

doi:10.3788/gzxb20184708.0828002

## 基于 G-SPAD 的卫星激光测距回波特性

刘源<sup>1,2</sup>, 安宁<sup>1</sup>, 范存波<sup>1</sup>, 温冠宇<sup>1</sup>, 张海涛<sup>1</sup>, 马磊<sup>1</sup>

(1 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 长春 130117)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**从盖革模式单光子雪崩光电二极管的光电特性出发,分析了卫星激光测距的测距精度与激光脉冲宽度及回波强度的关系,并利用长春站卫星激光测距系统对地球动力学卫星进行观测,结果表明,当回波光光子数为1 000左右时,系统测距精度为10.2 mm左右,当回波光光子数为8 000时,测距精度减小为9.4 mm左右,表明回波强度较大时,可提高卫星激光测距系统的测距精度;当激光器脉宽为200 ps时,系统测距精度为17.3 mm,当脉宽为50 ps时,系统的测距精度为10.0 mm,表明卫星激光测距系统的测距精度随着脉宽变窄得到了有效提高.为进一步验证理论结果,对 Ajisai 卫星进行实测,分析了高重复频率激光测距系统对系统测距精度的影响,结果表明采用窄脉宽高重复频率的激光测距系统,激光测距有效回波数和标准点密度呈数量级增加,测距精度也有一定的提高.因此,为了改善卫星激光测距系统回波特性,应选用脉宽窄、重复频率高、能量大的激光器作为基于盖革模式单光子雪崩光电二极管的卫星激光测距系统的激光光源.

**关键词:**盖革模式单光子雪崩光电二极管;探测器;卫星激光测距;回波特性;测距精度

中图分类号:P228.5

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0828002-8

## Echo Characteristics of Satellite Laser Ranging Based on Geiger Mode SPAD

LIU Yuan<sup>1,2</sup>, AN Ning<sup>1</sup>, FAN Cun-bo<sup>1</sup>, WEN Guan-yu<sup>1</sup>, ZHANG Hai-tao<sup>1</sup>, MA Lei<sup>1</sup>

(1 Changchun Observatory/NAO, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the photoelectric properties of Geiger mode single photon avalanche diode, the effect of laser pulse width and echo intensity on the satellite laser ranging system range precision is analyzed, and the geodynamics satellite is observed by the satellite laser ranging system of Changchun station. The results indicate that when the number of echo photon is about 1 000, the system ranging precision is about 10.2 mm, while the number of echo photon is about 8 000, the system ranging precision is about 9.4 mm, it shows that stronger echo intensity can improve the system ranging precision. When the laser pulse width is 200 ps, the precision of the system is 17.3 mm, while the pulse width is 50 ps, the system ranging precision is 10.0 mm, it indicates that the system range precision is effectively improved with the narrow pulse width. In order to further verify the theoretical conclusion, the Ajisai satellite is observed. The effect of high repetition frequency laser ranging system on the range precision is analyzed. It shows that by using the narrow pulse width and high repetition frequency system, the returns and data density per normal points are greatly increased and the range precision is also improved. Therefore, to improve the echo characteristics of satellite laser ranging system, the high quality laser with narrower laser pulse width, higher frequency and larger energy should be selected as a laser light source of satellite laser

基金项目:吉林省科技厅基金(No.20170520155JH)资助

第一作者:刘源(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为卫星激光测距技术及应用.Email:liuyuan@cho.ac.cn

导师:范存波(1967-),男,研究员,本科,主要研究方向为卫星激光测距技术及应用.Email:fancb@cho.ac.cn

通讯作者:安宁(1988-),女,助理研究员,博士,主要研究方向为光电子器件设计及应用.Email:ann@cho.ac.cn

收稿日期:2018-02-05;录用日期:2018-05-08

<http://www.photon.ac.cn>

ranging system based on the Geiger mode single photon avalanche diode.

**Key words:** Geiger mode single photon avalanche diode; Detector; Satellite laser ranging; Echo characteristics; Range precision

**OCIS Codes:** 280.3400; 280.3640; 250.1345; 040.1345; 010.3640

## 0 引言

卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)技术自 20 世纪 60 年代由美国 NASA 提出以后,受到了学术界及产业界的广泛关注,目前已成为天文领域的研究热点.SLR 技术通过测量激光往返卫星-地球的时间间隔来获得两者之间的距离,相比激光雷达测距精度更高,可实时监测地球微小的变化,对地球动力学、天文学、宇航学以及地震预报的研究具有重要意义<sup>[1-2]</sup>.

Geiger 模式雪崩光电二极管(Geiger Mode Single Photon Avalanche Diode, G-SPAD)具有单光子探测、高灵敏度以及响应速度快等优势<sup>[3-4]</sup>,现已成功应用于 SLR 系统中.G-SPAD 探测器在工作时,由于存在时间抖动和时间游动特性,会造成输出脉冲时间与实际响应时间之间的误差,从而影响系统的回波特性.1999 年, KIRCHNER G<sup>[5]</sup>等研究了 SPAD 的时间游动效应对 SLR 系统精度的影响;2000 年,范建兴<sup>[6]</sup>等分析了 SPAD 对光子的时间响应特性在 SLR 系统的重要作用;2008 年, MITA<sup>[7]</sup>等研制出用于减少 SPAD 的死时间的新型 SPAD 主动淬灭电路;2012 年, BOZO G<sup>[8]</sup>等设计了一种新的 SPAD 电路来检测非常微弱和非常快的光信号,以拒绝假脉冲对精度的影响;2015 年, PROCHAZK I<sup>[9]</sup>等通过门控电路减少 SPAD 的暗噪声数,进而提高测距精度.

目前的研究侧重于对 SPAD 探测器的特性如时间抖动、死时间及暗计数噪声等方面的研究,但对于 SPAD 探测器特性影响应用系统性能方面的研究较少.在 SPAD 探测器工作时,回波信号和噪声都会使得探测器产生雪崩效应,因此,回波信号强度影响 SPAD 探测器的探测效率<sup>[10-12]</sup>.基于 G-SPAD 探测器的激光测距系统中,激光脉冲宽度越宽,回波光子的分布的范围越广,对探测到回波信号光子的概率会有一定的影响.本文从激光雷达方程角度出发,基于 G-SPAD 光电特性,分析了激光回波强度、脉宽与 SLR 系统回波特性的关系,并分析了不同重复频率的激光测距系统对系统回波特性的影响.同时,结合长春站 SLR 系统的实测结果进行分析与讨论.

## 1 理论分析

在 SLR 工作过程中,地面测站根据卫星预报引导望远镜跟踪目标卫星后,激光器发射激光脉冲至目标卫星,并由目标卫星表面的角反射器反射回地面测站,同时利用接收望远镜将回波脉冲信号输送至控制系统,最后通过测出激光脉冲往返地-星间的时间间隔获得地-星间的距离  $R$ <sup>[13]</sup>,即

$$R = c \Delta t / 2 \quad (1)$$

式中,  $c$  为光速.SLR 工作原理如图 1.

在卫星激光测距过程中,当激光脉冲从目标卫星返回时, G-SPAD 从距离门控电路获得开门指令等待激光信号,利用光伏效应将该光信号转化为电信号,然后关闭距离门等待下一个脉冲的到来.此过程中,不论是回波信号还是噪声,都可能激发 G-SPAD 输出信号关闭距离门并等待下个脉冲<sup>[5,7]</sup>.当距离门开始时刻, G-SPAD 探测器处于正常工作状态.当探测到信号时, G-SPAD 探测器将产生雪崩效应.在 SLR 系统中,为了减少噪声、降低系统的虚警率,常采用距离门控技术(即时间滤波)严格控制 SPAD 的接收时间.为了避免距离门控信号引起测量误差,距离门控信号至少有 80 ns 的提前量<sup>[14]</sup>.当目标回波位于 80 ns 时,可减少噪声对系统精度的影响,也能降低噪声对回波信号的淹没.

由 G-SPAD 的光电特性可知,回波光电子数  $N_e(t)$  随时间的变化分布<sup>[15]</sup>为

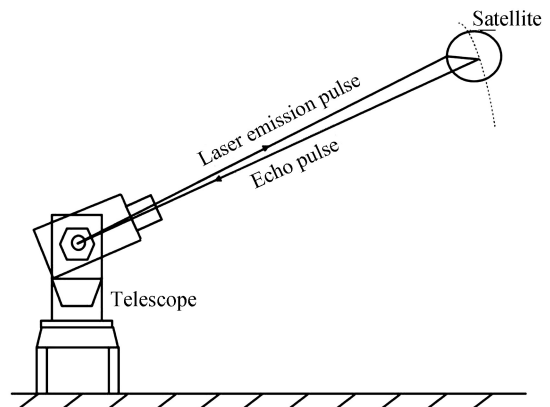


图 1 SLR 原理

Fig.1 Principle diagram of the SLR

$$N_e(t) = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\sigma_s^2}\right] + \eta m_b t \quad (2)$$

式中,  $\sigma_s = p_w/2.3548$ ,  $N_s$  为单脉冲平均信号光子数,  $\sigma_s$  为回波脉冲宽度,  $p_w$  为激光脉冲宽度,  $t_d$  为目标回波位置,  $\eta$  为 G-SPAD 的光电转化率,  $n_b$  为入射到 G-SPAD 的噪声光子数。

回波光子数直接决定了 SLR 系统对卫星的探测成功几率。根据激光雷达方程, 激光照射卫星反射回来的平均信号光子数  $N_s$  为<sup>[16]</sup>

$$N_s = \frac{16 \cdot E \cdot N_0 \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta_t \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2} \quad (3)$$

式中,  $E$  为激光单脉冲能量(激光波长为 532 nm),  $N_0$  为每焦耳能量的光子数,  $A_s$  为卫星上角反射器的有效面积,  $A_r$  为接收望远镜的有效面积,  $K_t$  为发射系统的效率,  $K_r$  为接收系统的效率,  $T$  为双层大气透过率,  $\eta_t$  为 G-SPAD 探测器的量子效率,  $\alpha$  为衰减因子(包括卫星反射器效率、大气抖动及湍流等影响),  $R$  为星-地间距离,  $\theta_t$  为激光光束发散角,  $\theta_s$  为卫星角反射器的发散角。

将式(3)代入式(2)可得

$$N_e(t) = \frac{16 \cdot E \cdot N_0 \cdot A_s \cdot A_r \cdot K_t \cdot K_r \cdot T^2 \cdot \eta_t \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot \theta_t^2 \cdot \theta_s^2} \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\sigma_s^2}\right] + \eta m_b t \quad (4)$$

由式(4)可知, 在其他条件一定时, 平均光电子数随着激光器单脉冲能量线性增加, 当发射波长为 532 nm, 单脉冲能量为 10 mJ 时, 平均信号光子数为 0.48 个, 光电子数为 0.014 个。当单脉冲能量为 50 mJ 时, 平均信号光子数为 2.38 个, 光电子数为 0.069 个。表明激光器发射能量越大, 所包含的光子数越多, G-SPAD 探测器可探测到的光电子数越多。

对于 G-SPAD, 光子转化成光电子的这一过程符合泊松分布。对光子计数  $k$  统计后发现, 探测器探测到激光光子信号和噪声的概率密度分布函数  $P_s$  为

$$P_s = \frac{(N_s + N_n)^k}{k!} \exp[-(N_s + N_n)] \quad (5)$$

当噪声数一定时, 具有不同个数的回波光子数  $N_s$  的光子计数  $k$  的概率密度也不同。当噪声是定值时, 随着回波信号光子数  $N_s$  的增多, 概率分布曲线所包围的光子计数  $k$  的概率密度曲线所包围的面积越大, 即 G-SPAD 探测到回波光子数的概率越大。

SLR 系统的测距精度  $R_p$  是系统回波特性的一个重要参数, 它表示探测距离偏差平均距离的程度, 即探测距离的离散程度。由式(2)可知, G-SPAD 探测信号的概率随时间的分布  $P(t)$  为

$$P(t) = \frac{1 - \exp[-N_e(t)]}{1 - \exp[-N_e(g_w)]} \quad (6)$$

式中,  $g_w$  为距离门持续时间。将概率分布  $P(t)$  对时间求导可得 G-SPAD 探测到信号的概率密度函数为

$$f_p(t) = \frac{\partial P(t)}{\partial t}, \text{ 即}$$

$$f_p(t) = \begin{cases} \frac{\eta m_b \exp(-\eta m_b t)}{1 - \exp(-N_s - \eta m_b t)} (0 < t < t_d) \\ -\frac{\left\{ \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \frac{t-t_d}{\sigma_s^2} \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\sigma_s^2}\right] + \eta m_b \right\} e^{-[N_e(t)]}}{1 - \exp(-N_s - \eta m_b t)} (t_d < t < g_w) \end{cases} \quad (7)$$

根据统计理论可得, G-SPAD 探测到信号所需时间的均值与方差为

$$\bar{t} = \frac{\int t f_p(t) dt}{\int f_p(t) dt} \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{\int t^2 f_p(t) dt}{\int f_p(t) dt} - \bar{t}^2 \quad (9)$$

由式(7)~(9)可得,SLR系统的测距精度公式为

$$R_P = \frac{\sigma}{2} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \left\{ \int_0^{t_d} \frac{t^2 \eta n_b \exp(-\eta n_b t)}{1 - \exp(-N_s - \eta n_b t)} dt - \left[ \int_0^{t_d} \frac{t \eta n_b \exp(-\eta n_b t)}{1 - \exp(-N_s - \eta n_b t)} dt \right]^2 \right\}^{1/2} \\ \left\{ \int_{t_d}^{g_w} \frac{-t^2 \left\{ \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \frac{t-t_d}{\sigma_s^2} \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\sigma_s^2}\right] + \eta n_b \right\} e^{-[N_e(t)]}}{1 - \exp(-N_s - \eta n_b t)} dt - \left[ \int_{t_d}^{g_w} \frac{-\left\{ \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \frac{t-t_d}{\sigma_s^2} \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\sigma_s^2}\right] + \eta n_b \right\} e^{-[N_e(t)]}}{1 - \exp(-N_s - \eta n_b t)} dt \right]^2 \right\}^{1/2} \\ \frac{1}{2} \left\{ \int_{t_d}^{g_w} \frac{-t \left\{ \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \frac{t-t_d}{\sigma_s^2} \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\sigma_s^2}\right] + \eta n_b \right\} e^{-[N_e(t)]}}{1 - \exp(-N_s - \eta n_b t)} dt - \left[ \int_{t_d}^{g_w} \frac{-\left\{ \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \frac{t-t_d}{\sigma_s^2} \exp\left[-\frac{(t-t_d)^2}{2\sigma_s^2}\right] + \eta n_b \right\} e^{-[N_e(t)]}}{1 - \exp(-N_s - \eta n_b t)} dt \right]^2 \right\}^{1/2} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (0 < t < t_d) \\ (t_d < t < g_w) \end{array} \quad (10)$$

从式(10)可知,回波强度  $N_s$ 、激光脉冲宽度  $p_w$ 、噪声背景  $n_b$ 、目标回波  $t_d$ 、距离门持续时间  $g_w$  及 G-SPAD 的光电转化率  $\eta$  等均影响着 SLR 的回波特性。根据长春站 SLR 系统参数<sup>[14,17]</sup>,  $n_b = 200$  kHz,  $t_d = 80$  ns,  $g_w = 200$  ns,  $\eta = 0.2$ , 结合式(10), 取  $N_s$  为 (0, 10), 计算得到激光脉冲宽度与测距精度的关系曲线, 结果如图 2。

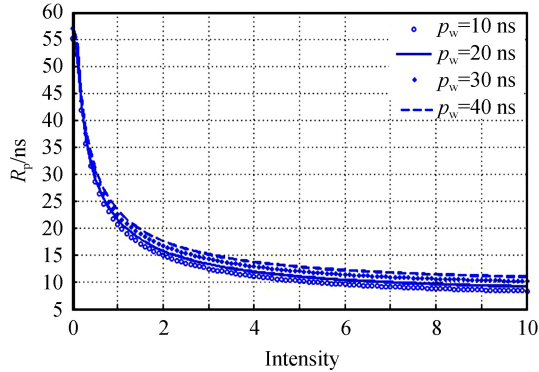


图 2 测距精度与回波强度的关系

Fig.2 Relationship between precision and echo intensity

由图 2 可知,当激光脉宽一定时,SLR 系统的测距精度随着回波强度的增加而减小;当回波强度一定时,SLR 系统的测距精度随着脉宽的减小得到明显改善。

## 2 实验

为了验证由公式推导的理论结果,利用长春站 SLR 系统对 LAGEOS-1 卫星进行实测。首先下载当日卫星预报星历,将卫星地固坐标转换为测站坐标,获得目标卫星的方位、高度及距离等信息。选定目标卫星,由伺服控制系统引导望远镜跟踪目标卫星,待稳定跟踪后发射激光脉冲,由 PIN(Positive-Intrinsic-Negative) 光电二极管产生激光脉冲的同步信号输送到恒比鉴别器(Constant-Fraction Discriminator,CFD),并输出主波信号进入事件计时器 A 通道,控制系统记录主波时刻;从目标卫星反射回的光子经接收望远镜汇聚到 G-SPAD 的阴极面产生回波信号,将光信号转化成电信号,并将回波电信号输送到事件计时器 B 通道并记录回波时刻;则主波时刻与回波时刻之差可算出地-星间的距离。为了获得最佳测距结果,在测距过程中应不断调整激光光束指向位置或望远镜指向,若成功观测到目标,在观测窗口内将出现识别数据。长春站 SLR 系统结

构如图 3 所示.

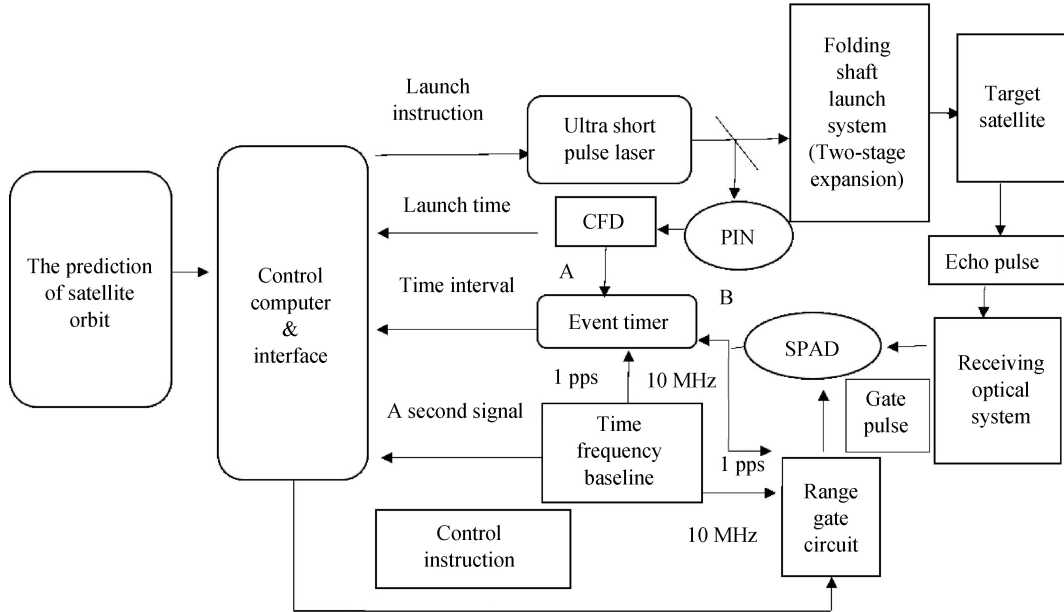


图 3 长春站 SLR 系统结构

Fig.3 Diagram of Changchun station of SLR system structure

图 4 为长春站对 LAGEOS-1 卫星进行实测的观测界面.其中,数据线代表 SLR 系统跟踪卫星识别到的有效数据.

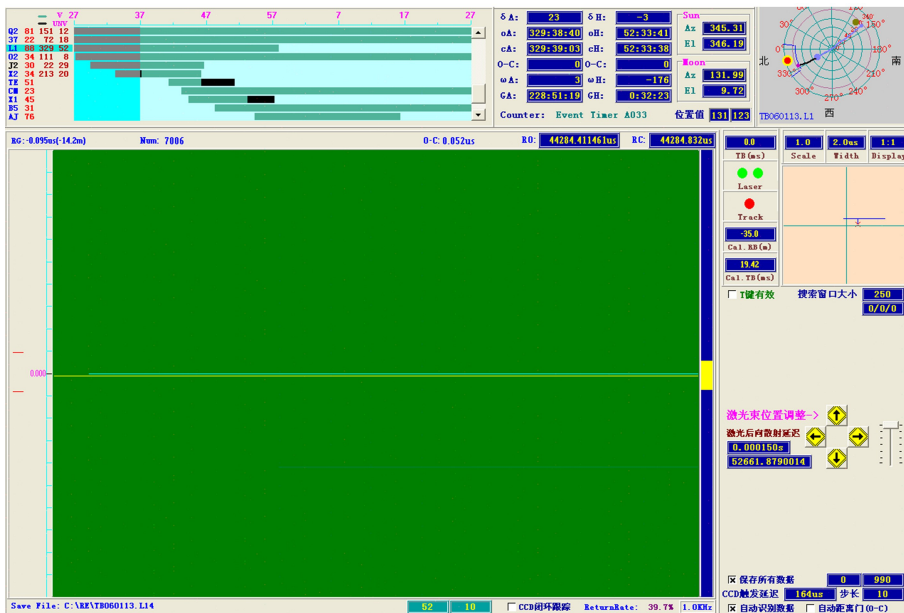


图 4 LAGEOS-1 卫星观测数据界面

Fig.4 Observation data interface of LAGEOS-1 satellite

### 3 结果与讨论

根据长春站 SLR 系统参数,将  $p_w=50$  ps,  $n_b=200$  kHz,  $t_d=80$  ns,  $g_w=200$  ns,  $\eta=0.2$ ,  $\sigma_s=p_w/2.3548$  代入式(10),经计算后可知此次测距过程测距精度  $R_{P-theory}$  为 9.3 mm.在相同回波强度下,长春站 SLR 系统对 LAGEOS-1 卫星的实测精度  $R_{P-experiment}$  为 10.8 mm;相对误差率为  $\alpha = \frac{10.8-9.3}{10.8} \times 100\% = 13.9\%$ ,理论计算值与实测结果较符.图 5 为 LAGEOS-1 数据处理界面.

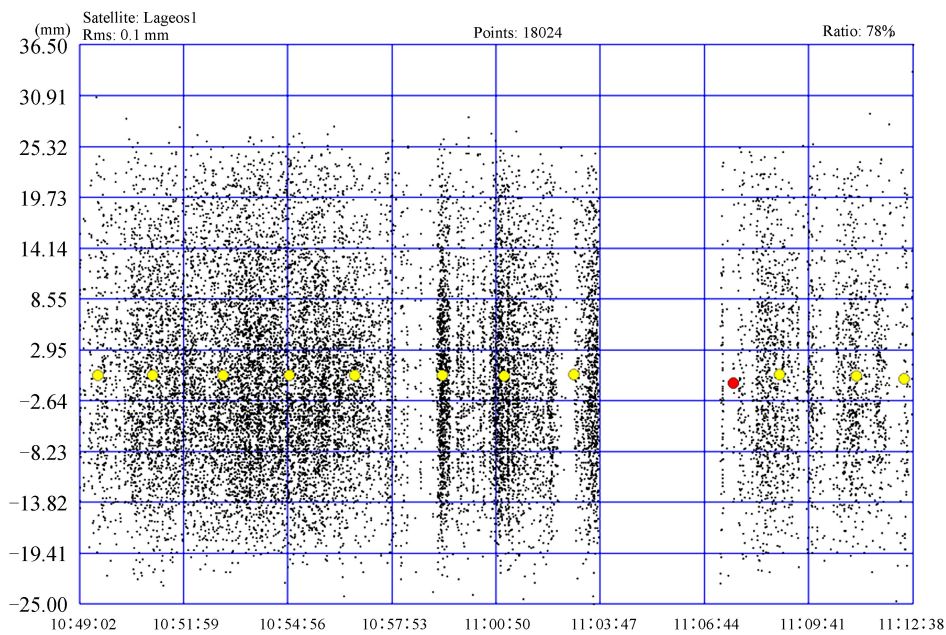


图5 LAGEOS-1 数据处理界面  
Fig.5 Interface of data processing about LAGEOS-1

此次测量结果共获得 LAGEOS-1 有效观测点数 18 024 个,数据处理后测距精度为 10.8 mm,满足国际对于第四代 SLR 系统测距精度(毫米量级)的要求。

同时,对长春站 2018 年 1 月关于 LAGEOS-1 卫星的观测标准点数据进行统计分析.结果表明,测距精度随着回波光电子数的增多而逐渐提高,当回波光电子数为 1 000 左右时,系统测距精度  $R_p$  为 10.2 mm 左右;当回波光电子数为 8 000 时,测距精度  $R_p$  减小为 9.4 mm 左右.这表明随着回波强度的增加,系统的测距精度得到了有效改善,与理论推导结果相一致.图 6 为长春站观测 LAGEOS-1 卫星标准点数据.其中,标准点数据为在规定的时间内(LAGEOS-1 卫星为 120 s)将所有已经识别到的有效数据进行压缩而得的数据,RMS 为标准点数据的内符精度。

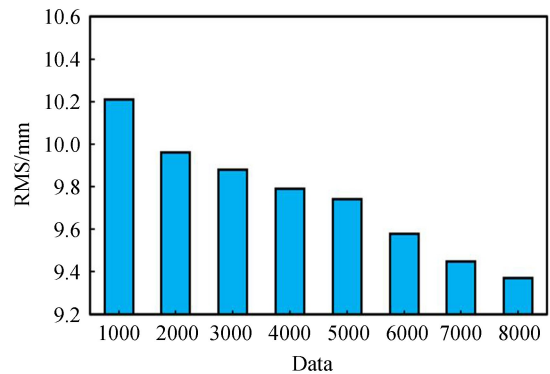


图6 长春站观测 LAGEOS-1 卫星数据  
Fig.6 Lageos-1 satellite data at Changchun station

为了验证 SLR 系统中激光器脉宽对测距精度的影响,对比了采用不同脉宽的激光器对 LAGEOS-1 卫星观测的测距精度,结果见表 1。

表 1 不同脉宽的激光器对 LAGEOS-1 卫星观测的测距精度

Laser type	Repetition frequency/Hz	Pulse width/ps	LAGEOS-1 RMS/mm
Nd : YAG laser	10	200	17.3
Kilohertz laser	1 000	50	10.0

由表 1 可知,采用不同脉宽的激光器将导致 SLR 测距精度不同.当激光器脉宽为 200 ps,重复频率为 10 Hz 时,系统测距精度为 17.3 mm;当脉宽为 50 ps,重复频率为 1 kHz 时,系统的测距精度为 10.0 mm。

为了进一步验证系统的测距精度与激光器脉宽的关系,分析 Graz 站和长春站使用不同脉宽的激光器对近地星 Ajisai 实测的数据.结果见表 2<sup>[18-19]</sup>。

表 2 使用不同脉宽的激光器对 Ajisai 卫星的观测结果  
Table 2 Observation of the Ajisai satellite by lasers with different pulse width

Station	Pulse width/ps	Ajisai RMS/mm
Graz	10	8.81
Changchun	50	11.7

从表 2 可知,对于 Ajisai 卫星,选用较窄脉宽激光器的 Graz 站的测距精度较高,其测距精度是长春站测距精度的 0.75 倍左右,表明选用窄脉宽激光器能有效减小由脉宽造成的测距误差,提高卫星激光测距系统的测距精度.

选用不同重复频率激光器的 SLR 系统对 Ajisai 卫星观测的结果见表 3<sup>[18-19]</sup>.

表 3 不同重复频率测距系统对 Ajisai 卫星的观测结果  
Table 3 Observations of the Ajisai satellite by different frequency ranging system

Station	Repetition frequency/kHz	Ajisai RMS/mm	Returns/Pass
Graz	2	8.81	>1 000 000
Changchun	1	11.7	53 241

从表 3 可知,使用高重复频率激光器的 SLR 系统的测距精度较高,这是因为选用高重复频率的激光器可增加 SLR 系统单位时间内的测距次数,提高观测数据量,进而改善系统的测距精度.

因此,为了提高 SLR 系统测距精度,改善 SLR 系统的回波特性,应选择重复频率高、脉宽窄、能量大的高性能激光器作为基于 G-SPAD 的卫星激光测距系统的激光光源.

## 4 结论

本文从激光雷达测距原理出发,基于 G-SPAD 的光电特性,研究了 SLR 系统的回波特性,并利用长春站 SLR 系统对 LAGEOS-1 卫星进行实测.结果表明,LAGEOS-1 的 SLR 理论测距精度为 9.3 mm,长春站的实测值为 10.8 mm,相对误差率为 13.9%.当回波光电子数为 1 000 左右时,系统测距精度  $R_p$  为 10.2 mm 左右,当回波光电子数为 8 000 时, $R_p$  减小为 9.4 mm 左右,表明系统的测距精度随着回波光电子数的增多逐渐减小.另外,为进一步验证理论研究,对 Ajisai 卫星进行实测.通过比较 Graz 站和长春站采用不同重复频率的测距系统对 Ajisai 卫星观测的结果,可知采用高重复频率测距系统的 Graz 站的测距精度高于长春站.高重复频率的激光测距系统的有效回波数和标准点精度也明显得到提高.因此,为了提高 SLR 系统回波特性,应选用脉宽窄、发射频率高、能量大的激光器作为基于 G-SPAD 的卫星激光测距系统的激光光源.

## 参考文献

- [1] COMBRINCK L. Satellite laser ranging[M]. XU G. Sciences of Geodesy- I. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010: 301.
- [2] DENG Hua-rong, WU Zhi-bo, LI Pu, et al. Improvement research on SLR data deviation by using polarization technology for energy regulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(9): 0917005.  
邓华荣, 吴志波, 李朴, 等. 偏振调能技术对 SLR 数据偏差的改善研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(9): 0917005.
- [3] HAN Xiao-chun, WANG Yuan-qing. Application of Geiger-mode APD array in laser radar[J]. *Laser and Infrared*, 2013, **43**(9): 982-985.  
韩小纯, 王元庆. 盖革模式 APD 阵列在激光雷达技术中应用[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(9): 982-985.
- [4] WU Qing-lin, LIU Yun, CHEN Wei, et al. Advanced single-photon detector technologies[J]. *Progress in Physics*, 2010, **30**(3): 296-306.  
吴青林, 刘云, 陈巍, 等. 单光子探测技术[J]. *物理学进展*, 2010, **30**(3): 296-306.
- [5] KIRCHNER G, KOIDL F. Compensation of SPAD time-walk effects[J]. *Journal of Optics a Pure & Applied Optics*, 1999, **1**(2): 163.
- [6] FAN Jian-xing, YANG Fu-min, CHEN Qi-xiu, et al. The time response properties of single photon avalanche diode and its application to laser ranging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(1): 40-43.  
范建兴, 杨福民, 陈启秀, 等. SPAD 的时间响应特性及其在激光测距中的应用[J]. *光电工程*, 2000, **27**(1): 40-43.
- [7] MITA R, PALUMBO G. High-speed and compact quenching circuit for single-photon avalanche diodes[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2008, **57**(3): 543-547.
- [8] BOSO G, MORA A D, FRERA A D, et al. Fast-gating of single-photon avalanche diodes with 200 ps transitions and 30 ps timing jitter[J]. *Sensors & Actuators a Physical*, 2013, **191**(3): 61-67.
- [9] PROCHAZKA I, BLAZEJ J, KODET J. Effective dark count rate reduction by modified SPAD gating circuit[J].

- Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2015, **787**: 212-215.
- [10] FOCHE D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**: 5388-5398.
- [11] WANG Fei, ZHAO Yuan, ZHANG Yu. Range accuracy limitation of pulse ranging systems based on Geiger mode single photon detectors[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**: 5561-5566.
- [12] PHILIP G, STEVEN J, TERRY N. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**: 3261-3276.
- [13] SEEGER G. Satellite Geodesy[M]. Berlin: Walter de Gruyter, 2003: 424-436.
- [14] HAN Li-li. Study on main pulse acquisition circuit of high-accuracy satellite laser ranging[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
韩丽丽. 高精度激光测距主波采集电路的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [15] ZHAI Dong-sheng. Study on key technology of diffuse laser ranging[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences(Yunnan Observatories), 2016.  
翟东升. 漫反射激光测距关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(云南天文台), 2016.
- [16] YANG Fu-min, XIAO Chi-kun, CHEN Wan-zhen, *et al.* The design and measurement results of daytime satellite laser ranging system[J]. *Science China*, 1998, **28**(11): 1048-1056.  
杨福民, 肖焜焜, 陈婉珍, 等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. 中国科学, 1998, **28**(11): 1048-1056.
- [17] ZHANG Zi-ang. Research on detecting system of kHz SLR in daytime[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.  
张子昂. 白天 kHz 卫星激光测距回波探测系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [18] KIRCHNER G, KOIDL F. Graz kHz SLR system: design, experiences and results[R]. Summary in Proc. of 14th International Workshop on Laser GRAZ, AUSTRIA, 2004.
- [19] KUCHARSKI D, KIRCHNER G, OTSUBO T, *et al.* A method to calculate zero-signature satellite laser ranging normal points for millimeter geodesy - a case study with Ajisai[J]. *Earth Planets & Space*, 2015, **67**(1): 34.

**Foundation item:** The Department of Science and Technology Foundation in Jilin Province of China (No.20170520155JH)

引用格式: LIU Yuan, AN Ning, FAN Cun-bo, *et al.* Echo Characteristics of Satellite Laser Ranging Based on Geiger Mode SPAD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0828002

刘源, 安宁, 范存波, 等. 基于 G-SPAD 的卫星激光测距回波特性[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0828002