

10 kHz 重复率全天时卫星激光测距

龙明亮^{1*}, 张海峰^{1,2*}, 门琳琳^{1,3}, 吴志波^{1,2}, 邓华荣¹, 秦思¹, 张忠萍^{1,2}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院卫星与碎片观测重点实验室, 江苏南京 210008;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在上海天文台 1 kHz 卫星激光测距系统上, 通过 885 nm 端面泵浦 Nd:YAG 实现对激光器改进和升级; 对泵浦电流、Nd:YAG 冷却水温及再生放大建立周期加以控制, 在 10 kHz 下获得 6 W 功率 532 nm 近等幅值皮秒激光脉冲输出, 发散角 0.6 mrad, 脉宽 30 ps, 光束质量 $M^2=1.2$ 。测量与分析各重复率 1 kHz、2 kHz、4 kHz、5 kHz、6.25 kHz、10 kHz 下单光子探测器噪声水平、虚警概率与距离门控的关系, 噪声光子数 N 与重复率 f 关系为 $N = 743784.76 + 431.08f$; 重复率 10 kHz 下虚警探测概率 P 与距离门控 Δt 关系为 $P(\Delta t) = 1 - e^{-5054584.76 \times \Delta t}$, 获得的含噪声、测量频率与激光能量的激光回波数表达式对测距系统设计有一定指导作用。通过距离门控控制实现了 10 kHz 全天时卫星激光测距, 并实现同步轨道 3.6×10^4 km 的北斗卫星 Compassi6b 白天测量。

关键词: 卫星激光测距; 10 kHz 重复率; 噪声测量; 单光子探测; 同步轨道

中图分类号: P2 **文献标识码:** A

Satellite laser ranging at 10 kHz repetition rate in all day

LONG Ming-Liang^{1*}, ZHANG Hai-Feng^{1,2*}, MEN Lin-Lin^{1,3}, WU Zhi-Bo^{1,2}, DENG Hua-Rong¹,
QIN Si¹, ZHANG Zhong-Ping^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the satellite laser ranging (SLR) system at Shanghai Astronomical Observatory, the laser output energy was increased by using the 885 nm end-pumped Nd:YAG amplification. Each pulse of 10 kHz was obtained near-equal amplitude by controlling the pump gain current, Nd:YAG crystal cool water temperature and building time of regeneration amplification. An average power of 6 W picosecond laser in a wavelength of 532 nm was obtained at a repetition rate of 10 kHz with the divergence angle of 0.6 mrad, pulse width of 30 ps, a beam quality M^2 of 1.2. The noise levels for single photon detector at each repetition rate of 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 5 kHz, 6.25 kHz, and 10 kHz was measured and analyzed respectively. The relationship between the false alarm probability and the ranging gating is obtained. The relationship between the number (N) of noise photons and the repetition rate (f) is $N = 743784.76 + 431.08f$, and the relationship between the false alarm detection probability (P) and the ranging gated (Δt) at the repetition rate of 10 kHz is $P(\Delta t) = 1 - e^{-5054584.76 \times \Delta t}$, and also the function of the number of laser echoes with noise, laser energy and repetition are obtained, which is beneficial to design the SLR system. Therefore, it realizes the satellite laser ranging in all day, and the farthest distance was to the synchronous orbit of Beidou Compassi6b satellite.

Key words: satellite laser ranging, 10 kHz repetition rate, noise measurement, single photon detection, synchronous orbit

PACS: 95.45.+i, 95.55.Cs, 06.20.DK

收稿日期: 2019-12-08, 修回日期: 2020-09-05

Received date: 2019-12-08, Revised date: 2020-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(U1631240, 11503068)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1631240, 11503068)

作者简介(Biography): 龙明亮(1989-), 男, 湖南邵阳人, 副研究员, 博士, 主要从事卫星/空间碎片激光测距技术及应用研究

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zzp@shao.ac.cn, E-mail: F_CEO_beifeng@126.com

引言

卫星激光测距(SLR)技术通过对卫星距离的高精度测量,在卫星轨道、地心引力参数、地球重力场参数、相对论验证、高精度时间比对等领域的科学研究广泛应用^[1-4]。如今,随着航天航空业的发展,人类向太空发展的加速,特别是近些年来欧洲与中国的导航卫星系统相继将近完成,及以美国马斯克 splink、Oneweb 等为代表的星链计划掀起了对地球外太空商业化应用热潮^[5],未来将有成千上万的卫星发射至地球表面,对地球轨道资源带来强大的冲击,增大了对卫星轨道数目预报需求。随着激光技术不断发展以及各领域研究需求,SLR 重复率由早期使用低频率(几十赫兹)向高重复率技术发展^[4,6-12]。在2003年,国外 Graz 已经实现了 2 kHz 的 SLR,随后几年里,我国各卫星测距站迅速发展达到了 1 kHz 水平^[4,8-10]。在2013年,上海天文台通过对原有 1 kHz 的 SLR 系统事件计时器、距离门控、数据处理软件等硬件与软件方面改进,在 3 W、10 kHz 的 532 nm 皮秒激光下,实现了 10 kHz 白天与晚上低轨道到高轨道 2.0×10^4 km 的卫星测距^[10]。同年,韩国实现了 2 kHz 的 SLR^[11],并迅速向高重复率激光测距发展,其后至 2015 年通过技术升级改进实现了 10 kHz 的 SLR^[12],由于其 10 kHz 激光器功率偏低,功率仅 0.5 W,未见对同步轨道卫星全天时测距报道。

SLR 的频率越高,在越短的时间内,能够获得更多卫星距离数据,提高卫星距地距离及卫星轨道精度,增强卫星姿态探知能力。2018 年上海天文台在 4 kHz 重复率 SLR 下分析了测距数据量与标准点精度,结果表明 4 kHz 重复率测量数据量和标准点数据精度比 1 kHz 重复率的分别提高了约 2.62 倍和 1.62 倍^[13]。最近,德国的 Daniel Hampf 等人实现了 100 kHz 的高轨 2.0×10^4 km 的 SLR,采用脉宽 10 ns 光纤激光器,测距精度达到了 5~15 mm,进一步说明了高重复率激光测距的测距精度优势^[14]。

综上,高重复率激光测距是国际 SLR 技术发展重要方向。目前 SLR 普遍采用皮秒激光器,皮秒激光脉宽窄,峰值功率高,易对光学器件造成损坏,不容易获得大能量或高功率激光输出,白天的 SLR,背景噪声强,特别是高重复率测距,探测器暗噪声也强,由此激光能量与噪声情况限制了 SLR 系统探测能力提高,以此,本文进行激光器功率提升与噪声方面的分析。通过对激光器升级设计,增加激光放大模块,实现了重复率 10 kHz,功率 6 W 输出的 532

nm 皮秒激光,分析单光子探测器的光子噪声数水平,最后实现对同步轨道 3.6×10^4 km 卫星白天与夜晚的激光测距,为高重复率激光测距系统优化与设计提供有效的途径。

1 脉冲等幅值 10 kHz 重复率激光器系统

上海天文台 60 cm 的 SLR 系统如文献[8]所述,为了实现 10 kHz 的测距,在 2013 年实现了系统的改造,使得测距系统接收及数据处理满足 10 kHz 的测量需求。采用 10 kHz 的 3 W 皮秒 532 nm 激光,由于其功率偏低,当时探测能力仅至高轨 2.0×10^4 km^[10]。通过采用 885 nm 端面泵浦 Nd:YAG 的双通放大实现对激光器改进升级,获得功率 6 W 的 532 nm 皮秒激光,发散角 0.6 mrad,脉宽 30 ps,光束质量 $M^2=1.2$ 。

1 kHz 的皮秒激光器通过锁模获得皮秒脉冲种子,经再生放大获得千赫兹 1 064 nm 输出,输出功率约 1.9 W,脉宽 40 ps,光束质量 $M^2=1.1$,其激光光路结构如文献[13]所示,激光器由大恒新纪元科技股份有限公司提供。在此基础上,通过激光器内脉冲选择器调节可获得 10 kHz 的 1 064 nm 输出,输出功率约 4 W。采用 885 nm 泵浦能够提高泵浦的量子效率,降低 Nd:YAG 晶体内热量,便于更高功率下对 Nd:YAG 泵浦,增大 Nd:YAG 增益能量^[14]。设计 885 nm 端面泵浦 Nd:YAG 放大模块,如图 1 所示,885 nm 泵浦光镜透镜耦合注入 Nd:YAG 激光晶体中,M1 为凹面镜,M3、M4 为凸反面镜,实现对泵浦光透过 M4 注入 Nd:YAG 中的模式匹配,被 Nd:YAG 激光晶体吸收,同时未吸收的泵浦光,再次经凹反镜反射再次返回至 Nd:YAG 激光晶体吸收,提高 Nd:YAG 激光晶体对 885 nm 泵浦光的吸收率。10 kHz 的 4 W 激光经放大后功率至 10 W,单脉冲能量达 1 mJ,光斑大小为 1.5 mm,经过激光倍频晶体 LBO 倍频后,获得了 6 W 的 532 nm 输出,单脉冲能量 0.6 mJ,发散角 0.6 mrad,光束质量 $M^2=1.2$ 。

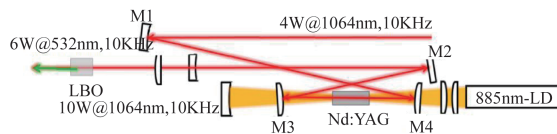


图1 885 nm 端面泵浦的 Nd:YAG 放大。

Fig. 1 Side-pump Nd:YAG crystal amplification by 885 nm.

激光晶体 Nd:YAG 中受 Nd^{3+} 上能级寿命带来高重复率脉冲输出能量抖动变化,易产生倍周期分叉现象^[15],影响有效激光输出功率应用。图 2(a)为周

期性高低脉冲 10 kHz 输出波形,相邻脉冲幅值不相等。实际 SLR 过程中,回波信号比较弱,能量低的脉冲将不易得到有效回波信号,特别是在远距离微弱信号中,以至于能量低的脉冲造成激光功率部分浪费。由 Nd^{3+} 上能级寿命受泵浦强度及温度(冷却水温)影响,同时再生放大的建立周期影响脉冲在 Nd^{3+} 上粒子数反转消耗,对泵浦增益电流、Nd:YAG 冷却水温及再生放大建立周期加以控制,可有效的抑制倍周期交叉现象,实现对 Nd:YAG 激光晶体在重复率 10 kHz 下输出脉冲等幅值输出,如图 2(b)所示,在对 Nd:YAG 的冷却水温及泵浦电流进行调节后,10 kHz 的输出波形幅值逐渐相等,从而脉冲之间能量相等。

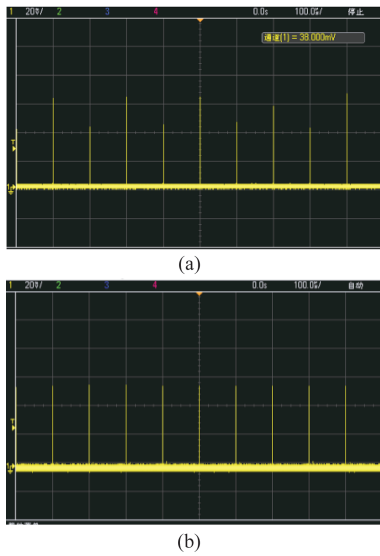


图 2 10 kHz 激光脉冲波形输出(时间 100 $\mu\text{s}/\text{div}$,幅值 20 mV/div) (a)幅值不均等的高低脉冲,(b)幅值均等的脉冲
Fig.2 10 kHz laser pulse waveform of laser pulse at pulse repeat frequency of 10 kHz (time 100 $\mu\text{s}/\text{div}$, amplitude 20 mV/div) (a) unequal amplitude pulse in high and low, (b) equal amplitude pulse

2 噪声测量分析

背景噪声强度直接影响激光测距过程中的虚警概率,降低激光回波探测成功率,甚至当背景噪声强度过大时,探测器来不及对激光回波信号响应。背景噪声包括所处环境的噪声以及探测器自身的暗噪声,实现背景噪声的测量能够更好地评估探测能力。目前单光子探测器(Single Photon Avalanche Diode, C-SPAD, Peltier cooled)背景噪声测量过程中,探测器工作在盖革(Geiger)模式,当探测到一个光子后,探测器即关门进入死区,后续光子

得不到响应,直至下一次 C-SPAD 再一次被触发,才能实现下一个光子的探测^[16]。其中本文的 C-SPAD 探测器由捷克技术大学 Ivan 教授研制提供,暗计数 100 kHz,靶面大小 100 μm ^[17]。在此,分别对重复率 1 kHz、2 kHz、4 kHz、5 kHz、6.25 kHz、10 kHz 进行噪声测量,其中 C-SPAD 前安装 0.15 nm 的窄带滤波片^[18],由距离门控信号进行触发,其测量结果如下图 3 所示。图 3 中, -109 m 处为距离门控信号触发 C-SPAD 的起点,即 C-SPAD 单光子探测器开始工作。随着测距重复率的增加,噪声强度逐渐增强,在更短的距离门内探测器进入死区,即 10 kHz 的噪声光子数在距离门 288 m 之前已经接收到光子,探测器基本进入死区,后续光子探测的很少,而在 1 kHz 时,噪声光子数少,探测器还未完全进入死区,后续距离门光子噪声仍可被探测到。

盖革(Geiger)模式单光探测器背景噪声测量中,时间靠前噪声影响到后面噪声光子响应探测成功率,为了更好表征噪声强度,采取距离门刚打开瞬间进行噪声光子探测数统计,即 C-SPAD 刚开始工作的一瞬间,如图 3 所取的 L ,其中距离门间距为 $L=0.64$ m,对应距离时间为 2.1 ns。C-SPAD 噪声数 N_s 为:

$$N_s = N_0 / (t_0 f) \quad (1)$$

其中, N_0 为在 C-SPAD 在运行工作时长 t_0 及距离门控 Δt 内所探测到背景噪声数, f 为距离门控触发探测器重复率。单位时间光子噪声数 N 为:

$$N = N_s / \Delta t \quad (2)$$

其中 Δt 为距离门控距离 L 对应的距离门控时间。各重复率下探测到的光子噪声数及对应各类型噪

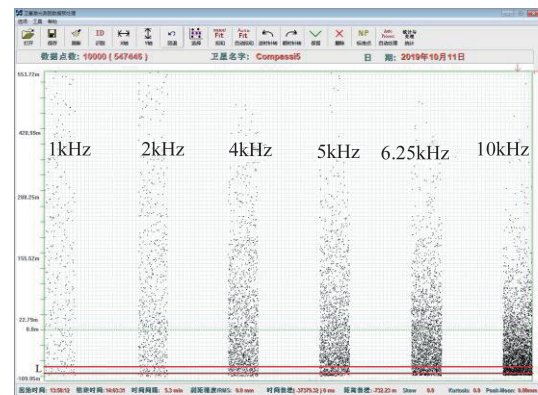


图 3 C-SPAD 单光子探测器重复率 1 kHz、2 kHz、4 kHz、5 kHz、6.25 kHz、10 kHz 的噪声测量

Fig. 3 Noise measurement for C-SPAD single photon detector under repetition rate of 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 5 kHz, 6.25 kHz, 10 kHz

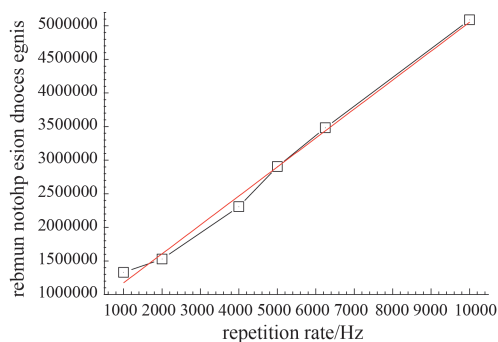


图4 各重复率下的单位时间内的噪声光子数

Fig. 4 Number of noise photons in single second at each repetition rate

声计算如表1所示。

表1中, 10 kHz 重复率下, C-SPAD 探测器在距离门控 0.64 m (2.1 ns) 及 15.7026 s 的时间内接收的噪声光子数为 1678 个, 对应单个脉冲噪声光子数为 0.0107 个, 由此单位时间噪声光子数为 5088633 个。因单位时间噪声光子数包括背景噪声与探测器自身的暗噪声, 其中背景噪声强度由 C-SPAD 探测器所处的环境决定, 与重复率无关, 为一定值, 探测器自身暗噪声与探测器自身有关, 也与探测器工作重复率紧密相连, 单位时间内噪声光子与重复率关系曲线如图4黑线所示。

图4中, 单位时间内噪声光子 N 与重复率 f 呈现线性关系, 通过线性拟合, 如图中红线所示, 其线性拟合函数为:

$$N = 743\,784.76 + 431.08f \quad (3)$$

式(3)中, 常数项 743 784.76 为背景光噪声, 与探测器工作重复率无关, 线性系数为暗噪声系数跟重复率 f 相关, 由此, 重复率越高, 暗噪声越大, 重复率 10 kHz 暗噪声数是 1 kHz 的 10 倍。根据拟合公式可进一步得出单光子探测器在重复率 f , 距离门控 Δt 内, 运行工作时长 t 下所探测到的背景噪声数 N_i 为:

$$N_i = N t f \Delta t \quad (3)$$

表1 各重复率下的噪声光子探测及计算

Table 1 Noise photon detection and calculation at each repetition rate

number	repetition rate/Hz	Detection time/s	Detection noise photon number	Single pulse noise photon number	single second noise photon number
1	1 000	16.492	46	0.002 8	1 328 205
2	2 000	18.836 6	121	0.003 2	1 529 444
3	4 000	18.618 8	361	0.004 8	2 308 215
4	5 000	16.063 4	490	0.006 1	2 905 155
5	6 250	13.109 6	599	0.007 3	3 481 273
6	10 000	15.702 6	1 678	0.010 7	5 088 633

即 $N_i = 743\,784.76 t f \Delta t + 431.08 f^2 t \Delta t$, 故重复率 f 增加后, 探测次数增加, 在距离门控时间长度不变的情况下, 由单光子探测器的暗噪声、噪声个数 N_i 随重复率增加是呈非线性增加趋势。

SLR 过程中通常采用单光子探测器 C-SPAD, 其光电转换产生的光电子数服从泊松分布, 即在平均光电子数为 N 情况下, 产生 m 个光电子概率 $P(m, N)$ 满足以下公式^[20]:

$$P(m, N) = \frac{N^m}{m!} e^{-N} \quad (4)$$

由此可以算出背景噪声产生一个以上光电子概率为:

$$P(0, N) = \sum_{m=1}^{\infty} p(m, N) = 1 - P(0, N) = 1 - e^{-N} \quad (5)$$

即激光测距过程中虚警概率与距离门控 Δt 、重复率 f 关系为:

$$P(0, N) = 1 - e^{-(743\,784.76 + 431.08f)\Delta t} \quad (6)$$

由上式可得, 为了降低虚警概率应尽量缩短距离门控。10 kHz 下距离门控 Δt 与虚警探测概率如下:

$$P(0, N) = 1 - e^{-5054\,584.76\Delta t} \quad (7)$$

距离门控 1~200 ns 时, 其关系曲线如图5所示。

由图5可得 800 ns 距离门控, 10 kHz 虚警探测概率已经超过了 90%。800 ns 对应 240 m 的距离, 与图3中噪声测量噪声点数集中在 -109~150 m, 距离门 259 m 时间 863.3 ns 基本一致。由此, 为了降低虚警概率, 需要控制距离门宽度, 其中距离门宽 200 ns (60 m) 时, 虚警探测概率已经达到 63.78%、136 ns (40.8 m) 门宽时达到了 50%。根据 C-SPAD 探测器特性, 为保持卫星观测数据的质量, 需将距离门宽设置 80 ns, 此时虚警探测概率 32.9%。SLR 雷达方程为^[20]:

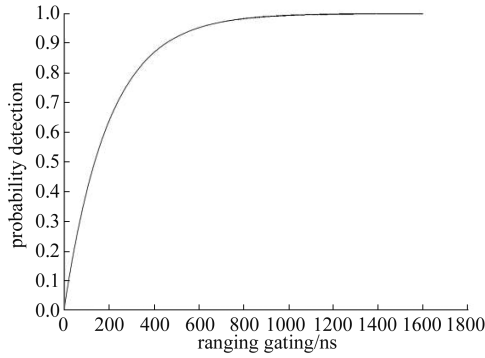


图5 10 kHz下的虚警概率随距离门控的关系

Fig. 5 The relationship between the false alarm probability and the distance gating at repetition rate of 10 kHz .

$$n_0 = N_0 \eta_q = \frac{16 \lambda \eta_q E_0 A_r A_s}{\pi^2 h c \theta'^2 \theta^2 R^4} T^2 K_t K_r \alpha, \quad (8)$$

其中 n_0 为系统接收的平均激光回波光电子数, λ 为激光波长, h 为普朗克常量, c 为光速, η_q 为探测器探测效率, E_0 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, θ' 为目标反射器发散角, θ 为激光束发散角, R 为目标卫星到测距站点的距离, α 为大气衰减因子。若距离门控 Δt 内探测器接收噪声, 激光回波将不会被探测器接收, 激光回波被探测器接收前提是探测器在距离门控 Δt 未接收到噪声, 故激光回波探测概率为:

$$P = (1 - P(0, N)) P_n, \quad (9)$$

其中 P_n 为不考虑噪声单光子探测器对激光回波数 n 探测概率。即:

$$P_n = 1 - e^{-n} = (1 - e^{-\frac{16 \lambda \eta_q E_0 A_r A_s}{\pi^2 h c \theta'^2 \theta^2 R^4} T^2 K_t K_r \alpha}). \quad (10)$$

故距离门控 Δt 考虑噪声影响的 10 kHz 重复率的激光回波探测概率为:

$$P = e^{-(743784.76 + 431.08f)\Delta t} (1 - e^{-\frac{16 \lambda \eta_q E_0 A_r A_s}{\pi^2 h c \theta'^2 \theta^2 R^4} T^2 K_t K_r \alpha}), \quad (11)$$

即相对重复率 f , 单脉冲能量 E_0 的激光发射, 单位时间内回波平均点数为:

$$D = fP = fe^{-(743784.76 + 431.08f)\Delta t} (1 - e^{-\frac{16 \lambda \eta_q E_0 A_r A_s}{\pi^2 h c \theta'^2 \theta^2 R^4} T^2 K_t K_r \alpha}). \quad (12)$$

由此设:

$$A = \frac{16 \lambda \eta_q A_r A_s}{\pi^2 h c \theta'^2 \theta^2} T^2 K_t K_r \alpha, \quad (13)$$

以上激光发散角、望远镜口径固定下各参数已知, 故 A 为常数, 即:

$$D = fP = fe^{-(743784.76 + 431.08f)\Delta t} - fe^{-(743784.76 + 431.08f)\Delta t - A \frac{E_0}{R^4}}. \quad (14)$$

式(14)体现了测距过程中单位时间内的回波平均点数 D 与噪声虚警率、测量轨道距离 R 、重复率 f 、脉冲能量 E_0 的表达式, 对系统设计有重要指导作用。由此无论重复率及噪声强度为多少, 增大脉冲能量 E_0 均能提高激光回波平均点数。

3 10 kHz 重复率 SLR 结果与分析

激光测距技术单色性好, 可在白天进行测量, 可有效增加观测数据及观测弧长, 有助于空间目标定轨精度提升。相比夜间测距, 白天测距面临巨大的背景噪声、目标不可见及光束指向监视困难等因素, 因此白天测距技术难度比夜间测距要高很多^[18,21]。噪声水平与接收视场的平方成正比, 因此在接收光学系统中利用视场光阑来进行空间滤波是广泛采用的方法, 在望远镜焦平面上放置可变光阑, 调整光子接收视场, 实现白天背景噪声抑制; 利用激光极好的单色性以及背景噪声全光谱性, 采用超窄带滤光片实现背景噪声的抑制; 距离门控技术是 SLR 中广泛采用背景噪声抑制方法, 根据卫星距离预报精确控制光子探测器开启时间, 有效降低了背景噪声的干扰^[18]。

根据前面分析, 应尽量压低距离门控, 将改造升级后重复率 10 kHz 的 532 nm 皮秒激光由发射望远镜系统发射输出, 在接收望远镜及 10 kHz 的激光发射、接收与数据处理系统相互配合^[10], 系统参数如表 2 所示, 实现了从低轨道到同步轨道的卫星测距, 测量数据如表 3 所示。采用小孔光阑空间滤波、

表2 10kHz卫星激光测距系统参数

Table 2 Parameters of satellite laser ranging system at 10 kHz

Type	Optical system	Mounted type	Receiving , tele-scope	Receiving Optical efficiency	Narrow filter	C-SPAD Detector efficiency
parameters	R-C	AZ-EL	60 cm	-60%	0.15 nm	20%
Type	Tracking RMS	Event Timer(A033)	Transmitting Optical efficiency	Transmitting telescope	Laser divergence	Pointing accuracy
parameters	-1"	~5 ps	-70%	21 cm	7"~10"	1"

0.15 nm 滤波器进行光谱滤波、距离门控时间滤波,实现了重复率10 kHz白天SLR。

从表3中可以看出,10 kHz的SLR结果中,无论是白天还是晚上,均涵盖了从低轨(LEO)、高轨(HEO)、同步轨道(GEO)的卫星测距。其中白天同步轨道卫星北斗 Compassi6b 测量结果如下图6所示,图6(a)为实时测距过程,距离门控控制在190 ns,信号回波约在140 ns。实时测距过程中10 kHz测量数据量大,特别是在白天测量过程中,噪声多,实时测量中回波信号数据不易直接从大量噪声中甄别,通过对背景噪声剔除,如图6(b)所示,获得Compassi6b卫星回波数据明显。

高重复率10 kHz测距过程中,后向散射出现频率高,规避难度大,特别是在近地星测量过程中比较明显。在对近地星 Ajisai 测量过程中,获得有效回波点如图7所示,Ajisai回波有明显断续,虽然 Ajisai 卫星具有自转特性^[13],但其自转周期并没有像图7的断续周期那么长,其激光回波与噪声数具有等同周期性,由此根据C-SPAD特性:前面光子探测后,C-SPAD即关门,后续的光子将无法探测。因而图7中,激光回波信号弱的时刻为后向散射强的时刻,此时单光子探测器只探测后向散射激光,随即单光子探测器关门,后续的激光回波信号无法探测到。对于后向散射规避方法,1~2 kHz重复率采用

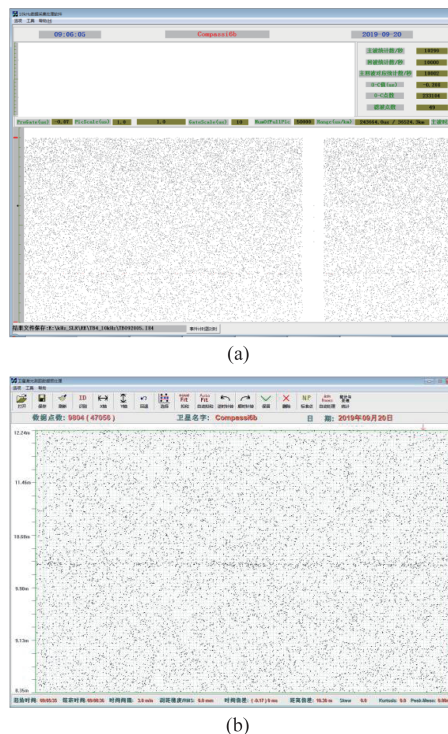


图6 10 kHz的白天同步轨道北斗 Compassi6b的测量(a)数据实时测量,(b)数据测量后处理

Fig. 6 Beidou Compassi6b satellite measurement with 10 kHz laser ranging in daytime (a) data real-time measurement, (b) data processing after measurement.

了激光点火信号移动的方式^[21],但对于更高重复率

表3 10 kHz重复率卫星激光测量数据

Table 3 Result of 10 kHz satellite laser ranging measurement

number	date	satellite name	ranging precision		Time	Orbit
			RMS/mm			
1	2019/7/15	glonass127	22.6		nighttime	HEO
2	2019/8/13	glonass122	11.5		nighttime	HEO
3	2019/8/13	starlette	9.3		nighttime	LEO
4	2019/8/13	Ajisai	17.1		nighttime	LEO
5	2019/8/24	glonass136	21		nighttime	HEO
6	2019/8/24	glonass116	23.9		nighttime	HEO
7	2019/8/24	Beaconc	14.4		nighttime	LEO
8	2019/9/10	starlette	8.5		nighttime	LEO
9	2019/9/10	Qzs2	14.1		nighttime	GEO
10	2019/9/10	Galileo212	12.5		nighttime	HEO
11	2019/9/13	Hyb	6.9		daytime	LEO
12	2019/9/13	Ajisai	23.8		daytime	LEO
13	2019/9/13	Beaconc	22.8		daytime	LEO
14	2019/9/19	compassi5	19.8		nighttime	GEO
15	2019/9/20	compassi6b	15.9		daytime	GEO
16	2019/9/20	Glonass128	25.6		daytime	HEO
17	2019/9/20	Lageos1	12.1		daytime	LEO

10 kHz 测量,此方法效果变差,文献[14]提出了采用脉冲调频 burst 技术用来实现高重复率 100 kHz 的 SLR 后向散射激光规避。

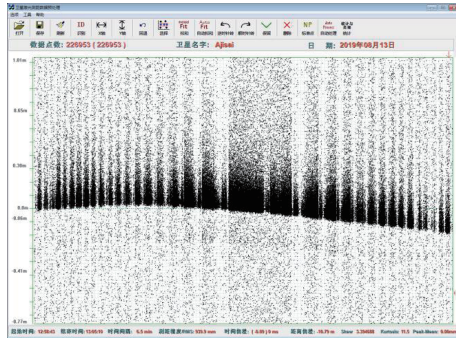


图7 10 kHz 的 Ajsai 卫星后向散射的现象

Fig. 7 Backscatter at 10 kHz laser ranging for Ajsai satellite

4 结论

皮秒激光峰值功率高,不易获得大能量高功率的激光输出,限制了激光测距能力进一步提升。本文采用 885 nm 端面泵浦 Nd:YAG 双通放大增大激光输出能量,在 10 kHz 下获得输出 6 W 的 532 nm 皮秒激光,发散角 0.6 mrad,脉宽 30 ps,光束质量 $M^2=1.2$,并对 Nd:YAG 冷却水温、泵浦电流、再生放大建立周期进行控制匹配,使得 10 kHz 输出的各脉冲能量一致,避免了高低强度脉冲出现,相比文献[9]提高了输出功率。测量分析了各重复率下的噪声光子,虚警概率以及与距离门控的关系,获得噪声光子数 N 与重复率 f 的关系为 $N = 743784.76 + 431.08f$,以及 10 kHz 重复率下的虚警探测概率 P 与距离门控 Δt 的关系为 $P(\Delta t) = 1 - e^{-5054584.76 \times \Delta t}$,应用在 SLR 中,实现了 LEO、HEO、GEO 各轨道卫星的测量,高重复率的 SLR 后向散射比明显,特别是近地轨道卫星测量过程中,由此对于常规的 1~2 kHz 重复率激光测距的激光点火信号移动对后向散射规避方式不再满足 10 kHz,后续我们将进行新的规避方法研究。综上,本文在国内外首次实现白天与夜晚 10 kHz 的 SLR,最远距离达到同步轨道 3.6×10^4 km 距离北斗卫星 compassi6b 白天测量,高重复率 10 kHz 的 SLR 结果表明其满足 LEO、HEO、GEO 所有轨道卫星白天与晚上测距,推动了高重复率激光测距常规化发展,更好满足未来庞大卫星轨道数目测距与预报需求。

致谢:本文得到大恒新纪元科技股份公司在皮秒激光器系统及技术指导的大力支持,在此表示

感谢。

References

- [1] Lucchesi D M, Anselmo L, Bassan M, *et al.* Testing the gravitational interaction in the field of the Earth via satellite laser ranging and the Laser Ranged Satellites Experiment (LARASE) [J]. *Classical and Quantum Gravity*. 2015, **32** (15):155012.
- [2] ZHANG Zhong-Ping, CHENG Zhi-En, ZHANG Hai-Feng, *et al.* Global laser Ranging observation of Beidou satellites and data application [J]. *Chinese journal of lasers* (张忠萍,程志恩,张海峰,等.北斗卫星全球激光测距观测及数据应用.中国激光), 2017, **44**(4):040400.
- [3] Ulrich Schreiber K, Kodet J. The application of coherent local time for optical time transfer and the quantification of systematic errors in satellite laser ranging [J]. *Space Sci Rev*, 2018, **214**(1):22.
- [4] Bonin J A, Chambers D P, Cheng M K. Using satellite laser ranging to measure ice mass change in Greenland and Antarctica [J]. *The Cryosphere*, 2018, **12**:71-79.
- [5] ZHOU Bing, LIU Hong-Jun. Development review of foreign emerging commercial LEO satellite communication (SATCOM) constellations [J]. *Telecommunication Engineering* (周兵,刘红军,国外新兴商业低轨卫星通信星座发展述评.电讯技术), 2018, **58**(9):1108-4111.
- [6] Kirchner G, Hausleitner W, Cristea E. Ajsai spin parameter determination using Graz Kiloherz satellite laser ranging data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2007, **45** (1):201-205.
- [7] Wilkinson M, Schreiber U, Procházka I, *et al.* The next generation of satellite laser ranging systems [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, **93**(11):2227-2247.
- [8] WU Zhi-Bo, DENG Hua-Rong, ZHANG Hai-Feng, *et al.* Analysis and improvement on stability of satellite laser ranging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴志波,邓华荣,张海峰,等.卫星激光测距系统稳定性分析及提高.红外与毫米波学报), 2019, **38**(4):479-484.
- [9] ZHENG Xiang-Ming, LI Zhu-Lian, FU Hong-Lin, *et al.* 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system [J]. *Acta optica sinica* (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.光学学报), 2011, **31**(5):0512002.
- [10] Wu Z B, Zhang Z P, Zhang H F, *et al.* The preliminary results of SLR with 10 kHz laser system at Shanghai Station [C]. <https://cdiss.nasa.gov/lw18/docs/papers/Posters/13-Po52-WuZhibo.pdf>
- [11] Sung K P, Choi E J, Lim H C, *et al.* Development of operation software for high repetition rate satellite laser ranging [J]. *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2016, **44**(12):1103-1111
- [12] Choi E J, Bang S C, Sung K P, *et al.* Design and development of high-repetition-rate satellite laser ranging system [J]. *Journal of Astronomy and Space science*, 2015, **32** (3):209-219.
- [13] DENG Hua-Rong, ZHANG Hai-Feng, LONG Ming-Liang, *et al.* Research on 4 kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application [J]. *Acta Optica Sinica* (邓华荣,张海峰,龙明亮,等.4 kHz 重复率卫星激光测

- 距试验及应用研究. *光学学报*), 2019, **39**(03):0314002.
- [14] 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.
- [15] ZHAO Peng, CHEN Meng, YU Ling-Jie. et al. Output characteristics of few hundreds kHz picosecond regenerative amplifiers [J]. *Laser&optoelectronics progress* (赵鹏, 陈檬, 禹伶俐, 等. 百千赫兹皮秒再生放大器的输出特性. *激光与光电子学进展*), 2017, **54**(6):061403.
- [16] ZHANG Xiao-Ying, JIA Lei, ZHU Jiang, et al. Comparison of laser ranging system based on SNSPD and SPAD detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张晓英, 贾磊, 朱江, 等. 基于 SNSPD 与 SPAD 探测器的激光测距系统的比较研究. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(3):378-384.
- [17] Prochazka I, Hamal K. Millimeter precision laser ranging using solid state photon counting [J]. *Advanced Photon Counting Techniques, Proc. of SPIE*, 2006, **6372**:6372M-1-10.
- [18] Long M L, Zhang Z P, Chen Z E, et al, A picosecond laser at 1 kHz with dual-length of regenerative amplifier for the SLR in the daytime [J]. *Optik*, **2018**, 171:833-838.
- [19] ZHAI Shu Ran, ZHANG Zhong-Ping, ZHANG Hai-Feng, et al. Research on telescope pointing error correction of SLR in the daytime [J]. *Laser & Infrared* (翟术然, 张忠萍, 张海峰, 等. 白天卫星激光测距望远镜指向误差修正方法研究. *激光与红外*), 2016, **46**(7):781-785.
- [20] Degnan J J. Satellite laser ranging: Current status and future prospects [J]. *Geoence & Remote Sensing IEEE Transactions on*, 1985, **GE-23**(4):398-413.
- [21] WU Zhi-Bo, DENG Hua-Rong, ZHANG Hai-Feng, et al, Interference and avoidance of atmospheric backscattering on satellite laser ranging with high repetition rate [J]. *Infrared and Laser Engineering* (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. *红外与激光工程*), 2017, **46**(2), 0206002.