

基于G-APD阵列的卫星激光测距系统探测性能分析

翟东升^{1,2} 汤儒峰^{1,2} 黄凯^{1,2*} 薛莉³ 李语强¹ 李祝莲¹ 熊耀恒¹

¹中国科学院云南天文台, 云南昆明 650216

²中国科学院大学, 北京 100049

³北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 盖革模式雪崩光电二极管阵列(G-APDs)是近年来新兴的弱光探测器件。基于盖革模式APD探测概率的分析,利用卫星激光测距系统的仿真结果,对G-APDs的卫星激光测距系统进行研究。在回波强度为单光子量级、仅考虑探测器暗计数噪声的情况下,相对于单元探测的单光子探测器,采用阵列探测器能够有效的增加回波信号的探测点数;在同样噪声的情况下,回波强度为多光子时,采用阵列探测器能够减少盖革模式探测器探测概率的极大值相对回波光电子数极大值的漂移量;在回波强度为单光子量级,同时考虑天空背景噪声和探测器暗计数噪声时,采用阵列探测器能够有效降低噪声对信号回波的淹没效应。

关键词 探测器; 盖革模式光电二极管阵列; 数值仿真; 卫星激光测距

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0608007

Analysis on Detection Performance of Satellite Laser Ranging Based on Geiger Mode APD Arrays

Zhai Dongsheng^{1,2} Tang Rufeng^{1,2} Huang Kai^{1,2} Xue Li³ Li Yuqiang¹

Li Zhulian¹ Xiong Yaoheng¹

¹Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China

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

³Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract Geiger-mode avalanche photodiodes (G-APD) arrays is being concerned in ultra-weak-light detection. It is necessary to analyze performance of satellite laser ranging system based on G-APDs before engineering application. In this paper, the way of numerical calculation and simulation is used. In the condition of laser echo in the magnitude of single photon and only considering the dark counting noise, although the detect probability and the degree of identifying detection data are low, the effective detection points are enhanced relative to using a single photon detector. As laser echo in multiphoton and only considering the dark counting noise, the use of G-APDs is able to reduce the output of the detector drift. The laser echo is flooded when the detector working in geiger mode because of the strong noise which contains the dark counting noise and day light noise. The flooding effect is restrained by using G-APDs.

Key words detectors; Geiger mode avalanche photodiode arrays; numerical simulation; satellite laser ranging system

OCIS codes 040.1345; 040.1240; 120.3930

收稿日期: 2015-01-07; 收到修改稿日期: 2015-02-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11403102), 国家自然科学基金联合基金(U1431116)

作者简介: 翟东升(1984—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事卫星激光测距方面的研究。E-mail: zdsxy@ynao.ac.cn

导师简介: 熊耀恒(1955—), 男, 博士, 研究员, 主要从事天文学、空间目标与空间碎片的光电探测方面的研究。

E-mail: xyh@ynao.ac.cn

*通信联系人。E-mail: hklobo@ynao.ac.cn

1 引言

卫星激光测距(SLR)是卫星观测中测量精度最高的技术,通过精确测量激光信号从地面站到卫星的往返飞行时间,获得星地间精确距离^[1]。随着相关学科的日益发展与应用研究的需要,激光测距正朝着高精度、高数据量、高观测弧段(白天激光测距)的方向发展。

观测数据量的增加,可以有效地提高标准点的精度,有利于卫星的精密定轨^[2]。目前,增加观测数据量的主要方式是采用提高激光发射频率的方法来实现的。国际上有些测站已升级为千赫兹测距^[3],国内在国家大科学工程的支持下,几乎全部测站均实现了千赫兹卫星激光测距^[4-6],这些千赫兹测站中测距重复频率最高的可达到2 kHz,上海站在进行着10 kHz测距试验^[7]。然而,由于激光器研制条件的限制,提高激光器重频会限制激光器单脉冲发射能量的提高,而激光在大气中的传输受到灰尘、烟雾、水气等多种因素的影响而衰减,回波能量与距离的四次方成反比,这将限制测距系统的探测距离,尤其是对非合作小尺寸的空间碎片进行测距时更为明显;目前,测距网普遍使用的单光子探测器如工作在盖革模式的雪崩光电二极管(APD),当其工作频率超过10 kHz时,暗噪声剧增,在回波信号较为微弱时,甚至会淹没信号^[8];由于工作在盖革模式APD死时间的限制,在探测器的一个工作周期内仅能被触发一次,若回波信号中包含多个光子时,其他回波光光子将丢失,这也将限制观测数据量的增加,进而影响测距精度的进一步提高。

一般情况下,由于被测空间目标处在绕地球运动状态中,白天和黑夜经过测站的概率相差不多,白天的测距资料将有更有助于测距数据的应用研究^[9]。实现白天测距在技术上要克服在大量背景噪声中识别微弱回波信号的问题,以实现白天测距系统的目标实时跟踪。针对这一问题,白天测距主要采用空间滤波、针孔滤波、时间滤波手段以及在分光路系统中的白天激光光束监视技术来减少背景噪声、提高探测的成功概率^[9-11]。然而,当背景噪声很强时,采用上述方法也不能够有效抑制背景噪声的影响,会出现回波信号被噪声淹没,甚至会烧毁探测器。

工作在盖革模式下的雪崩光电二极管阵列(G-APDs)是近年来新研制的极弱光探测器件,因其具有单光子探测灵敏度、皮秒时间分辨率等特点,国内外相关科研人员对使用G-APDs的三维(3D)激光雷达成像系统开展了大量的研究工作^[12-15]。

针对采用G-APDs作为光电接收器件对卫星激光测距系统性能分析仅有APOLLO测站公布了采用阵列APD能够有效提高测距数据量、实现弱信号的闭环跟踪^[16];南京理工大学报道了将4元G-APDs作为激光测距机接收系统的可行性实验^[17]。而针对采用G-APDs的激光测距系统在不同噪声与回波强度下时的测距数据识别、漂移量以及回波淹没效应的分析却未见报道。本文将结合卫星激光测距的特点,模拟在不同背景噪声与回波强度时的卫星激光测距的探测效果,为今后G-APDs在测距系统的使用提供相应的理论支持。

2 卫星激光测距模型

2.1 回波光子数

卫星激光测距的目标离测站的距离远,且距离变化的范围很大。它是通过测量预报残差O-C(这里O是观测值,C是预报值)来确定卫星与测站的精确位置。

当考虑脉冲展宽时,激光测距的雷达方程可写为^[18-19]:

$$N_{\text{sig}}(t) = 4E_p \frac{\lambda}{hc} \eta_d \eta_r \eta_t \left(\frac{1}{4\pi\theta R^2} \right)^2 S_o A_r T^2 G(t), \quad (1)$$

同时,天光背景的估算公式为^[20]:

$$N_{\text{sky}} = \frac{\pi}{4} N_\lambda \theta_r^2 A_r q \eta_r \eta_d, \quad (2)$$

式中 $N_{\text{sig}}(t)$ 是脉冲回波平均光电子数的时间函数, E_p 是单脉冲激光能量, λ 为激光波长, h 为普朗克常数, c 为激光在真空中的传输速度, η_d 为探测器的量子效率, η_t 为激光发射系统的发射效率, η_r 为回波接收系统的接收效率, R 为目标到测站的距离, S_o 为目标的光学反射截面, A_r 为接收望远镜的有效接收口径, θ_r 为接收视场角, q 为滤光片波段与探测器响应波段之比, N_λ 为平均背景天光亮度, T 为激光穿过单程大气的透过率, $G(t)$ 为脉冲时间展宽函数, 脉冲的展宽受大气以及目标的反射特性共同调制。假设激光是脉宽为 2σ

的高斯脉冲。受大气和目标共同影响的调制函数为 $\mathcal{F}(t')$,那么脉冲时间展宽函数为:

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int \exp\left[-\frac{(t-t')^2}{2\sigma^2}\right] \mathcal{F}(t') dt' . \quad (3)$$

2.2 噪 声

卫星激光测距的噪声由探测器噪声 N_D 和环境噪声 N_B 组成:

$$N_{\text{noise}} = N_D + N_B , \quad (4)$$

对于回波信号强度为单光子量级的卫星激光测距研究,一般使用工作在盖革模式下的雪崩二极管(G-APD)作为探测器。在没有入射光子的暗室情况下,探测器从开门到第一个信号输出的平均时间间隔为 t_{out} ,那么 $1/t_{\text{out}}$ 为G-APD的暗计数。所以,暗计数也可以理解为单位时间内G-APD自身产生的平均光电子数,暗计数是盖革模式探测器噪声的主要部分,可以表示成

$$N_D = 1/t_{\text{out}} . \quad (5)$$

对于白天卫星激光测距来说,环境噪声主要是天光背景以及目标本身亮度的影响。利用(2)式计算天光背景在光电探测器上单位时间产生的平均光电子数 N_{sky} 。目标本身亮度引起的噪声光电子数可以通过目标视星等值来估算:

$$N_{\text{obj}} = 10^{\left(\frac{e_0 - m}{2.5}\right)} \times A_r \frac{\lambda}{hc} , \quad (6)$$

m 是目标视星等, e_0 是零等星对应的流量。卫星激光测距单位时间内产生的噪声平均光电子数为

$$N_{\text{noise}} = N_D + N_{\text{sky}} + N_{\text{obj}} . \quad (7)$$

3 盖革模式 APD 探测性能

雪崩二极管(APD)是利用光生伏特效应将入射光子转换为光生电子,并将光电子放大最终得到输出信号。盖革模式下的APD的工作模式如图1所示,对应于激光测距的工作模式为:发射一个激光脉冲,在预计的信号回波到来之前打开快门,等待信号,记录此时的时刻为 t_n 。 t_{dead} 是盖革模式APD完成一次探测后,外加偏压恢复到大于反向击穿电压的时间。在此过程中,无论是噪声光子还是信号光子激发了APD都会输出一个探测信号并关闭APD,等待下一个脉冲的探测。光电子的激发时刻记为 t'_n ,主波时刻与 t'_n 的时间间隔与目标预报数据之差就是测距残差O-C。通过O-C与预报距离的计算可以精确的得到卫星距离测站的距离。

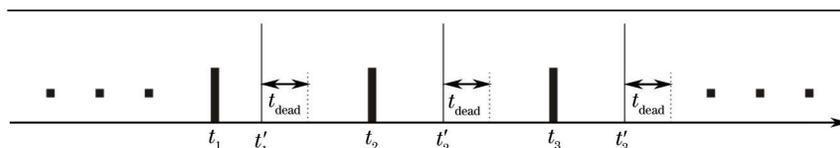


图1 盖革模式APD工作时序图

Fig.1 Timing sequence for Geiger-APD

利用Markus给出的泊松分布探测概率理论来分析盖革模式APD探测性能^[21]。设任意时刻 T_1 到 T_2 探测器累积的平均光电子数为:

$$M(T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} f(t) dt , \quad (8)$$

式中 $f(t) = N_{\text{sig}}(t) + N_{\text{noise}}$,那么在 T_1 到 T_2 时间段内产生 m 个光电子的概率服从泊松分布:

$$P_m(T_1, T_2) = \frac{1}{m!} [M(T_1, T_2)]^m \exp[-M(T_1, T_2)] , \quad (9)$$

探测器能够探测到1个或1个以上光电子的概率为:

$$P_{m \geq 1}(T_1, T_2) = 1 - \exp[-M(T_1, T_2)] . \quad (10)$$

对于盖革模式的单光子探测器,设开门时刻为0时刻,对于任意时间段 T_1 到 T_2 的探测概率应该等于在0到 T_2 时间段探测到的情况下,0到 T_1 时间段没有探测的概率,即

$$P_D(T_1, T_2) = P_{m \geq 1}(0, T_2) \times P_{m \geq 1}(\overline{[0, T_1]}[0, T_2]), \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} P_{m \geq 1}(0, T_2) = 1 - \exp[-M(0, T_2)] \\ P_{m \geq 1}(\overline{[0, T_1]}[0, T_2]) = [P_{m \geq 1}(0, T_2) - P_{m \geq 1}(0, T_1)] / P_{m \geq 1}(0, T_2) \end{cases} \quad (12)$$

那么:

$$P_D(T_1, T_2) = \exp[-M(0, T_1)] - \exp[-M(0, T_2)]. \quad (13)$$

(13)式与 Markus 给出的概率计算公式等价。假设脉冲回波在时域服从高斯分布,噪声均匀分布在 APD 的工作时间范围内,单点 G-APD 探测概率的时域分布如图 2 所示,噪声的概率分布是随时间递减的函数,在回波信号出现以前探测概率分布形成一个概率极小值 P_{val} 。随着回波信号的出现逐渐形成概率相对极大值 P_{peak} 。在此为了后续讨论方便,定义了探测器在触发时刻的信号锐度为 $f_{SSP} = 20 \log(P_{peak}/P_{val})$,其值越高代表测距数据的信号识别度越高。

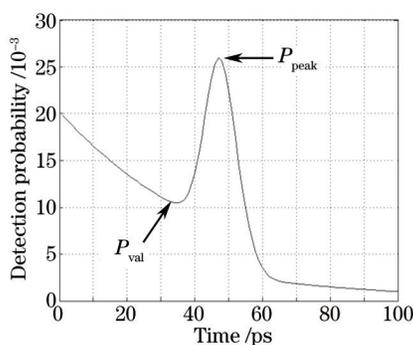


图 2 典型的盖革模式 APD 探测概率

Fig.2 Probability of detection for single Geiger-APD

3.1 单像素盖革模式 APD 性能分析

图 3(a)给出了仅考虑探测器暗计数噪声的情况下,不同信号回波电子数在时间轴上的分布,与之相对应的图 3(b)给出了 APD 被触发的概率随时间的分布图。在低噪声的情况下,随着回波光电子数的增加,信号回波被探测的概率随之提高。然而探测概率的极大值时刻与回波光电子数的极大值时刻并不重合,而且随着回波光电子数的增加,偏移的量越大。对于盖革模式探测器,任意时刻的探测概率受两个因素影响:1) 当前时刻的光电子数;2) 从探测器开门到当前时刻时间段内的光电子数。这导致了探测概率的极大值与光电子数的

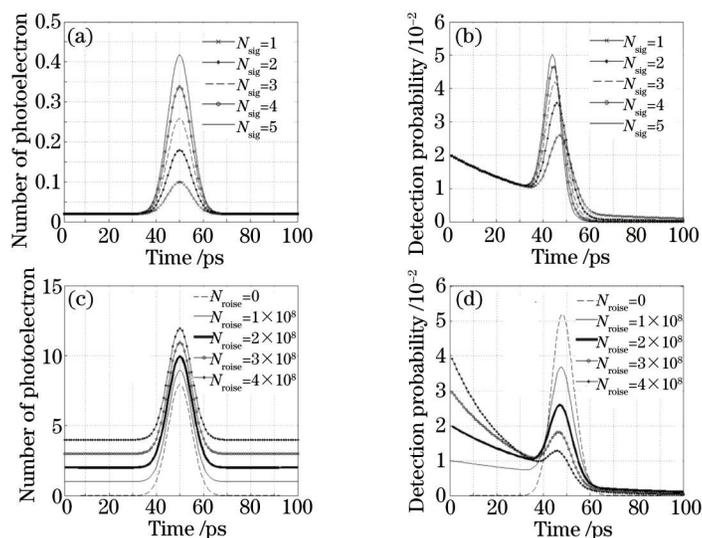


图 3 光电子时间分布对应的探测率

Fig.3 Detection probabilities for different time distributions of photoelectron

极大值不重合的现象。

图 3(c)给出了不同背景噪声情况下,回波强度为一个光子时信号脉冲的回波光电子数在时间轴上的分布,与之相对应的图 3(d)给出了 APD 被触发的概率随时间的分布图。由图可见,对于同样强度的回波信号,随着噪声光电子数的增加,信号被探测的概率逐步降低。这表明,随着噪声的增强,信号的回波被探测的概率受到抑制,在背景噪声足够强的情况下,即使增加信号强度也难以提高其探测概率,此时回波信号被背景噪声所淹没。

3.2 阵列 APD 性能分析

一般情况下,激光测距系统中所使用的阵列 APD 探测器(如 APOLLO 测站),在其感光面前会根据阵列 APD 探测器面元尺寸及面元数量的要求放置不同口径的阵列透镜,通过对激光测距回波接收光学系统后续光路的设计与调整,能够使望远镜接收到的光束以与阵列 APD 前置阵列透镜口径相匹配的平行光入射到阵列透镜的前表面,再经阵列透镜聚焦至阵列 APD 的感光面上。此时,激光测距回波接收光学系统所接收到的信号以及背景回波光电子数将被分成若干份单独探测,最后将探测结果合并输出。这样可以减少背景噪声对信号回波的淹没效应,并有效的减小探测概率的极大值相对光电子数极大值的漂移量。

在数值计算中,将单元数分别为 2 pixel×2 pixel、4 pixel×4 pixel、16 pixel×16 pixel 三种阵列 APD 与单 APD 探测器对比,假设回波信号以及背景噪声都均匀的分布在阵列探测器的光敏面上,且阵列 APD 中每个探测单元的暗计数与单 APD 的暗计数相同。图 4 给出了阵列 APD 与单 APD 探测概率的对比图。同样信号强度与背景噪声的条件下,单 APD 探测概率的极大值时刻相对于回波光电子数的极大值时刻漂移了 97 ps, 2 pixel×2 pixel 阵列 APD 漂移了 26 ps, 4 pixel×4 pixel 阵列 APD 漂移了 7 ps, 16 pixel×16 pixel 阵列 APD 漂移了 0 ps。

由图 4 可以看出,随着阵列探测器单元数的增加,信号探测概率的绝对值逐步下降,但是单位时间信号回波数据点数以及信号锐度才是决定测距数据好坏的标准。通过对阵列探测器不同单元数情况的仿真,得出了探测的信号锐度与探测器单元数量的关系,如图 5 所示。可以看出,当背景噪声较弱时,相对于单元 APD 探测器,阵列 APD 受暗计数过大导致探测的信号锐度降低。当背景噪声较强时,阵列 APD 单元数量存在最优值,此时的信号锐度出现极大值,当 $N_{sky} = 10^8$ 时,信号锐度最大值对应的阵列 APD 单元数为 $N_{ump} = 25$, 而 $N_{sky} = 10^7$ 和 $N_{sky} = 10^6$ 分别对应的最优单元数为 $N_{ump} = 7$ 和 $N_{ump} = 2$ 。

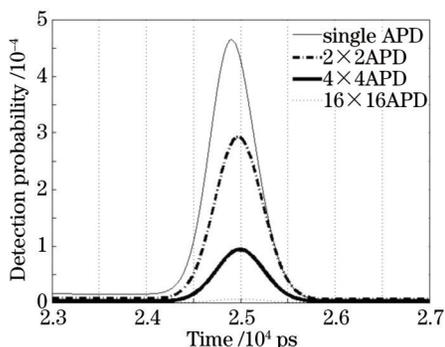


图 4 阵列 APD 探测概率

Fig.4 Detection probability for APD arrays

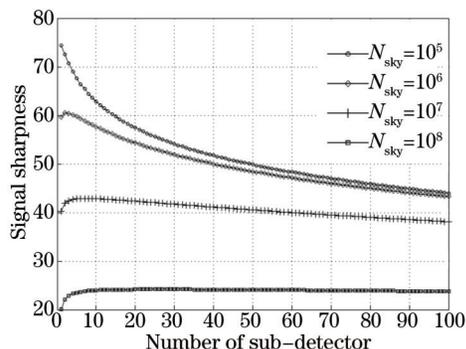


图 5 阵列 APD 的信号探测锐度

Fig.5 Signal detection sharpness for APD arrays

4 基于阵列 APD 的测距系统仿真

为了能够更清晰地描述出采用阵列 APD 对测距系统性能的影响,基于云南天文台千赫兹测距系统参数^[4]并假设阵列探测器的填充因子为 0.9 时,分别对四种探测器进行了 1 s 的仿真,仿真结果如图 6 所示。采用阵列探测器时,探测器单元的探测数据相对于单点探测器探测时的数据随面阵单元数增加而降低,但由于阵列探测器是将各单元探测器的探测结果合并输出,这样极大地增加了单位时间内回波探测的点数。在卫星激光测距的数据处理中,有效的信号回波点数目决定了数据的拟合精度,所以,更多的信号回波点数目能够有效地提高激光测距的精度。

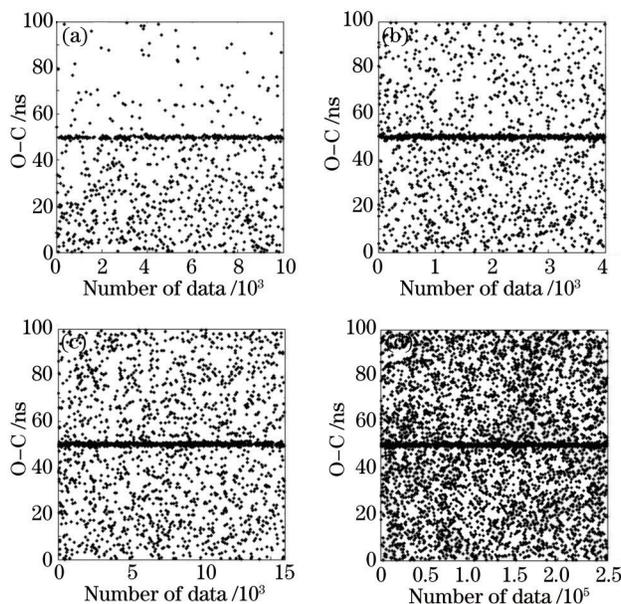


图6 卫星激光测距探测结果仿真。(a)单 APD; (b) 2 pixel×2 pixel APD 阵列; (c) 4 pixel×4 pixel APD 阵列; (d) 16 pixel×16 pixel APD 阵列

Fig.6 Simulation for detection of photoelectron in satellite laser ranging. (a) APD; (b) 2 pixel×2 pixel APD arrays; (c) 4 pixel×4 pixel APD arrays; (d) 16 pixel×16 pixel APD arrays

对于白天激光测距来说,背景噪声的抑制是其主要的技术重点。特别是对于大口径激光测距系统来说,天光背景噪声的影响尤为强烈。

图7给出了在强背景噪声时,阵列 APD 探测器的仿真效果。图7(a)是发生淹没效应的探测结果,图7(b)是相同情况下,4 pixel×4 pixel 阵列 APD 的探测结果。很明显,对于强背景噪声的白天测距,阵列探测器能够有效地消除盖革模式引起的淹没效应。

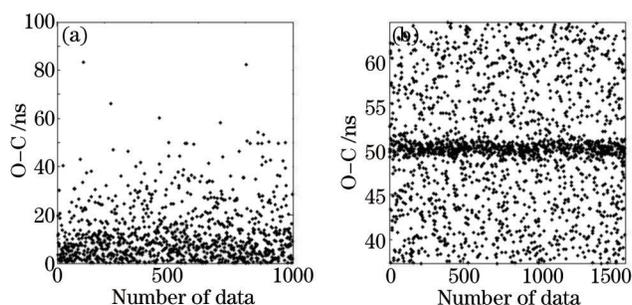


图7 强噪声情况下阵列 APD 探测仿真

Fig.7 Simulation for APD arrays in the case of strong noise

5 结 论

对阵列 APD 在卫星激光测距的探测概率、探测锐度进行了研究分析,并仿真了各种背景噪声条件下阵列 APD 的探测效果。结果表明:阵列 APD 能够有效地降低盖革模式 APD 探测概率极大值的漂移,对于强背景噪声的探测环境,阵列 APD 能够提高信号回波探测的锐度,有利于信号在强背景噪声中的识别。

参 考 文 献

- Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.*. Experiment of laser ranging to space debris based on high power solid-state laser system at 200 Hz repetition rate[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s108005.
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 基于 200 Hz 重复率高功率全固态激光器空间碎片激光测距试验[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s108005.
- Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Yang Fumin, *et al.*. Statistical analysis of successful detection probability of the returns in satellite laser ranging[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(3): 28-29.

- 吴志波, 张忠萍, 杨福民, 等. 卫星激光测距回波探测成功概率统计分析[J]. 测绘科学, 2006, 31(3): 28-29.
- 3 G Kirchner, F Koidl. Graz kHz SLR system: design, experiences and results[C]. Proc of 14th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2004: 2-5.
- 4 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.
郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.
- 5 Li Xin, Wang Peiyuan, Zou Tong, *et al.*. Experiment on kHz laser ranging at Wuhan satellite laser ranging station[J]. High Power Laser and Particale Beams, 2011, 23(2): 367-370.
李 欣, 王培源, 邹 彤, 等. KHz 激光器在武汉卫星观测站的测距实验[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 367-370.
- 6 Zhang Zhongpin, Wu Zhibo, Zhang Haifeng, *et al.*. Experiment of high-repetition-rate SLR[J]. Laser & Frared, 2009, 39(12): 1267-1270.
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.
- 7 Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, *et al.*. The preliminary results of SLR with 10 kHz laser system at shanghai station[C]. Proc of 18th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2013: 13-Po52.
- 8 G Kirchner, F Koidl, Farhat Iqbal, *et al.*. Graz 10 kHz SLR[C]. Proc of 17th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2011.
- 9 杨福民, 肖 焱, 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.
- 10 Han Guangyu, Qu Feng, Guo Jin, *et al.*. Analysis and realization of day-time ranging of SLR[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4): 885-889.
韩光宇, 瞿 锋, 郭 劲, 等. 卫星激光测距中白天测距的分析与实现[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 885-889.
- 11 Y Zhao, X W Han, C B Fan, *et al.*. Fulfilment of SLR daylight tracking of Changchun station[C]. Proc of 15th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, 2006: 587-592.
- 12 B F Aull, A H loomis, D J Young, *et al.*. Gerger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13(2): 334-350.
- 13 M A Albota, R M Heinrichs, D G Kocher, *et al.*. Three dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. Applied Optics, 2003, 41(36): 7671-7678.
- 14 Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong, *et al.*. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0414003.
徐 璐, 张 宇, 张 勇, 等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达积累探测性能的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414003.
- 15 Wu Lijuan, Li Li, Ren Ximing. 3D imaging simulation of APD arrays laser radar system based on Geiger mode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2180-2186.
吴丽娟, 李 丽, 任熙明. 盖革模式 APD 阵列激光雷达的三维成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2180-2186.
- 16 T W Murphy, E G Adelberger, J B R Battat, *et al.*. The apache point observatory Lunar laser ranging operation: instrument description and first detections[C]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2008: 20-37.
- 17 Kou Songfeng, Chen Qian, Gu Guohua, *et al.*. Laser ranging system based on 4-element APD arrays[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 537-540.
寇松峰, 陈 钱, 顾国华. 基于 4 元 APD 阵列的激光测距技术研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 537-540.
- 18 J J Degnan. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review[J]. Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology, 1993: 133-162.
- 19 J J Degnan. Optimization of the correlation range receiver parameters in SLR2000[C]. Proceedings of the 13th International Laser Ranging Workshop, 2002: 3-7.
- 20 叶叔华, 黄 斌. 天文地球动力学[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 2000.
- 21 M Henriksson. Detection probabilities for photon-counting avalanche photodiodes applied to a laser radar system[J]. Applied Optics, 2005, 44 (24): 5140-5147.