2 orbit determination and prediction using onboard dualfrequency GNSS data [J]. *GPS Solut*, 2020, 24(1): 11.
- [4] Deng Huarong, Zhang Haifeng, Long Mingliang, et al. Research on 4 kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0314002. (in Chinese)
- [5] Sung Ki-Pyoung, Choi Eun-Jung, Lim Hyung-Chul, et al. Development of operation software for high repetition rate satellite laser ranging [J]. *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2016, 44(12): 1103-1111.
- [6] Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, et al. The preliminary results of SLR with 10 kHz laser system at Shanghai Station [C]//International Workshop on Laser Ranging, 2013.
- [7] Gen Rengfang, Wu Zhibo, Tang Kai, et al. Precise control of



- laser emission epoch in laser time transfer with high repetition rate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20200473. (in Chinese)
- [8] Long Mingliang, Zhang Haifeng, Meng Linlin, et al. Satellite laser ranging at high-repetition 10 kHz in all day [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(6): 778-785. (in Chinese)
- [9] Bai Zhenxu, Chen Hui, Gao Xiaoqiang, et al. Highly compact nanosecond laser for space debris tracking [J]. *Optical Materials*, 2019, 98: 109470.
- [10] Deng Huarong, Long Mingliang, Zhang Haifeng, et al. Experiment of satellite laser ranging in daytime based on 1064 nm wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200021. (in Chinese)
- [11] Li Zhulian, Zhai Dongsheng, Zhang Haitao, et al. Superconductivity detector applied to daytime satellite laser ranging experiment and research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190536. (in Chinese)
- [12] Zhang Haitao, Li Zhulian, Tang Rufeng, et al. Application of array detection technology in laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200006. (in Chinese)
- [13] Hampf D, Schafer E, Sproll F, et al. Satellite laser ranging at 100 kHz pulse repetition rate [J]. *Ceas Space Journal*, 2019, 11(4): 363-370.
- [14] Hampf D, Wagner P, Schafer E, et al. Concept for a new minimal SLR system [C]//21st International Laser Ranging Workshop, 2018.
- [15] Dequal D, Agnesi C, Sarrocco D, et al. 100 kHz satellite laser ranging demonstration at matera laser ranging observatory [C]//ILRS Technical Workshop, 2019.
- [16] Courde C, Mariey H, Chabé J, et al. High repetition rate SLR at GRSM [C]//ILRS Technical Workshop, 2019.
- [17] Wang P, Franz K, Georg K, et al. Contributions to sub-MHz SLR in Graz [C]//ILRS Technical Workshop, 2019.
- [18] Wang P, Steindorfer M A, Koidl F, et al. Megahertz repetition rate satellite laser ranging demonstration at Graz observatory [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 937-940.
- [19] Degnan J J. Satellite laser ranging: Current status and future prospects [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1985, 23: 398-413.
- [20] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Long Mingliang, et al. High precision space debris laser ranging with 4.2 W double-pulse picosecond laser at 1 kHz in 532 nm [J]. *Optik*, 2019, 179: 691-699.
- [21] Tyahla L J. Normal point data [EB/OL]. (2018-04-02) [2021-10-28]. [https://ilrs.gsfc.nasa.gov/data\\_and\\_products/data/npt/index.html](https://ilrs.gsfc.nasa.gov/data_and_products/data/npt/index.html).
- [22] Wu Chenyi, Wang Linli, Shi Haotian, et al. Single-photon ranging with hundred-micron accuracy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(17): 174201. (in Chinese)
- [23] Wu Zhibo, Deng Huarong, Zhang Haifeng, et al. Analysis and improvement on stability of satellite laser ranging system [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2019, 38(4): 479-484, 492. (in Chinese)