

基于近红外小功率卫星激光测距研究

高添泉, 吴先霖, 张才士, 周立祥, 赵宏超, 韩西达, 刘胜前, 李明*

(中山大学(珠海校区)国家航天局引力波研究中心 天琴前沿科学中心 天琴中心&物理与天文学院“天琴计划”教育部重点实验室, 广东 珠海 519082)

摘要:为分析天琴计划激光测距台站卫星激光测距探测能力,设置单脉冲能量(平均功率)分别为 0.15 mJ(0.015 W), 0.4 mJ(0.04 W)和 4 mJ(0.4 W)对同步轨道卫星 qzs2、compass i3 和 compass i5 分别于夜晚和白天进行激光测距实验。理论方面,分析了白天天光背景噪声强度,并结合雷达方程计算了不同平均功率条件下卫星激光测距的有效回波率,重点分析了平均功率对卫星激光测距探测能力的影响。实验方面,固定望远镜俯仰角($E=50^\circ$),旋转望远镜测量不同指向时的天光背景噪声强度。采用探测效率为 60%(@1064 nm)的超导探测器阵列,并结合空间滤波、时间滤波和光谱滤波的方法抑制背景噪声,开展了小功率白天卫星激光测距。分析得到,白天对同步卫星激光测距的最小功率为 0.04 W,夜晚对同步卫星激光测距的最小功率为 0.015 W。天琴计划激光测距台站已具备白天和夜晚全时段常规卫星激光测距能力,将为今后天琴计划引力波探测卫星全时段激光测距奠定基础。

关键词:卫星激光测距;平均功率;探测能力;天光背景噪声

中图分类号:P113 文献标识码:A

Satellite laser ranging research based on near-infrared low-power laser

GAO Tian-Quan, WU Xian-Lin, ZHANG Cai-Shi, ZHOU Li-Xiang, ZHAO Hong-Chao, HAN Xi-Da, LIU Sheng-Qian, LI Ming*

(MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Frontiers Science Center for TianQin, Gravitational Wave Research Center of CNSA, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China)

Abstract: In order to analyze the satellite laser ranging (SLR) detection capability of the TianQin Laser Ranging Station, the laser energy (average power) is set as 0.15 mJ (0.015 W), 0.4 mJ (0.04 W) and 4 mJ (0.4 W), respectively, to conduct laser ranging experiments on synchronous orbit satellites qzs2, compass i3 and compass i5 at night and daytime. Theoretically, the background noise of daytime skylight is analyzed, the effective echo rate of SLR under different average power conditions is calculated. Finally the impact of average power on SLR detection capability is particularly analyzed. In the experiment, the pitch angle of the telescope is fixed ($E=50^\circ$), and the skylight background noise intensity is measured by rotating the telescope at different points. A superconducting nanowire single photon detector (SNSPD) with a detection efficiency of 60% (@1064 nm) is used, and background noise is suppressed by spatial filtering, temporal filtering and spectral filtering. Using 0.4 mJ (0.04 W) energy to perform laser ranging on the synchronous satellite in the daytime. Using 0.15 mJ (0.015 W) energy to perform laser ranging on the synchronous satellite at night. The Tianqin Laser Ranging Station has the capability of conventional SLR throughout the day and night, which will lay the foundation for the full-time laser ranging of the Tianqin plan gravitational wave detection satellite in the future.

Key words: satellite laser ranging, average power, detection capability, skylight background noise

引言

激光发射重复频率和单脉冲能量是卫星激光

测距的重要指标,将直接决定激光器的平均功率。最早的卫星激光测距系统采用 10~20 Hz,单脉冲能

收稿日期:2021-08-29,修回日期:2022-03-07

基金项目:国家自然科学基金(12033009)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (12033009)

作者简介(Biography):高添泉(1990—),男(汉),青海西宁人,博士研究生,月球/卫星激光测距,E-mail:gaotq@mail2.sysu.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail:liming73@mail.sysu.edu.cn

Received date:2021-08-29, revised date:2022-03-07

量30~150 mJ,即平均功率0.3 W的激光器进行卫星激光测距,其缺点是有效回波光子数少。近二十年来为提高激光测距回波率,国内外激光测距台站发展了高重复频率激光测距技术。白天激光测距方面,云南天文台的李祝莲等人^[1]使用超导探测器对白天卫星激光测距开展了实验与研究,并在日落时段成功测量了轨道高度约20 000 km的导航卫星glonass134,其使用激光器单脉冲能量为400 mJ,波长为1 064 nm,重复频率为100 Hz,激光平均功率40 W;北京跟踪与通信技术研究所的薛莉等人^[2]分析研究了云南天文台kHz激光测距系统具备探测830 km处米级大小空间碎片的能力;上海天文台的邓华荣等人^[3]使用重复频率为1 kHz,平均功率为5 W,波长为1 064 nm的激光器进行白天卫星激光测距;龙明亮等人^[4]采用重复频率10 kHz,平均功率为6 W,波长为532 nm的激光器进行了全天时间段卫星激光测距实验。夜晚激光测距方面,武汉观测站^[5]采用重复频率为1 kHz,单脉冲能量为3 mJ,平均功率3 W,波长为532 nm的激光器进行卫星激光测距,成功得到Ajisai反射的有效回波信号;奥地利的Graz激光测距观测站^[6-8]采用重复频率2 kHz,单脉冲能量为0.4 mJ,平均功率0.8 W,激光脉冲宽度为10~20 ps成功实现了轨道高度40 000 km卫星激光测距;上海天文台^[9]皮秒激光器系统实现了重复频率为4 kHz,功率为3 W,波长为532 nm的激光稳定输出;德国的Uhlandshohe观测站使用激光重复频率100 kHz,单脉冲能量50 uJ,平均功率5 W成功得到了轨道高度为20 000 km卫星的有效回波信号;美国的新一代卫星激光测距系统SLR2000^[10-12]激光器发射激光重复频率达到2 kHz,单脉冲能量达到235 uJ,平均功率0.47 W;Geochang观测站^[13]使用重复频率为60 Hz,单脉冲能量为15 mJ,平均功率0.9 W进行卫星激光测距;Sejong观测站^[14-15]使用重复频率为5 kHz,单脉冲能量为7.5 mJ,平均功率37.5 W进行卫星激光测距;韩国的10 kHz卫星激光测距系统^[16]采用0.5 W激光器进行卫星激光测距。

卫星激光测距正向着高重复、低能量方向发展。本文以天琴计划激光测距台站^[17]系统为平台,以降低激光发射平均功率的方法分析系统的极限探测能力。激光器发射重复频率维持在100 Hz,单脉冲能量分别调节到0.15 mJ和4 mJ,即平均功率达到0.015 W和0.4 W,分别在夜晚和白天对地球同步轨道卫星进行激光测距实验。在目前对国内

外文献和报道调研的基础上,该功率是对同步轨道卫星进行激光测距的最小功率。

1 卫星激光测距原理

1.1 理论可接收有效回波光子与平均功率关系

卫星激光测距指对装有激光角反射器的卫星进行测量。其有效回波光子数可以由式(1)表示^[18]:

$$n = \eta_q \left(E_r \frac{\lambda}{hc} \right) \eta_i G_i \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 A_r \eta_r T_a^2, \quad (1)$$

式中, λ 为发射激光的波长, h 和 c 分别为普朗克常数和光在真空中传播的速度, E_r 为发射激光单脉冲能量, η_q 为探测器探测效率, η_i 为发射系统效率, η_r 为接收系统效率, T_a 为大气透过率, G_i 为光束增益, σ 为目标散射截面, R 为目标与测站的距离, A_r 为望远镜有效接收面积。

将由能量表述的激光雷达方程转换为平均功率形式:

$$n = \eta_q \left(P_r \frac{\lambda^2}{hc^2} \right), \quad (2)$$

$$P_r = \eta_r P_i G_i \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 A_r \eta_r T_a^2, \quad (3)$$

式中, P_r 为系统接收功率, P_i 为系统发射功率。

本文以天琴台站激光测距系统为例,其系统指标参数如表1所示。以同步轨道卫星作为测量目标,调整激光发射平均功率,可接收的有效回波光子数如图1所示。图中横坐标表示目标与测站的距离,纵坐标表示回波光子数的对数。

激光雷达方程计算结果如图1所示。图中可以分析得到有效回波光子数随平均功率的下降而减少,当激光发射功率为0.015 W时(紫色),计算来自同步轨道卫星的有效回波率为10.91 photons/s,当激光发射功率为0.4 W时(红色),计算来自同步轨道卫星的有效回波率为291.06 photons/s,二者相差约26倍。

通常认为卫星激光测距有效回波光子数与激光单脉冲能量之间具有正相关性,当单脉冲能量越大时有效回波光子数越多。然而,有效回波光子数本质上是由系统接收的平均功率所决定的,即系统接收到的平均功率越大,有效回波光子数也就越多。比较国内外高重复频率激光测距技术,提高重复频率的同时,发射激光单脉冲能量减小,但依旧保持较高的平均功率。因此,影响激光测距探测能力的是平均功率,而不仅仅是激光器单脉冲能量。

表 1 天琴台站激光测距系统参数

Table 1 System parameters	
接收望远镜口径	1.2 m
发射系统光学效率	0.64
遮拦比	0.25
探测器探测效率	60% @ 1 064 nm
接收系统光学效率	0.28
激光中心波长	1 064 nm
激光发散角(全角)	2"
大气透过率	0.5

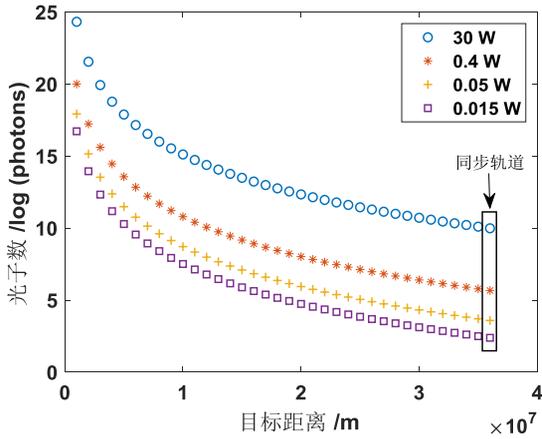


图 1 卫星激光测距有效回波光子数(激光重复频率 100 Hz)
Fig. 1 The number of effective echo photons from satellite laser ranging (100 Hz)

1.2 白天天光背景噪声理论估计

白天对激光测距有效回波率最大的影响因素之一就是背景噪声。因此,仿真分析背景噪声量级至关重要。望远镜可以接收的天光背景强度主要受到系统接收视场、天顶角与太阳夹角影响。天光背景辐射主要是由于太阳光线照射在大气分子、气溶胶分子及其他微粒上发生散射和吸收作用产生。当光束传输途径中的微粒半径大小小于太阳的辐射波长时,这种情况下的散射强度服从瑞利散射,如图 2 所示。其可以由式(4)表示:

$$f_r(\rho) = 10^{5.36} \cdot [1.06 + \cos^2(\rho)] \quad (4)$$

式中, ρ 表示观测方向与太阳光线入射方向的夹角。瑞利散射强度随观测方向与太阳夹角的增大而减小。

当光束传输途径中的微粒半径大小大于太阳的辐射波长时,这种情况下的散射强度服从 Mie 散射,如图 3 所示。其可以由式(5)表示:

$$f_M(\rho) = 10^{6.15 - \rho/40} \quad (5)$$

在大气粒子散射的基础上再考虑传输空间中粒子的吸收作用, Mie 散射强度随观测方向与太阳的夹角增大而减小。

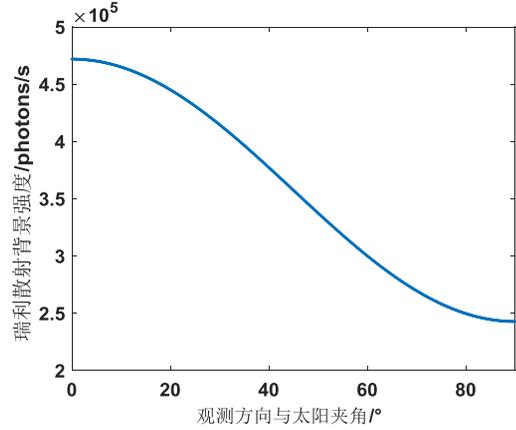


图 2 太阳 Rayleigh 散射强度
Fig. 2 Sun Rayleigh scattering intensity

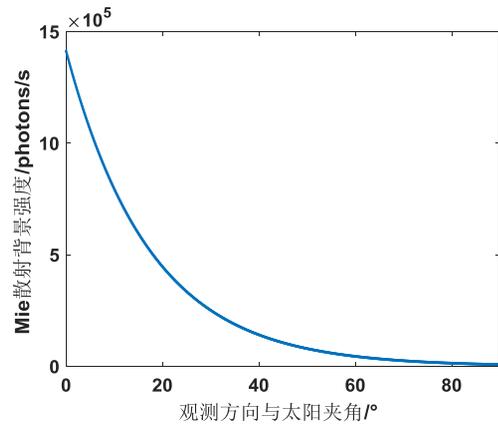


图 3 太阳 Mie 散射强度
Fig. 3 Sun Mie scattering intensity

白天激光测距情况下,背景噪声的估计对于卫星激光测距系统回波率分析具有重要意义。以光子数描述天光背景噪声,采用激光雷达方程计算背景噪声,如式(6)所示^[19]:

$$N_B = \frac{\pi}{4} N_\lambda \cdot \theta_r^2 \cdot A_r \cdot \Delta\lambda \cdot K_r \cdot \eta \quad (6)$$

式中, N_B 表示探测器接收到的背景噪声光子数, N_λ 表示背景亮度, A_r 表示望远镜有效接收面积, θ_r 表示接收视场角, $\Delta\lambda$ 表示窄带滤光片带宽, K_r 表示测距系统光学效率, η 表示探测器量子效率。在晴朗的白天时,式中 $N_\lambda \approx 3.4 \times 10^{19} \text{ photons}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 采用窄带滤光片,其带宽 $\Delta\lambda = 0.15 \text{ nm}$, 天琴台站使用的激光测距望远镜有效接收面积 $A_r = 1.06 \text{ m}^2$, 接收视场 $\theta_r = 8''$, 测距系统光学效率 $K_r = 0.2$, 超导探测

器的量子效率 $\eta = 0.6$ 。故在晴朗白天条件下,激光测距系统接收到的背景噪声光子数 $N_B = 3.24 \times 10^5 \text{ photons/s}$ 。

2 卫星激光测距实验

2.1 小功率夜晚同步轨道卫星激光测距

天琴激光测距台站已经具备常规的卫星激光测距能力,使用小功率进行卫星激光测距主要目的在于分析激光测距系统的极限探测能力。本节采用 4 mJ(0.4 W)、0.4 mJ(0.04 W)和 0.15 mJ(0.015 W)的单脉冲能量(平均功率)对地球同步轨道卫星 compass i3 进行夜晚激光测距实验。实验时探测器工作温度 2.30 K,4 像元单光子探测器的偏置电流分别为 $12.0 \mu\text{A}$ 、 $12.5 \mu\text{A}$ 、 $12.5 \mu\text{A}$ 和 $12.5 \mu\text{A}$,各个像元的暗计数分别为 138 cps、102 cps、147 cps 和 132 cps。

图 4、图 5、图 6 分别为采用 0.15 mJ(0.015 W)、0.4 mJ(0.04 W)和 4 mJ(0.4 W)单脉冲能量(平均功率)进行卫星激光测距的残差散点图。图中,横坐标表示测量时间,纵坐标表示测量残差(观测值-预报值)。红色箭头标识的点表示有效回波信号,蓝色箭头标识的点表示噪声。采用三种不同的平均功率,有效回波率分别达到 4.6 photons/s (0.4 W), 2.7 photons/s (0.04 W)和 0.4 photons/s (0.015 W)。测距结果统计于表 2 中。

2.2 小功率白天同步轨道卫星激光测距

白天卫星激光测距的难点主要在于强天光背景噪声和望远镜的指向精度问题。针对强天光背景噪声,本文采取了空间滤波(小孔光阑)、时间滤波(距离门宽度为 $20 \mu\text{s}$)和光谱滤波(带宽为 0.15 nm 的窄带滤光片)作为噪声抑制手段;针对望远镜白天的指向误差问题,本文采取“边探测边调整”的策略,即由大逐步减小平均功率,并调整望远镜指向,使得接收有效回波率最高,最终确定指向。对

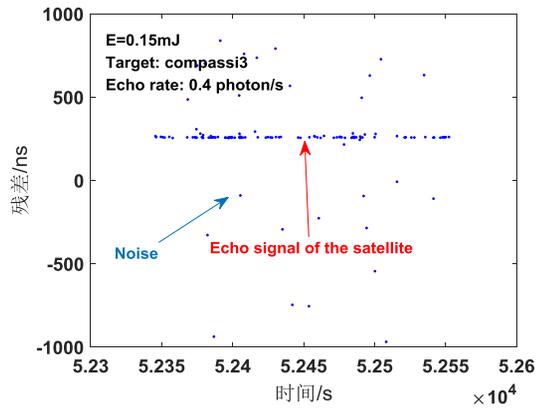


图 4 0.15 mJ(0.015 W)单脉冲能量同步卫星激光测距
Fig. 4 0.15 mJ(0.015 W) monopulse energy synchronous satellite laser ranging

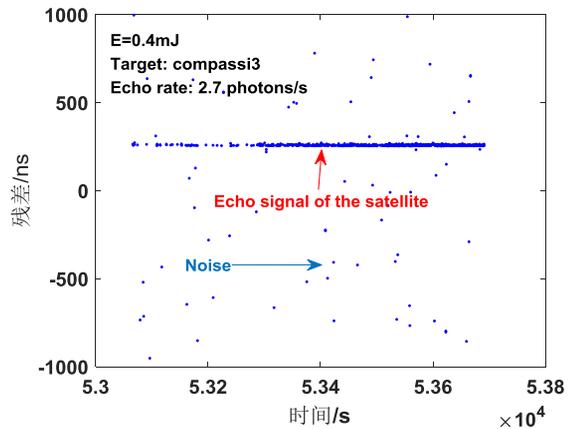


图 5 0.4 mJ(0.04 W)单脉冲能量同步卫星激光测距
Fig. 5 0.4 mJ(0.04 W) monopulse energy synchronous satellite laser ranging

同步轨道卫星 qzs2 和 compassi5 进行白天激光测距实验,实验结果如表 3 所示。实验中,由于目标卫星与太阳的相对位置不同,故望远镜在指向不同天区时系统探测的背景噪声强度存在差异。故首先对不同天区背景光噪声进行测量。图 7(a)为在当日

表 2 夜晚小功率同步卫星激光测距结果统计

Table 2 Statistics of low power synchronous satellite laser ranging results at night

目标卫星	测距时长(s)	目标仰角(°)	激光单脉冲能量(mJ)	重复频率(Hz)	功率(W)	回波率(photons/s)	滤光片带宽(nm)
Compassi3	667	55	4	100	0.4	4.2	/
Compassi3	437	55	4	100	0.4	4.6	/
Compassi3	122	55	0.4	100	0.04	2.1	/
Compassi3	177	55	0.4	100	0.04	2.7	/
Compassi3	209	55	0.15	100	0.015	0.4	/
Compassi3	400	55	0.15	100	0.015	0.3	/

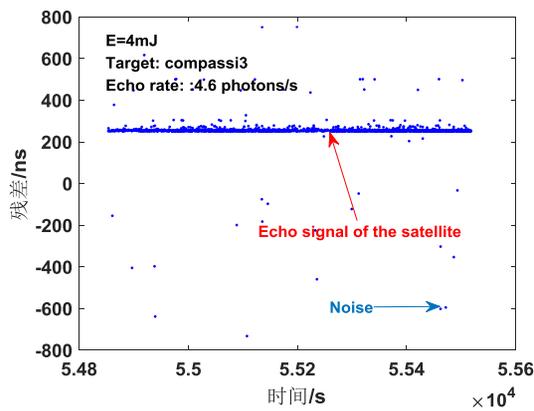


图6 4 mJ(0.4 W)单脉冲能量同步卫星激光测距

Fig. 6 4 mJ(0.4 W) monopulse energy synchronous satellite laser ranging

测距实验前固定望远镜俯仰角($E=50^\circ$),望远镜方位轴旋转 180° ,系统接收的背景噪声分布情况。当该夹角为 0° 时,望远镜指向太阳,当该夹角为 180° 时,望远镜背向太阳。图7(b)为对白天天光背景亮度多次实验结果。图中共统计3次天光背景强度实验结果,分别由红色方形(第一次实验),黑色圆形(第二次实验)和绿色圆形(第三次实验)表示,其中褐色点表示对3次数据取平均后的结果。图中,横坐标表示望远镜指向与太阳位置的夹角,纵坐标表示背景光子数。随着望远镜指向与太阳夹角的增大,系统接收的噪声光子数呈现指数递减规律,这与理论计算相符合。为考虑天光背景噪声对有效回波率的影响,需要对探测概率进行分析,其可以说明背景噪声对探测能力的影响。探测概率可以表达为:

$$P_D = e^{-W} * (1 - e^{-s-n}), \quad (7)$$

其中,回波光子数为 s ,噪声速率为 v_{noi} , $W = v_{noi} \cdot (t_{gate} - t_{echo}) \cdot \gamma$ 为回波分布范围之前的噪声光子数, t_{gate} 为门

控时长, t_{echo} 为回波展宽时长, γ 为回波在门控中的位置,取值为 $0 \sim 1$ 。 $n = v_{noi} \cdot t_{echo}$ 为回波分布范围内的噪声光子数。不同背景噪声强度对探测概率的影响如图8所示。图中,横坐标表示有效回波率大小,纵坐标表示探测概率,不同颜色曲线表示不同的噪声强度。结果表明,相同噪声强度下,探测概率随回波率的升高而增大;相同回波率条件下,探测概率随噪声强度的增强而下降。

卫星激光测距实验中选择qzs2和compassi5卫星做为激光测距实验目标。相对于测站,qzs2和太阳位置如图9(a)所示,compassi5和太阳位置如图9(b)所示。图中,外圈表示方位方向,单位为 $^\circ$,同心圆表示俯仰方向,单位为 $^\circ$,蓝色表示卫星位置,红色表示太阳位置。图10(a)为观测到qzs2后(北京时间:14:00)用相机拍摄的天空背景图,图10(b)为观测到compassi5后(北京时间:15:00)用相机拍摄的天空背景图。

实验中激光器发射能量衰减为 0.4 mJ (0.04 W),其能量测量和激光测距回波残差散点图如图11所示。通过对匹配后的数据进行泊松滤波和多项式拟合,有效回波率达到 0.02 photons/s 。激光器发射能量衰减为 4 mJ (0.4 W),其能量测量和激光测距回波残差散点图如图12所示,有效回波率达到 0.2 photons/s 。

3 实验分析

上文分别在不同功率条件下对同步轨道卫星于白天和夜晚进行了激光测距实验。通过降低系统发射平均功率的方法,分析天琴激光测距台站卫星激光测距探测能力极限。白天以同步轨道卫星为测距目标,成功实现测距的最小平均功率为 0.04 W ,夜晚以同步轨道卫星为测距目标,成功实现测距

表3 白天小功率同步卫星激光测距结果统计

Table 3 Statistics of laser ranging results from low power synchronous satellite at daytime

目标卫星	测距时长(s)	目标仰角($^\circ$)	单脉冲能量(mJ)	重复频率(Hz)	功率(W)	回波率(photons/s)	滤光片带宽(nm)
Qz2	81	63	300	100	30	8.3	0.15
Qz2	55	63	300	100	30	7.2	0.15
Qz2	107	63	4	100	0.4	0.5	0.15
Qz2	134	63	4	100	0.4	0.4	0.15
Compassi5	123	58	300	100	30	7.8	0.15
Compassi5	713	58	4	100	0.4	0.2	0.15
Compassi5	675	58	0.4	100	0.04	0.02	0.15
Compassi5	438	58	0.4	100	0.04	0.01	0.15

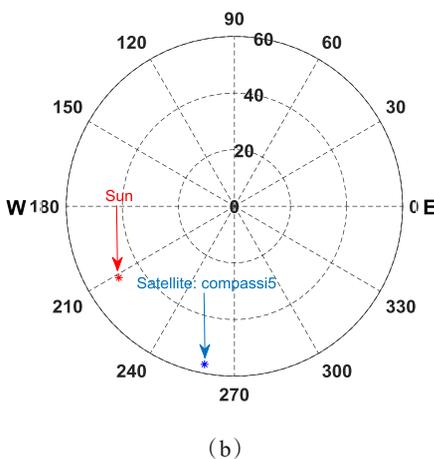
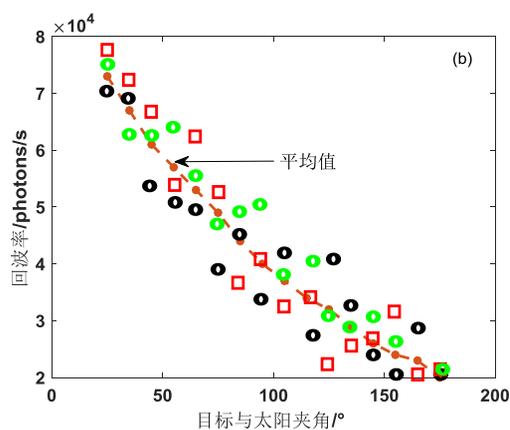
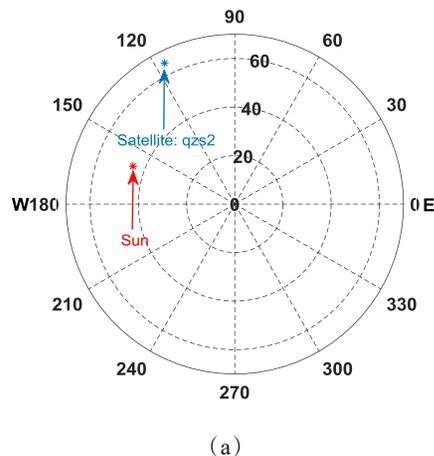
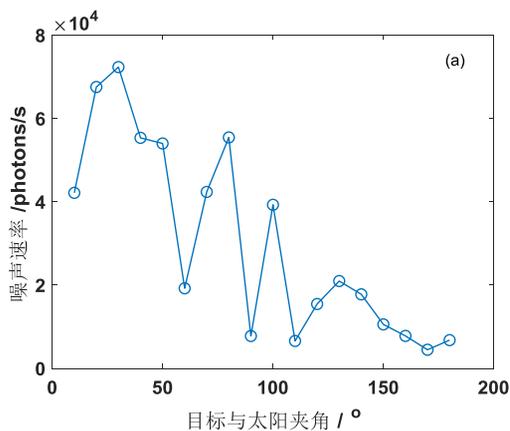


图7 不同天区天空背景噪声亮度变化

Fig. 7 Variation of sky background noise brightness in different sky regions

图9 测卫星和太阳相对位置 (a)卫星 qzs2 位置,(b)卫星 compassi5 位置

Fig. 9 The position of satellite and the Sun (a) position of qzs2, (b) position of compassi5

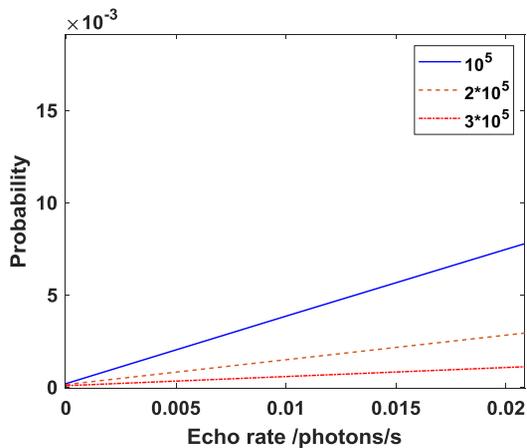


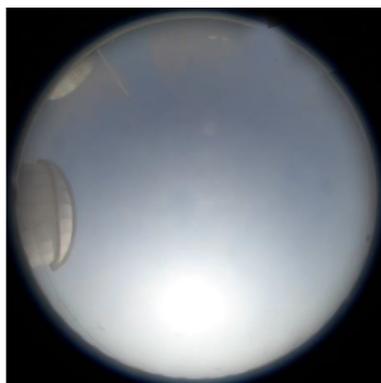
图8 不同噪声强度对探测概率的影响

Fig. 8 Influence of different noise intensities on detection probability

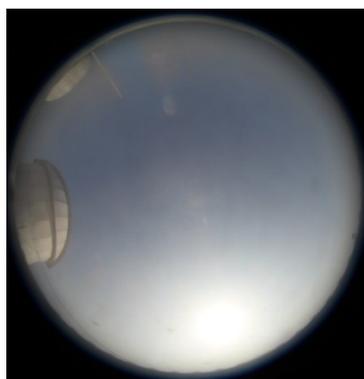
非最小,其他测站使用的单脉冲能量量级在 $\mu\text{J}\sim\text{mJ}$ 之间,但是国外激光测距系统的重复频率为kHz,而本系统的激光重复频率仅为100 Hz,因此本文系统的平均功率最低。

国外kHz激光测距系统的单脉冲能量已经达到 μJ 量级,但正是由于高重复频率的原因,系统发射激光的平均功率并不低,达到百毫瓦量级,故可以实现远距离激光测距,相关数据统计如表4-5所示。表4中统计了部分测站在夜晚进行激光测距时使用的平均功率。表5中统计了部分测站在白天激光测距时使用的平均功率。研究发现提高激光重复频率,降低单脉冲能量,但保持系统具有相对较高的平均功率,该策略可以使系统表现出较高的探测能力(测量同步轨道目标)。本文衰减了发射激光的

的最小平均功率为0.015 W。与国内外其他激光测距台站相比,本文所分析的系统发射单脉冲能量并



(a)



(b)

图 10 空背景亮度 (a) 北京时间 14:00(2020.12.27)天空亮度, (b) 北京时间 15:00(2021.02.03)天空亮度

Fig. 10 Sky background brightness (a) Beijing time 14: 00 (2020.12.27) sky brightness, (b) Beijing time 15: 00 (2021.02.03) sky brightness

单脉冲能量, 激光脉冲重复频率为 100 Hz, 平均功率可以达到十毫瓦量级, 并实现了同步轨道卫星激光测距。当采用相同功率(0.4 W)分别在白天和夜晚进行卫星激光测距, 夜晚的有效回波率约为白天的 9.2 倍, 当采用极限功率分别在白天(0.04 W)和

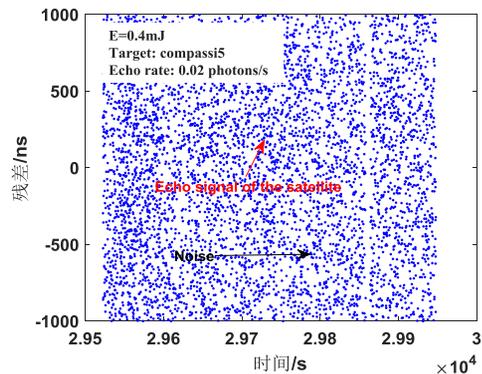


图 11 0.4 mJ 白天同步卫星激光测距

Fig. 11 Satellite laser ranging daytime with 0.4 mJ

夜晚(0.015 W)进行卫星激光测距, 夜晚的有效回波率约为白天的 20 倍。

4 结语

为分析研究天琴计划激光测距台站卫星激光测距探测能力极限, 在白天和夜晚分别采用小功率进行实验, 成功实现对同步轨道卫星(轨道高度约 36,000 km)的测量。通过降低单脉冲能量的策略, 分析研究了平均功率对激光测距探测能力的影响, 并总结出白天和夜晚的极限激光发射功率。天琴

表 5 白天激光测距激光器功率统计

Table 5 Power statistics of daytime laser ranging

单脉冲能量	激光重复频率	平均功率	测量距离	测站/系统	实验时段
400 mJ	100 Hz	40 W	36 000 km	云南天文台 ^[1]	白天
190 μJ	10 kHz	1.9 W	36 000 km	上海天文台 ^[3]	白天
3 mJ	1 kHz	3 W	20 000 km	长春人卫站	白天
80 mJ	200 Hz	16 W	1 500 km 空间碎片	Graz ^[10]	白天
400 μJ	2 kHz	0.8 W	6 000 km Lageos	Graz ^[22]	白天
1.5 mJ	10 kHz	15 W	36 000 km	TROS1000 ^[23]	白天
7.8 μJ	1 MHz	7.8 W	36 000 km	Graz ^[24]	白天
0.4 mJ	100 Hz	40 mW	36 000 km	TianQin	白天

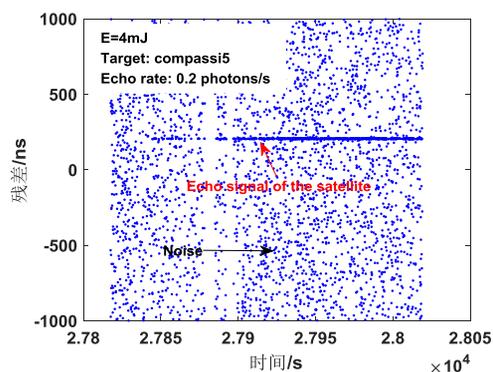


图 12 4 mJ 白天同步卫星激光测距

Fig. 12 Satellite laser ranging daytime with 4 mJ

表 4 夜晚激光测距激光器功率统计

Table 4 Laser ranging distance statistics under different average power conditions

单脉冲能量	激光重复频率	平均功率	测量距离	测站/系统
100 μ J	2 kHz	200 mW	22,000 km	SLR 2000 ^[20]
400 μ J	2 kHz	80 mW	22,000 km	Graz ^[21]
0.6 mJ	10 kHz	6 W	36,000 km	Shanghai ^[4]
400 mJ	100 Hz	40 W	36,000 km	Yunnan
150 μ J	100 Hz	15 mW	36,000 km	TianQin

激光测距台站已经具备白天和夜晚全时段卫星激光测距能力,今后可更好地服务于深空目标探测任务。

References

[1] LI Zhu-Lian, Zhai Dong-Sheng, Zhang Hai-Tao, *et al.* Superconductivity detector applied to daytime satellite laser ranging experiment and research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, v.49; No.310(08): 127-132. (李祝莲, 翟东升, 张海涛, 等. 基于超导探测器的白天卫星激光测距试验与研究[J]. *红外与激光工程*), 2020, v.49; No.310(08): 127-132.

[2] LI Ming, XUE Li, HUANG Chen, *et al.* Estimation of de-

tection range for space debris laser ranging system based on efficient echo probability [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 260-267. (李明, 薛莉, 黄晨, 等. 基于有效回波概率估计空间碎片激光测距系统作用距离[J]. *光学精密工程*), 2016, 24(2): 260-267.

- [3] DENG Hua-Rong, LONG Ming-Liang, ZHANG Hai-Feng, *et al.* Experiment of satellite laser ranging in daytime based on 1064nm wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, v.49; No.312(10): 134-139. 邓华荣, 龙明亮, 张海峰, 等. 1064 nm 波长白天卫星激光测距[J]. *红外与激光工程*, 2020, v.49; No.312(10): 134-139.
- [4] LONG Ming-Liang, ZHANG Hai-Feng, MEN Lin-Lin, *et al.* Satellite laser ranging at 10 kHz repetition rate in all day [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2020, 39(06): 778-785. (龙明亮, 张海峰, 门琳琳, 等. 10 kHz 重复率全天时卫星激光测距[J]. *红外与毫米波学报*), 2020, 39(06): 778-785.
- [5] LI Xin, WANG Pei-Yuan, ZOU Tong, *et al.* Experiment on kHz laser ranging at Wuhan satellite laser ranging station [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(02): 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(02): 367-370.
- [6] Kirchner G, Koidl F. Laser Ranging to Space Debris from Graz Laser Station [J]. *VGI*, 2015, 103(2-3): 151-155.
- [7] Kucharski D, Otsubo T, Kirchner G, *et al.* Spin axis orientation of Ajisai determined from Graz 2 kHz SLR data [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(3): 251-256.
- [8] Kucharski D, Kirchner G, Koidl F. Spin parameters of nanosatellite BLITS determined from Graz 2 kHz SLR data [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(2): 343-348.
- [9] DENG Hua-Rong, ZHANG Hai-Feng, LONG Ming-Liang, *et al.* 4 kHz Repetition rate satellite laser ranging system and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(003), 225-231. (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(003), 225-231.
- [10] Steindorfer M A, Kirchner G, Koidl F, *et al.* Daylight space debris laser ranging [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1), 1-6.
- [11] Degnan J J, McGarry J F. SLR2000: Eyesafe and autonomous single photoelectron satellite laser ranging at kilohertz rates [J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 1997, 3218: 63-77.
- [12] Isyanova Y, Wall K F, Flint J H, *et al.* High-power, short-pulse, compact SLR2000 laser transmitter [J]. 2004, p. MB14.
- [13] Degnan J J. SLR2000 technical overview, status, and schedules [J]. 2001, June 1.
- [14] Lim H C, Sung K P, Yu S Y, *et al.* Satellite laser ranging system at Geochang station [J]. *Journal of Astronomy and Space Science*, 2018, 35(4): 253-261.
- [15] Lim H, Choi M, Park E, *et al.* Technical Aspects and Progress of Korean SLR Systems [C]// 18th International Workshop on Laser Ranging. 2013.
- [16] 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.

- [17] Jianwei Mei, Yan-Zheng Bai, Jiahui Bao, *et al.* The Tian-Qin project: current progress on science and technology [J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, (5), 05A107.
- [18] Tang Mei-Rong, Li Zhu-Lian, Li Yu-Qiang, *et al.* Influence of Atmospheric Turbulence Intermittency on Return Photon Number in Laser Ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017. **037**(002), 1-7. (唐美荣, 李祝莲, 李语强, 等. 大气湍流间歇性对激光测距回波光子数的影响[J]. *光学学报*), 2017. **037**(002), 1-7.
- [19] Han Guang-Yu, Ju Feng, Guo Jin, *et al.* Analysis and realization of day-time ranging of SLR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012. (04), 885-890. (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. (04), 885-890.
- [20] J. J. Degnan, "SLR 2000" in *Satellite Laser Ranging in the 1990's: Report of the 1994 Belmont Workshop* [C]. NASA Conference Publication, **1994**, 3283, pp. 101-106.
- [21] Kucharski D, Kirchner G, Lim H *Cet al.* Spin parameters of High Earth Orbiting satellites Etalon-1 and Etalon-2 determined from kHz Satellite Laser Ranging data [J]. *Advances in Space Research*, 2014, **54**(11), 2309 - 2317.
- [22] Kirchner G, Koidl F. Graz kHz SLR system: design, experiences and results [C]//Proc. 14th Int. Workshop Laser Ranging. 2004: 501-505.
- [23] Guo T, Wang P, Li X, *et al.* Progress of the satellite laser ranging system TROS1000 [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, **6**(1): 67-72.
- [24] 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.