

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

张忠萍^{1,2} 张海峰^{1*} 吴志波^{1,2} 李 朴¹ 孟文东^{1,2} 陈菊平^{1,2} 庞 毓³

¹ 中国科学院上海天文台, 上海 200030
² 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008
³ 中国工程物理研究院应用光电子研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 空间碎片已成为影响在轨航天器安全的重要因素。激光测距对开展空间碎片轨道精确测定、精密编目及监测预警等具有重要作用。根据激光测距雷达方程,分析了不同重复率和功率激光器的激光回波信号探测情况。将 200 Hz 重复率、50 W 功率全固态激光器应用于空间碎片测量,配合低噪声探测器、纳秒控制精度距离门产生器及高效率光谱滤波器等,实现了空间碎片高成功率观测,所测量的目标中最小截面积达 0.5 m²、最远距离超过 2100 km,表现出良好性能和测量效果。验证了高重复率、低脉冲能量激光器对空间碎片测量可行性,为后续高重复率空间碎片激光测距技术的发展与应用提供了指导。

关键词 激光技术;激光测距;空间碎片;高重复率全固态激光器;测量试验

中图分类号 P228.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s108005

Experiment of Laser Ranging to Space Debris Based on High Power Solid-State Laser System at 200 Hz Repetition Rate

Zhang Zhongping^{1,2} Zhang Haifeng¹ Wu Zhibo^{1,2} Li Pu¹
Meng Wendong^{1,2} Chen Juping^{1,2} Pang Yu¹

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, Jiangsu 210008, China

³ Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Space debris becomes vital factors threatening the safety of working spacecrafts on orbit. The laser ranging technology will play an important role in precise measuring orbits, accurate cataloging, surveillance and forewarning to space debris. Based on the laser link equation, the analysis of laser echo signal detection from different power lasers with different working frequencies is performed. The 50 W power diode pumped solid-state laser system with 200 Hz repetition rate is applied to observe space debris. Combining with the low dark noise detector, range gate generator with the nanosecond controlling precision and high efficient spectral filter, the measurement to space debris with high success rate are realized. Among the measured targets, the minimum cross section is about 0.5 m² and the farthest distance is more than 2100 km. The results show that the laser ranging system has good performance while using the high power, high repetition rate laser and verify the feasibility of high repetition rate, low pulse energy laser to observe space debris. The results are helpful for the development and application of space debris laser ranging technology with high repetition rate in the future.

Key words laser technique; laser ranging; space debris; high repetition rate solid-state laser; measuring experiment

OCIS codes 000.2170; 140.3540; 040.5160; 350.1260

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-14

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(2920100701)、国家自然科学基金天文联合基金(U1231107)、“十二五”空间碎片预研专项项目(K0103110)

作者简介: 张忠萍(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事卫星激光测距技术方面的研究。E-mail: zzp@shao.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: hfzhang@shao.ac.cn

1 引言

在过去 50 多年人类对太空不断探索和开发应用过程中,产生了大量空间碎片,数量日益增加,是目前影响在轨卫星或航天器安全的重要因素。根据美国 NASA、欧洲 ESA 等空间研究部门估计,在地球低轨道(LEO)上运行着大约有 20 万至 60 万颗、大小在 1 cm 及以上的空间碎片^[1]。这些空间碎片一旦与工作卫星或航天器相撞,将造成严重后果。2009 年发生的美国在轨卫星(编号 33)与俄罗斯失效 Cosmos 卫星(编号 2251)碰撞,及 2013 年俄罗斯 Blits 卫星和法国 Jason2 卫星与空间碎片的碰擦事件,证实空间目标相互碰撞已成为事实。因此,开展空间碎片高精度监测、精确编目、精密定轨和碰撞预警等已成为当今国际航天大国所关注的重要问题。已发生的空间目标碰撞事件表明,基于现有微波雷达和传统光电观测所获得的目标轨道精度还不足以高成功率地实现目标碰撞主动规避,因此有必要发展高精度空间目标测量技术。

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,获得星地间精密距离。对带有激光反射器的卫星或航天器,测距精度达厘米或亚厘米级;对激光漫反射空间碎片目标,测距精度达米级或分米级,比雷达和光电观测精度高 1~2 个数量级。Gottlieb 等^[2]在第十一届 AAS/AIAA 年度会议报告中提到“如果没有高精度目标轨道测定数据,航天器对空间碎片机动规避是困难的,不能从航天器机动规避的方式来显著减少碰撞概率。为实现碰撞概率的有效降低和保持航天器±6 km 可控区域,激光测量的观测数据是必要的,而雷达测量数据还不能满足此要求。”由此可见,激光测距技术作为空间碎片目标轨道高精度测定手段,十分有利于目标精密定轨、精确编目等,对提高目标轨道测量精度,加强目标碰撞规避预警能力和建立可跟踪的空间碎片目标动态数据库,开展空间碎片环境演化模式和工程模式研究具有重要意义。

空间碎片对入射光束产生表面漫反射,仅有少部分激光信号返回到地面观测站。因此,地面站采用光束质量高、稳定性好的高功率激光器是关键,以保证地面站可接收到足够强的回波信号。高功率激光器系统性能与其工作方式有直接的关系。激光器工作方式主要有两种:灯抽运方式和二极管抽运方式。目前国内已实现的空间碎片激光测距中,均采用了灯抽运方式^[3-5]。对于灯抽运方式激光器,工

作频率不高,数焦耳单脉冲能量已接近光学器件所能承受的极限,更致命的是灯抽运激光器光束质量较差。使用这类激光器对远距离、小目标进行激光测量非常困难。另外,激光器光学器件长期工作在高脉冲能量状态下,易受到损伤,系统稳定性不好,这在已开展的空间碎片激光观测实践中得到证实。

随着激光器技术发展,基于二极管抽运方式的高光束质量、高功率脉冲激光器已在国际空间碎片高精度激光测距中得到应用。澳大利亚 Stromlo 激光站在 2005 年即采用了重复频率 50 Hz、功率 100 W 的激光器,光束质量为 1.2 倍衍射极限,光束指向稳定性好于 $1''$ ^[6],这是灯抽运激光器所达不到的。2010 年该站系统升级改造,采用重复频率 100 Hz、功率 250 W、脉宽 5 ns 的高功率激光器,在空间碎片激光测距中得到很好测量效果,测量的目标最小尺寸达 5 cm,代表了国际空间碎片激光测距技术最高水平^[7]。奥地利 Graz 激光站在 2011 年 11 月采用重复频率 1 kHz、功率 25 W、脉宽 10 ns、光束质量 M^2 优于 2 的激光器,实现了空间碎片激光测距^[8],测距精度小于 1 m,最远距离大于 2500 km,目标截面积最小为 0.3 m²。由于二极管抽运方式激光器具有高重复率,可采用较低的单脉冲能量,实现高的输出功率;可设置较小的激光发散角,达到高光束质量的要求。同时由于高重复率、低脉冲能量特性,可降低器件的损伤性,提高系统的稳定性。

鉴于二极管抽运方式高功率脉冲激光器技术优势,中国科学院上海天文台在已有的空间碎片激光测距基础上,与中国工程物理研究院应用光电子研究所合作,将 200 Hz 高重复率二极管抽运全固态高功率激光器应用于空间碎片激光测距,以验证我国现有高功率脉冲激光器技术用于空间碎片高精度激光测距的可行性,为我国空间碎片激光测距技术进一步发展奠定基础。本文介绍了中国科学院上海天文台基于该高重复率激光器所建立的空间碎片激光测距系统,并对空间碎片激光测量结果进行了分析。

2 空间碎片激光回波探测理论分析

根据激光测距雷达方程及测距系统参数,理论上可估算出测距系统所能获得的激光回波光子数,为实际测量提供参考。空间碎片激光测距雷达方程如下^[9]:

$$n_0 = \frac{\lambda \eta_d}{hc} \times \frac{E_t A_r \sigma}{4\pi \theta_t^2 R^4} \times T^2 \times K_t \times K_r \times \alpha, \quad (1)$$

式中 n_0 为系统接收的平均光电子数, λ 为激光波长

(532 nm), h 为普朗克常量 ($6.6260693 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c 为光速 (299792458 m/s), η_{t} 为探测器探测效率 (取 20%), E_{t} 为激光器单脉冲能量, A_{r} 为系统有效接收面积 (对于上海激光站 60 cm 口径望远镜, 副镜取 0.2 m, A_{r} 为 0.251 m^2), σ 为目标反射横截面积, T^2 为双程大气透射率 (取 0.25), K_{t} 为发射光学系统效率 (取 0.6), K_{r} 为接收光学系统效率 (取 0.7), α 取大气衰减因子 (取 0.05), θ_{t} 为激光束发散角 (取 $8''$, 经发射望远镜后), R 为目标到台站的距离 (取

1000 km)。对于光电探测器, 光电转换服从泊松分布, 产生一个光电子概率为: $P(1) = 1 - \exp(-n_0)$ 。假定激光重复频率为 f , 则每秒钟可接收激光回波数 $N = P(1) \times f$ 。

根据上海激光站的系统参数, 对横截面积为 1 m^2 和 3 m^2 空间目标, 分别计算了激光器在不同输出功率 (30 W、50 W、80 W、100 W) 和不同重复频率 (10~1000 Hz) 情况下, 每秒钟的激光回波数, 如图 1 所示。

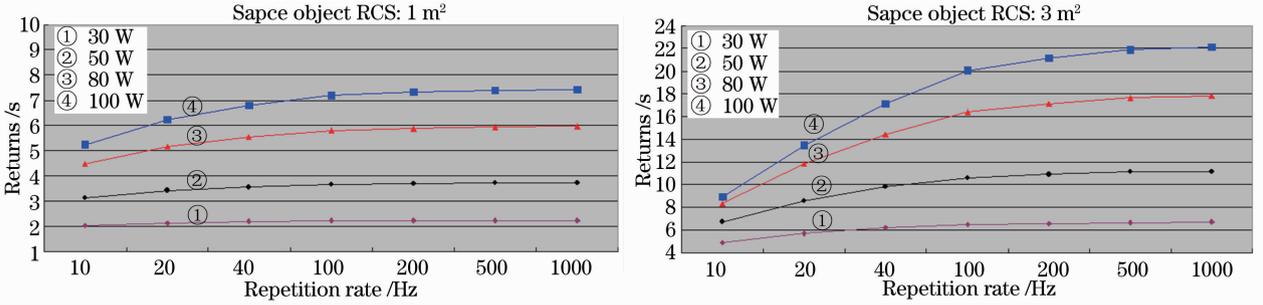


图 1 不同输出功率的激光器每秒钟获得的激光回波数与其重复频率之间关系

Fig. 1 Returns per second versus repetition rate with different power lasers

由图 1 可看出, 对于距离 1000 km、横截面积 1 m^2 的空间碎片目标, 在激光重复频率大于 100 Hz 时, 每秒钟激光回波数几乎不随重复频率增加而增加; 对于横截面积为 3 m^2 的目标, 在激光重复频率大于 500 Hz 时, 也有类似结果。而低重复频率时, 激光单脉冲能量大, 每秒激光回波数与重复频率关联性强, 且激光器功率较高时, 两者关系更为明显。对于上述计算结果, 从 $P(1)$ 计算式中也不难理解, 对 $P(1)$ 进行幂级数展开, 在 n_0 较小时, 可认为 $P(1) \approx n_0$, 在此情况下, 每秒钟激光回波数 $N = P(1) \times f \approx n_0 \times f$, 而 n_0 中的 $E_{\text{t}} \times f$ 即为激光器输出功率, 这使得在系统其他参数不变时, 每秒激光回波数依赖于激光器输出功率。上述分析结果表明, 对特定目标开展激光测距, 在激光功率一定时, 可通过提高重复率实现激光回波数的增加。另外, 增加重复频率, 还可降低单脉冲能量, 有利于提高激光器的稳定性及光束质量, 这是空间目标激光测距的关键之一。

3 高重复率空间碎片激光测距系统

相比于灯抽运低重复率空间碎片激光测距系统^[4], 高重复率空间碎片激光测距系统中的激光器、光子探测器、距离门控制器、噪声滤波等具有较大差

异。对上述测量设备进行了改造, 以满足高重复率空间碎片激光测距系统测量要求。

3.1 高重复率激光器系统

高功率、高光束质量、高稳定性的激光器系统是空间碎片激光测距的核心和关键。图 2 为本系统中使用的高重复率、高功率激光器的光学系统原理, 采用主振荡功率放大技术 (MOPA), 实现短脉冲高光束质量的激光输出^[10-11]。主振荡器产生固定重复频率为 200 Hz、单脉冲能量 28 mJ、脉宽 12 ns 的 1064 nm 波长基频激光。通过激光扩束器和预放大器, 使输出的激光脉冲能量提高到 155 mJ。由于热效应产生的波前畸变及扩束效应, 使得 M^2 降低到 1.8。出射的激光再经过扩束器、隔离器及 45° 反光镜进入主放大器, 此时激光脉冲能量增加到约 500 mJ。由于该激光器采用了固定工作频率, 主放大器采用了单一的凸柱面镜进行热效应补偿, 效果良好。经过主放大器后的 1064 nm 波长的基频激光, 再由 45° 反光镜转折到 KTP 晶体倍频器件。为保证倍频晶体的转换效率, 采用半导体器件使 KTP 晶体工作在恒温状态, 倍频效率可达 50%。最终输出单脉冲能量约 250 mJ、功率 50 W (200 Hz)、波长 532 nm 的绿色激光脉冲信号, 激光发散角约 0.5 mrad, 光斑直径约 10 mm, 光束质量 $M^2 \approx 5$ 。

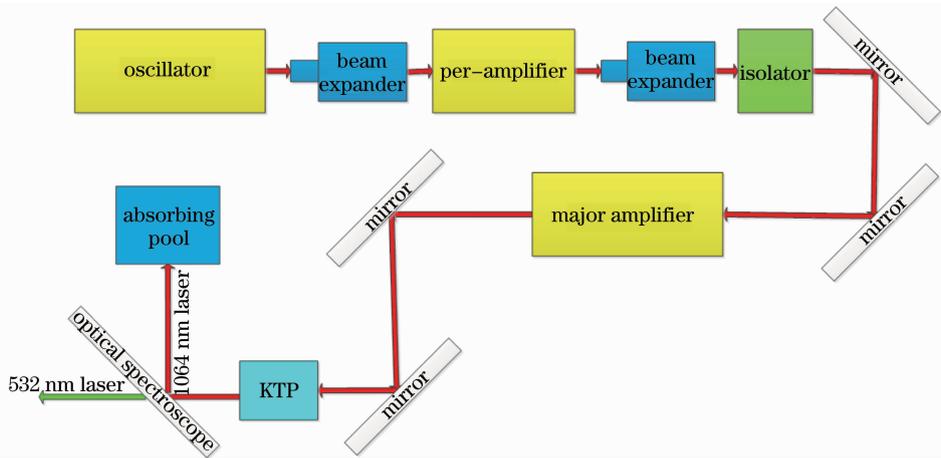


图 2 200 Hz 重复率高功率全固态激光器光学系统原理

Fig. 2 Schematic of optical system for high power solid-state laser with 200 Hz repetition rate

上述激光器系统通过在中国科学院上海天文台 SLR 站的安装调试,利用光束质量分析仪对其输出的激光脉冲信号分别在近场和远场的光斑分布进行

了测试,测试结果如图 3 所示,(a)为近场测量结果,(b)为远场测量结果。

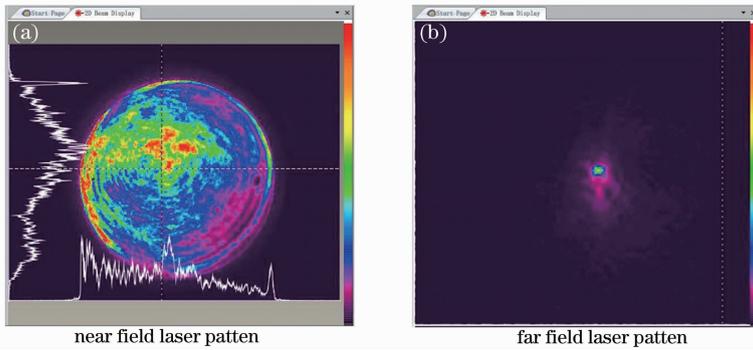


图 3 激光束光斑性能测试

Fig. 3 Laser pattern testing in the near field and far field by the beam quality analyzer

由图 3 可知,激光束近场光斑呈现良好的圆形状,其中垂直方向能量峰值基本处于光斑中心位置,而水平方向能量峰值在中心位置和边缘位置均匀分布;远场光斑小而均匀,激光能量较为集中。高功率激光器系统光束光斑圆而均匀、窄发散角能量集中等特点,是空间碎片激光测距中要求激光器所具有的性能。

3.2 低噪声光子探测器

在低重复率空间碎片激光测量中,采用了带时间游动补偿的 C-SPAD 单光子探测器,主要性能指标:探测效率 20% (波长 532 nm),暗噪声数约为 100 kHz (重复率 200 Hz),探测精度小于 30 ps,时间游动补偿精度小于 10 ps^[3]。空间碎片激光测距中,由于激光器脉宽为纳秒级,是决定激光测量精度的主要因素,即对探测器探测精度要求不高,转而对暗噪声数和探测效率提出了要求。基于原有合作目标光子探测器使用经验,采用了探测精度约为

500 ps,暗噪声数约为 10 kHz (重复率 200 Hz),探测效率大于 30% (波长 532 nm) 的低噪声光子探测器,并成功应用到了此次高重复率空间碎片激光测量试验,发挥了关键性作用。

3.3 高重复率距离门控制器

激光测距中广泛采用距离门控方法,即在预计激光回波信号返回时,向探测器发送门控信号,接收回波光子,达到抑制背景噪声的目的。对于 200 Hz 重复率激光发射,所测量的碎片目标距离从数百千米到两千多千米,其距离门控长度将出现大于激光发射间隔(5 ms)的情况,而如采用低重复率直接计数的距离门控制方式,将使距离门控制器变为极为复杂,稳定性受到很大影响。同时由于激光发射和接收时间段重叠,存在发射出去的激光信号经大气后向散射后,被光子接收系统探测,这对有效激光回波接收产生干扰,因而需考虑激光后向散射规避。

本次距离门产生器利用 FPGA 高速度性能,完成

数学运算、缓存等功能,应用 DCM 可配置逻辑资源数字电路,实现了高重复率距离门控制器的灵活性、小型化、集成化设计^[12]。采用计算机串口实现与距离门控制器之间数据交互,频率为 1 Hz。数据运算处理过程全部由 FPGA 实时计算模块完成,大大降低了距离门控制器对测距控制软件的依赖性,有效提高了测距控制软件和距离门产生器的实时性,满足了高重复率激光测距要求。经测试,该距离门产生器分辨率为 5 ns,最高工作频率可达 10 kHz 以上。

针对激光后向散射问题,采用激光点火信号移动方式进行解决^[13],即当距离门控信号发生时刻与某次激光点火信号时刻接近时,将下一个及后续激光点火信号发射时刻推迟一定时间,使距离门控信号事件发生后再启动激光发射事件,进而达到对激光后向散射规避的目的。通过在激光点火功能模块中添加激光点火信号与距离门控信号之间时刻实时判断,实现激光点火信号移动控制功能。上述距离门产生器设计方法在高重复率空间碎片激光测距中得到很好的应用。

3.4 噪声光谱滤波器

为提高激光回波信号探测的信噪比和测距成功率,除采用低噪声光子探测器外,应用高效率光谱滤波技术是必要的。在空间碎片激光回波信号搜索中,为扩大距离门调整范围,对降低背景噪声也提出了要求。为此,采用了中心波长 532 nm、带宽 ± 2.0 nm、中心波长透射率大于 95% 的窄带滤波器,大幅减少了天光背景噪声对光子探测器干扰,有效提高了碎片目标激光回波信号的探测成功率。

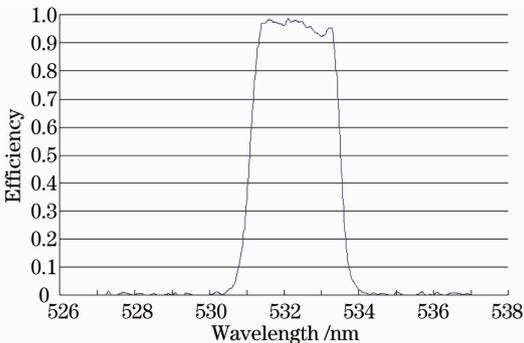


图 4 中心波长 532 nm 窄带滤波器透过率曲线

Fig.4 Spectral efficiency of narrowband filter at the central wavelength of 532 nm

4 高重复率空间碎片激光测距试验及数据分析

基于已建立的低重复率空间碎片激光测距系

统,于 2013 年 3 月初完成了 200 Hz 重复率空间碎片激光测距系统改造。在天气晴好情况下,应用了两行根数 TLE 作为目标初轨预报,开展了空间碎片激光测距试验。其中在 3 月 2 日至 3 月 6 日连续 5 天的观测试验中,共测量 19 颗目标、32 圈次的激光观测数据,多颗目标获得了多圈激光观测数据,如表 1 所示。

表 1 200 Hz 重复率空间碎片目标激光测量统计(3月2日~3月6日)

Table 1 Statistics of space objects measured by 200 Hz repetition rate laser system (March 2~6)

No.	NORAD ID	Orbit height /km	Number of passes measured
1	10861	377	1
2	11267	616	1
3	11574	769	3
4	13553	636	1
5	16182	846	2
6	20323	786	2
7	20453	914	4
8	20788	898	1
9	21610	761	1
10	23343	647	2
11	23705	850	2
12	24968	779	2
13	25169	779	1
14	25170	779	1
15	25530	779	2
16	25531	779	1
17	27373	753	1
18	27376	753	2
19	28222	606	2

图 5 给出了代号为 20788、雷达散射截面积(RCS)为 3.06 m^2 的我国风云卫星激光观测数据预

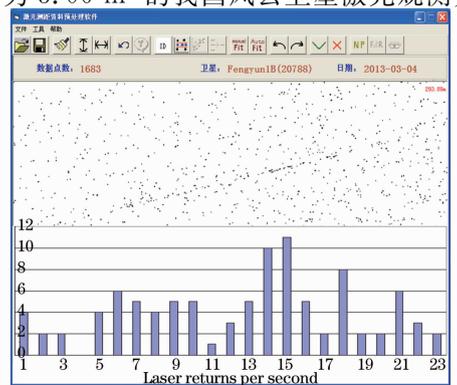


图 5 空间碎片激光回波数每秒钟统计结果

Fig.5 Statistic of laser returns per second from space debris

处理图及每秒内有效激光回波数统计。该弧段有效观测时间约 0.38 min, 目标距离为 990~1065 km。由图可知, 每秒钟激光回波数 8 个以上的有 3 s, 10 个以上的有 2 s, 即激光测距系统在观测状态良好时, 与图 1 中的理论计算结果[激光器功率 50 W (重复率 200 Hz), 目标 RCS 为 3 m²]基本符合。

在随后空间碎片激光测量时间段内, 应用 200 Hz 重复率激光器多次开展了空间碎片测量, 在 2013 年 4 月 2 日和 15 日晚上分别成功测量到 16 颗和 14 颗碎片目标, 其中最小目标截面积(RCS)达 0.5 m², 最远目标距离超过 2100 km, 对较大尺寸(1 m²)目标测量成功率在 80% 以上。

图 6 给出了 2011 年 9 月至 10 月期间使用 10 Hz 重复率大能量激光器与 2013 年 3 月至 4 月

期间使用 200 Hz 重复率高功率激光器, 所测量碎片目标 RCS 和距离统计的比较。由图 6 可知, 相比于原 10 Hz 低重复率大能量激光器的观测结果, 采用 200 Hz 重复率高功率激光器后, 在碎片目标的观测圈次、作用距离、RCS 大小、成功率等方面能力均得到很大提升。

此外, 由图 1 中的理论计算结果可知, 在激光器输出功率不变情况下, 当重复频率增加到一定程度后, 激光回波数基本固定, 同时提高重复频率, 必然增加测量中的噪声数, 不利于碎片目标激光回波高效探测。此次测量试验结果表明, 在空间碎片激光测量中, 百赫兹重复率激光器在输出功率、光束质量、稳定性及碎片测量效果等方面具有良好的技术优势。

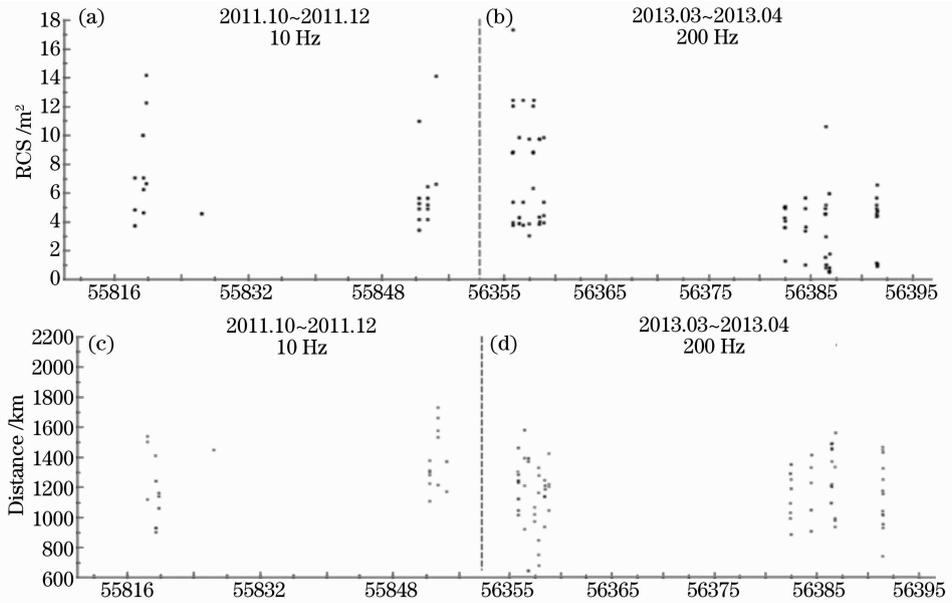


图 6 10 Hz 重复率大能量激光器与 200 Hz 重复率高功率激光器碎片测量结果比较

Fig. 6 Comparison of measurement to space debris by the high energy laser of 10 Hz and the high power laser of 200 Hz

5 结 论

激光测距作为空间目标测轨精度最高的技术, 对精确测定空间碎片目标轨道、开展目标精密定轨及提高目标编目精度等具有重要作用。应用空间碎片激光测距雷达方程, 理论分析了不同工作频率和输出功率激光器对碎片目标激光回波数的探测情况。基于已有空间碎片激光测距系统, 并进行适应性改造, 中国科学院上海天文台与中国工程物理研究院应用光电子研究所合作, 将 200 Hz 重复率全固态激光器应用于空间碎片激光观测, 获得了良好观测效果, 与理论计算结果基本一致, 体现了半导体抽

运高功率激光器在空间碎片激光测距中的技术优势, 为我国后续空间碎片激光测距技术发展及系统应用奠定很好的基础。

此外, 此次空间碎片激光观测试验中, 对若干颗碎片目标(代号 20453、28222、11574 等)获得了多圈激光观测数据, 这为开展空间碎片目标单站多圈激光观测数据定轨试验, 及在我国航天器监测预警中效能发挥等应用研究提供了重要的激光观测数据支撑。

参 考 文 献

1 Deng Xianfeng. Review of space debris observation[J]. China Aerospace, 2005, (7): 24-26.
 祁先锋. 空间碎片观测综述[J]. 中国航天, 2005, (7): 24-26.

- 2 Robert G Gottlieb, Steven J Sponaugle, David E Gaylor. Orbit determination accuracy requirements for collision avoidance[C]. Proceeding of the 11th Annual AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2001, 2: 1105–1121.
- 3 Yang Fumin, Zhang Zhongping, Chen Juping, *et al.*. Preliminary results of laser ranging to un-cooperative targets at shanghai SLR [C]. Station Proceedings of 16th International Workshop on Laser Ranging, 2008. 695–699.
- 4 Zhongping Zhang, Fumin Yang, Haifeng Zhang, *et al.*. The use of laser ranging to measure space debris [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2012, 12(2): 212–218.
- 5 Li Yuqiang, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. Experimentation of diffuse reflection laser ranging to space debris [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908001.
李语强, 李祝莲, 付红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908001.
- 6 Craig H Smith. The EOS space debris tracking system [C]. Proceedings of 2006 AMOS Technical Conference, 2007. 719–728.
- 7 Craig H Smith. Space Debris Tracking Using Lasers [OL]. https://daspworkshop.org/uploads/DASP11_Proceedings/Smith_Craig.pdf. [2014-03-26].
- 8 Georg Kirchner, Franz Koidl, Fabian Friederich, *et al.*. Laser measurements to space debris from Graz SLR station [J]. Advances in Space Research, 2013, 51(1): 21–24.
- 9 Degnan J J. Millimeter accuracy satellite laser ranging; a review [J]//Smith D E, Turcotte D L. Contributions of Space Geodesy to Geodynamics; Technology, 1993, 25: 133–162.
- 10 Wang Weimin, Yao Zhenyu, Pang Yu, *et al.*. Study on DPL technology of hectowatt green laser [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(1): 5–7.
王卫民, 姚震宇, 庞毓, 等. 百瓦级绿光 DPL 激光器技术研究 [J]. 中国激光, 2004, 31(1): 5–7.
- 11 Tang Chun, Gao Qingsong, Tong Lixin, *et al.*. 160 W diode-pumped E-O Q-switched master oscillator power amplifier green laser [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(11): 1455–1458.
唐淳, 高清松, 童立新, 等. 160 W 激光二极管抽运电光调 Q 主振荡功率放大器绿光激光器 [J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1455–1458.
- 12 Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Chen Juping. The implementation of range-gate control circuit with high-repetition-rate based on FPGA [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 919–922.
吴志波, 张忠萍, 陈菊平. 基于 FPGA 的高重复率距离门控电路实现 [J]. 电子学报, 2010, 38(4): 919–922.
- 13 Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.*. kHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(15): 1177–1183.
张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果 [J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1177–1183.

栏目编辑:何卓铭