

# 1064 nm 波长卫星激光测距技术和实验研究

孟文东<sup>1,2,3</sup> 汤凯<sup>1</sup> 邓华荣<sup>1</sup> 李朴<sup>1</sup> 张海峰<sup>1</sup> 吴志波<sup>1,2</sup> 张忠萍<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海天文台, 上海 200030; <sup>2</sup>中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏南京 210008

<sup>3</sup>华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

**摘要** 卫星激光测距(SLR)是目前卫星单点测量精度最高的测距技术,通常采用 532 nm 波长激光器,由 1064 nm 基频光倍频得到。而 1064 nm 波长激光在大气传输特性、远场光束特性、远场光的单位能量光子数和激光器功率等方面都较 532 nm 有优势,更有利于增强系统的探测能力,尤其在开展微弱信号目标的探测方面。进行了 1064 nm 波长卫星激光测距技术研究,分析了构建 1064 nm 波长卫星激光测距系统主要技术和难点,提出了相应的解决方案,在国内首先开展 1064 nm 波长高精度卫星激光测距实验,获得了初步的测量结果,为该测量技术发展和应用打下了很好基础。

**关键词** 测量;卫星激光测距;1064 nm 波长激光;532 nm 引导 1064 nm 激光发射;测量实验

中图分类号 P228 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s112006

## Research and Experiment of Satellite Laser Ranging with 1064 nm Wavelength

Meng Wendong<sup>1,2,3</sup> Tang Kai<sup>1</sup> Deng Huarong<sup>1</sup> Li Pu<sup>1</sup> Zhang Haifeng<sup>1</sup>  
Wu Zhibo<sup>1,2</sup> Zhang Zhongping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract** Satellite laser ranging (SLR) is the most common satellite observation technology with the highest single shot measuring precision which usually uses 532 nm wavelength derived from 1064 nm laser. 1064 nm wavelength has many better properties than 532 nm in atmospheric attenuation, photon number, laser power, development and price, and so on, which is benefit to enhance the system detection ability, and carry out the goal of weak signal detection. The key technology and difficulties are presented in building up a SLR system with the wavelength of 1064 nm, and the corresponding solutions are put forward. With these technologies, the satellite laser ranging based on 1064 nm wavelength in China is successfully carried out for the first time and the experimental foundations have been laid for the further development and application in field of space targets observation.

**Key words** measurement; satellite laser ranging; 1064 nm wavelength laser; laser emission with the way of 532 nm light guiding 1064nm; measuring experiments

**OCIS codes** 120.6085; 040.3060; 140.3070

## 1 引言

卫星激光测距(SLR)是目前卫星单点测量精度最高的测距技术<sup>[1]</sup>,国际上的卫星激光测距台站普遍采用 532 nm 波长激光,属于可见光波段,便于光学系统调试、光束指向监视和目标精确瞄准等,且在此波段范围具有较高的探测效率和高测量精度的光子探测器,技术成熟、可靠性高,适合进行带有合作目标的激光测

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1231107, U1130374)、中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室和上海市空间导航与定位技术重点实验室(06DZ22101)

作者简介: 孟文东(1982—),女,硕士,工程师,主要从事激光测距方面的研究。E-mail: wdmeng@shao.ac.cn

距。近年来,空间碎片测距、月球探测、行星际深空探测等需求的提出对激光测距能力提出了更高的要求。532 nm 波长激光由 1064 nm 倍频获得,受限于倍频器件的效率和研制水平<sup>[2]</sup>,功率提升有限,难以满足微弱目标信号测距的要求。而 1064 nm 波长激光避开了激光器中倍频器件的损伤问题,在激光发射功率上有很大的提升空间。另外,1064 nm 激光器的远场光束特性,远场光的单位能量光子数,大气传输特性,空间背景噪声等方面都较 532 nm 波长激光有优势<sup>[3]</sup>。因此,用 1064 nm 波长激光测距可以大大提高激光测距系统获得的光子数,增强系统的探测能力,但是相比 532 nm 波长激光,1064 nm 波长激光人眼不可见,激光的调试困难。1064 nm 光在大气中的散射比 532 nm 激光要低约一个数量级,因此对光束的指向监视具有一定难度。由于倍频过程对激光脉冲宽度有压缩的作用,所以基频 1064 nm 激光脉宽略有展宽,从而对激光测距精度有点影响。该波段满足高精度的单光子探测器噪声较大,靶面较小,对光学系统的准直等要求高,一定程度上影响了 1064 nm 激光测距的发展。

本文研究了 1064 nm 卫星激光测距技术,解决测距系统的激光调试、准直、光尖指向等问题,充分发挥 1064 nm 波长在激光功率提升、单位功率光子数和大气透射率方面的优势,提高激光测距系统的微弱目标探测能力,将为高轨卫星、空间碎片及激光测月等微弱目标测距提供好的解决方案。

## 2 1064 nm 卫星激光测距技术的发展和應用

1064 nm 波长 SLR 技术在国际上已有过初步的应用。1991 年,德国 Wettzell 天文台激光测距站为开展大气折射改正研究,曾开展过基于 1064 nm 和 532 nm 的双波长激光测距<sup>[4]</sup>,并成功获得了对 LAGEOS 卫星的 1064 nm 波长激光测距数据。测距系统的光学部分改造为对 532 nm 和 1064 nm 两个波长均有高发射、接收效率的光学系统,并采用盖革模式的雪崩二极管作为探测器,虽然所用探测器在 532 nm 波段的灵敏度比 1064 nm 高,但实测结果中 1064 nm 波段探测的卫星回波高于 532 nm 的回波。该实验证实了大气修正模型的正确性,同时也证明了 1064 nm 卫星激光测距的可行性。

在 1064 nm 波长空间碎片激光测距方面,澳大利亚 Mt Stromlo 激光测距站采用 1.8 m 口径望远镜,使用 50 Hz,100 W 的 1064 nm 波长激光器成功实现了对尺寸小于 10 cm 空间碎片目标的测距,测距精度优于 1 m,获得了良好测量效果<sup>[5]</sup>。

此外,1064 nm 激光在测高和行星际探测方面也有应用。2005 年 5 月,美国 NASA 的 GSFC 利用水星飞行器 Messenger 上的激光测高仪<sup>[6]</sup>,成功进行了异应答式单程激光测距实验,采用 1064 nm 激光信号,测量距离为  $2.43 \times 10^7$  km,测距精度达 20 cm。同年 9 月,该测距站又成功进行了地球到火星飞行器的单向激光测距实验,测量距离达  $8 \times 10^7$  km。其中地面测站的激光发射器频率为 56 Hz,激光能量为 150 mJ,发射功率为 8.4 W,激光信号波长为 1064 nm,激光脉宽为 5 ns。

国内 1064 nm 的激光测距主要应用于靶场测距,嫦娥一号搭载的激光高度计也应用了 1064 nm 的测距系统,但在空间目标高精度 SLR 应用方面仍未见有相关工作开展。

## 3 1064 nm 激光测距技术研究

### 3.1 1064 nm 波长激光束准直方法

激光的准直效果也就是远场发散角直接影响了目标处的激光能量密度,因此对发散角的控制十分重要。目前 SLR 系统中激光发射镜采用伽利略望远镜系统进行准直扩束,可以通过移动目镜位置调节激光出射发散角。发散角的调节完全根据激光束后向散射形状进行判断,光尖越尖发散角越小。但 1064 nm 波长在大气中的后向散射较弱<sup>[7]</sup>,且 CCD 效率不高,无法进行小视场高精度的光尖监视,因此本文设计了一种利用高斯光束特性进行发散角调节的方法,利用近距离较清晰的激光光斑实现对 1064 nm 激光发射系统的准直。

以中心振幅的  $1/e$  倍处为边界,高斯光束的纵切面为双曲线型。对于有限距离的高斯光束来说,只有光腰处的等相位面是平面,近似为平面波,其他位置都是近似发散或会聚的球面波<sup>[8]</sup>。根据激光光腔模式的解析理论,高斯光束的远场发散角与腰斑半径尺寸呈反比,因此光束经望远镜系统准直到发散角最小时,腰斑直径最大,此时光腰位置恰在透镜后焦平面处。如果在发射镜物镜后焦平面附近放置并固定一个有多个圆

孔的挡板,挡板在此起到衍射屏的作用,在远场就形成几个圆孔衍射图样,如图 1 所示。

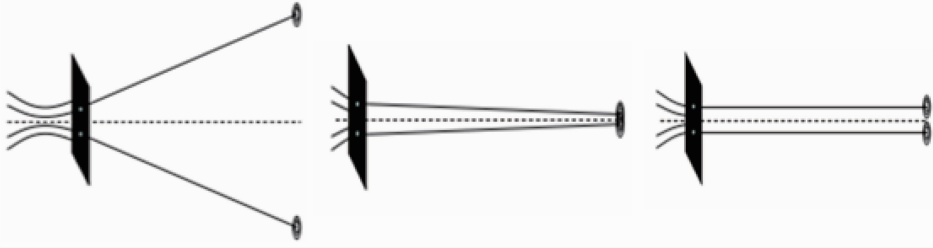


图 1 光腰在挡板前、挡板后、挡板处三种情况时光束的传播

Fig. 1 Propagation of beam when beam-waist is before, after and in the aperture slot

调节发射系统目镜位置,同时光腰的位置和远场发散角大小会随之变化,直至激光光腰移动到发射物镜后焦平面(衍射板)处,几个远场衍射光斑中心距与相应的挡板孔距相等[如图 1(c)],此时说明通过挡板的光波为平面波,即可认为高斯光束的发散角压缩到了极限,达到了最好的准直效果。

利用常规 532 nm 波长激光进行实验,利用该方法得到的激光束准直时发射镜扩束位置和使用常规方法进行调节的位置基本一致,证明采用高斯光束特性进行激光发射系统准直调节方法正确,之后应用该方法对 1064 nm 激光发射准直进行监视,收到很好的效果。

### 3.2 532 nm 引导的 1064 nm 激光指向监视方法

对于发射与接收不同轴的 SLR 系统,激光束精确指向和瞄准高度依赖天文相机对激光后向散射像和星像同时进行监视来调节。但对于 1064 nm 激光束,大气后向散射强度比 532 nm 波长激光要弱 1~2 个数量级,现有的激光监视系统适用于可见光波段,在 1064 nm 波段的效率较低,因此利用大气后向散射监视 1064 nm 激光的方法具有一定困难。为解决 1064 nm 激光束精确指向瞄准的关键问题,采用了一种 532 nm 激光引导 1064 nm 激光的光束监视方案。

在激光发射前将 1064 nm 激光与另一束用于引导的 532 nm 激光进行合束调节,再经同一个折轴光学系统发射,利用对 532 nm 激光后向散射的光尖监视来间接引导 1064 nm 激光进行指向瞄准。当引导光照准目标后,再微调激光指向,即可实现 1064 nm 波长激光束瞄准空间目标。

影响 1064 nm 和 532 nm 波长两光束平行度的因素主要有两部分:1)发射前的两光束合束的平行度误差;2)大气对两种不同波长激光所产生的色散引起的平行度误差,该误差较小,在 2'' 以内<sup>[9]</sup>。

为实现两光束发射前的平行度调节,采用了如图 2 所示的调节光路,其中 M2 为镀膜 532 nm 增透(AR)、1064 nm 增反(HR)的合束镜,M1 为镀膜 532 nm 和 1064 nm 增反的反射镜,L1 为一长焦距透镜。调节时,M2 用于调节两光束的交角,M1 镜将合束后的光导入透镜,再会聚到 CCD 用来进行两光束光斑的监视和平行度的计算。完成后将 M1 反射镜移开,使两束激光可经同一个折轴光学系统和准直系统发射。图 2 左半部分为 CCD 黑框部分光路的放大图。

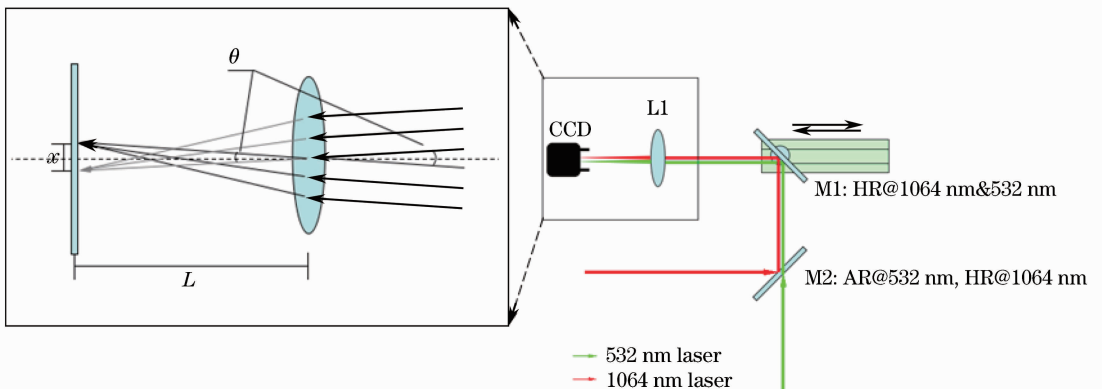


图 2 532 nm 和 1064 nm 合束平行度调节光路

Fig. 2 Optical paths for parallelism of optical axes

根据图 2 可知,两束光在透镜后焦面(CCD 靶面)上的光斑间距反映了两者的夹角  $\theta$ ,有  $\theta \approx x/L$ ,其中,  $x$  为两束激光在透镜焦面处的光斑中心距离,  $L$  约为透镜的焦距。

图 3 为合束实验系统中 CCD 所获取的两束光的光斑,图 3(a)为合束之前的图像,图 3(b)为将两光斑调节重合之后的图像,可以保证两光束基本重合,满足激光测距的要求。

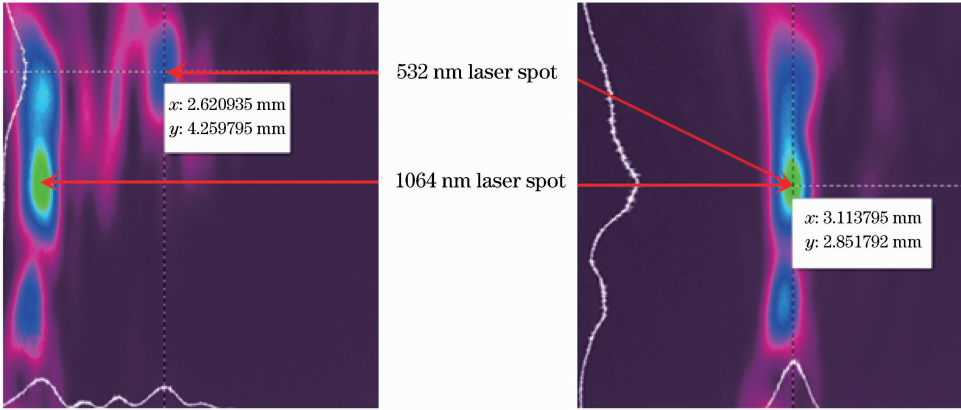


图 3 CCD 显示的光斑图像

Fig. 3 Light spot in CCD of both 1064 nm and 532 nm

根据 CCD 的光斑重合的不确定度  $x$  和  $L$  估算出两光束在激光室内的合束平行度可达到  $50''$  以内,再经过 12 倍扩束镜的压缩,最终的出射平行度优于  $4''$ 。

借助红外观察设备在激光发射口和约 45 m 远处分别标记 532 nm 和 1064 nm 激光光斑中心,通过光斑间距差计算出两束光的夹角,重复验证结果符合上述的估算。结合测距系统的常用发散角和搜索效率,平行度完全可以满足观测要求。

### 3.3 利用平行光管进行探测器灵敏区测定方法

常规 532 nm 激光测距中,通常利用一定亮度的恒星目标在天文相机监视视场内进行扫描运动,并观察探测器的输出,如果星象位于探测器视场内,输出噪声将明显增大,这样就可以对探测器的灵敏区范围进行划定。然而由于大部分恒星的红外波段强度较弱,寻找强度相当的近红外波段恒星较为困难,因此针对 1064 nm 波段,设计了利用平行光管进行灵敏区测量的方案。

将平行光管出射的平行光直接射向望远镜主镜筒,调节望远镜光轴与平行光平行,再微调直至监视 CCD 视场内出现平行光管内部光源形状。需要注意一点,光源的形状必须是点型或者细直线型,点型光源的平行光管的灵敏区数法与利用星象数灵敏区的过程类似,图 4 为利用线型光源平行光管数灵敏区的流程示意图。

如图 4 所示,首先用十字形像斑的竖亮线做水平方向扫描,分别确定出灵敏区边界坐标  $(x_1, y_1)$  和

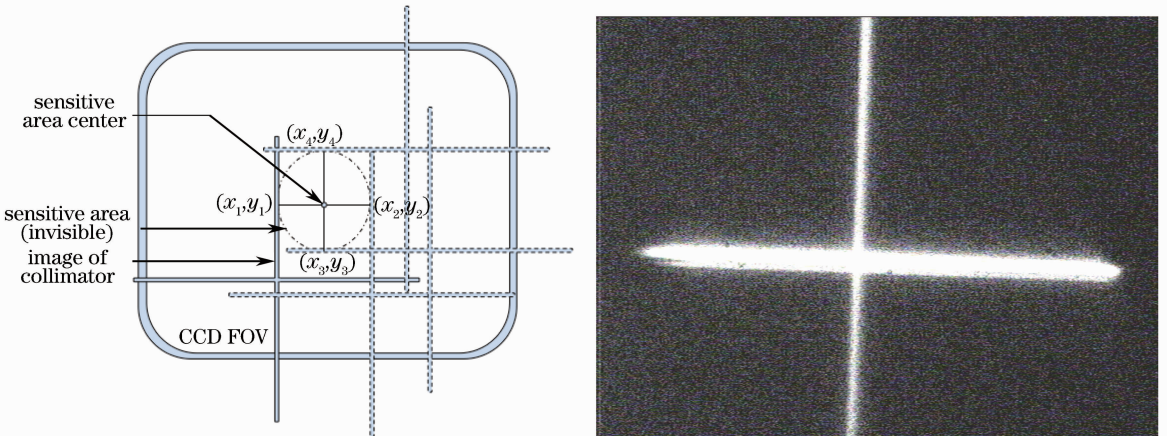


图 4 平行光管的十字丝像数灵敏区的过程

Fig. 4 Diagram to measure sensitive area

$(x_2, y_2)$ , 然后移动十字像斑用横亮线做竖直方向扫描, 确定出坐标  $(x_3, y_3)$  和  $(x_4, y_4)$ 。灵敏区中心的坐标等于  $[(x_2 + x_1)/2, (y_3 + y_4)/2]$ 。

用图中的方法对 Si 材料可见光探测器的灵敏区进行了划定, 对比之前用星象划定的灵敏区中心, 中心坐标在  $x$  方向相差  $21''$ , 在  $y$  方向上约相差  $9''$ , 主要原因是平行光管光源亮度不及数灵敏区通常选用的恒星, 导致灵敏区边界的确定相对模糊。考虑到灵敏区尺寸在  $x$  方向宽  $200''$  左右,  $y$  方向宽  $120''$  左右, 灵敏区中心的差距约为灵敏区范围尺寸的  $1/10$ , 基本不影响激光光尖的指向。

实验证明, 利用平行光管数得的灵敏区, 与利用星象数得的灵敏区基本吻合。该方法也为今后系统利用 InGaAs 探测器进行  $1064\text{ nm}$  波长灵敏区测定提供了解决方案, 同时也适用于其他不可见波段探测器灵敏区的测定, 也使得灵敏区测定可以不依赖昼夜、天气进行, 对于提高台站总体效率是有意义的。

#### 4 利用 Si 探测器进行的 $1064\text{ nm}$ 卫星激光测距实验

通过以上技术的研究, 及对发射和接收系统的改造, 上海天文台卫星激光测距系统基本具备了用  $1064\text{ nm}$  波长激光进行测距的条件, 并在国内首次成功用  $1064\text{ nm}$  波长激光器开展 SLR 测量实验, 验证了技术的可行性。

实验中采用了常规  $532\text{ nm}$  测距用的 Si 材料 C-SPAD 探测器, 光敏面大小为  $200\text{ }\mu\text{m}$ , 时间抖动约为  $50\text{ ps}$ , 在  $532\text{ nm}$  波段效率约为  $20\%$ , 但在  $1064\text{ nm}$  波段效率小于  $1\%$ , 图 5 为 C-SPAD 探测器量子效率 (QE) 随波长变化图。

于 2014 年 1 月 15 日、2 月 22 日、12 月 2 日、12 月 16 日分别对 Ajisai、Graceb、Gracea、Jason2 和 beaconc 等卫星开展了实验, 采用了  $532\text{ nm}$  激光引导  $1064\text{ nm}$  激光的方法, 图 6 为 1 月 15 日对 Ajisai 卫星测距时使用  $532\text{ nm}$  引导激光光尖图。

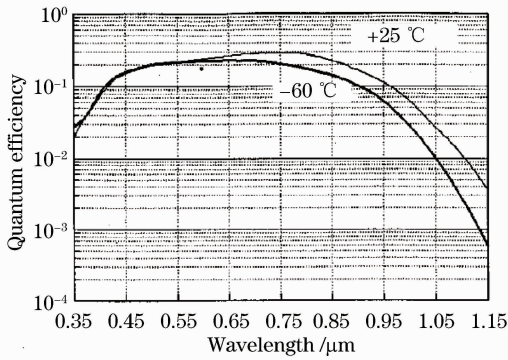


图 5 Si 探测器在  $532\text{ nm}$  和  $1064\text{ nm}$  波段量子效率图  
Fig. 5 QE of Si detector in  $532\text{ nm}$  and  $1064\text{ nm}$  wavelength

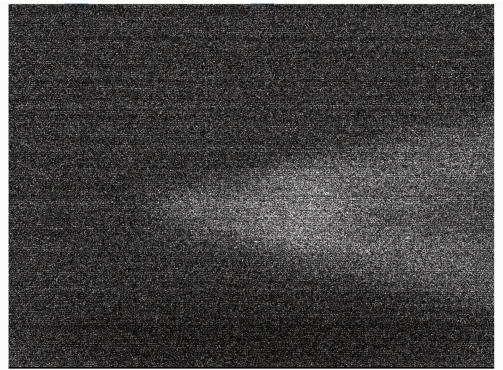


图 6  $1064\text{ nm}$  激光测距时用于引导的  $532\text{ nm}$  激光光尖图  
Fig. 6  $532\text{ nm}$  guiding laser image when ranging with  $1064\text{ nm}$  wavelength

图 7 和表 1 分别给出了 2014 年 12 月 2 日和 16 日对 Jason2、Ajisai 和 Beaconc 三颗卫星的  $1064\text{ nm}$  波长激光测距结果数据预处理图和测量结果, 实验中采用的  $1064\text{ nm}$  基频光功率约为  $1.2\text{ W}$ , 其中最好测量精

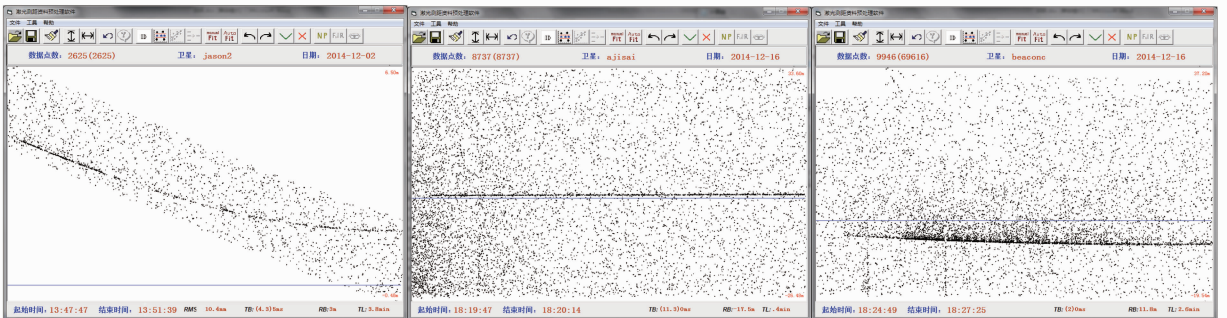


图 7  $1064\text{ nm}$  激光对 Jason2、Ajisai 和 Beaconc 的测距数据预处理图  
Fig. 7 SLR data with  $1064\text{ nm}$  wavelength to satellite Jason2, Ajisai and Beaconc

度为 10.4 mm,最高平均回波率为 9.6%。由于测距使用的 Si 材料 C-SPAD 探测器在 1064 nm 波段的效率小于 1%,可以估计如采用本课题组正在研制的 1064 nm 波段效率达 20%的 InGaAs 材料探测器,激光测距的回波效率和测距能力将得到大幅提升。

表 1 Jason2、Ajisai 和 Beaconc 卫星的 1064 nm 测距情况统计  
Table 1 1064 nm SLR data tosatellite Jason2, Ajisai and Beaconc

	Time /min	Points	Average return rate /%	Average accuracy /mm
Jason2	3.6	561	0.2	10.4
Ajisai	0.4	850	3.5	45.6
Beaconc	1.7	9812	9.6	23.8

## 5 结 论

本文开展了基于 1064 nm 波长激光器的卫星激光测距技术研究,提出了 1064 nm 激光准直方法、532 nm 引导 1064 nm 激光指向监视方法和近红外波段探测器灵敏区标定方法。在进行测距系统改造的基础上,利用以上技术和 Si 材料探测器开展了国内首次对带有合作目标的 SLR 测量实验。实验采用 1064 nm 量子效率小于 1%的 Si 探测器实现了对距离 1500 km 卫星的测量,测距精度为 10.4 mm。该实验成功证明了本文几种技术研究的正确性及 1064 nm 卫星激光测距的可行性,为该测量技术发展和应用打下了好的基础。下一步将利用 InGaAs 材料探测器开展测星实验,进一步评估 1064 nm 波长激光测距的能力,并促进其在空间碎片、白天测距、激光测月等领域中的应用。

## 参 考 文 献

- Ye Shuhua, Huang Cheng. Astrodynamics [M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 2000.  
叶叔华, 黄 城. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
- Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei, *et al.*. Nonlinear Optics[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2003; 139-180.  
石顺祥, 陈国夫, 赵 卫, 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003; 139-180.
- Degnan J J. Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: a Review[M]. Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology, Geodynamics Series, 1993, 25; 133.
- U Schreiber, K H Haufe, R Dassing. Measuring atmospheric dispersion With WLRs in multiple wavelength mode [C]. 8th International Workshop on Laser Ranging, 1993.
- Ben Greene. Laser tracking of space debris [C]. 13th International Workshop on Laser Ranging, 2002.
- Michael A Krainaka, Xiaoli Sun, Guangning Yang, *et al.*. Photon detectors with large dynamic range and at near infrared wavelength for direct detection space lidars[C]. SPIE, 2009, 7320; 732005.
- Xu Xiaojun, Lu Qisheng, Shu Bohong, *et al.*. Back-scattering model and experiment of laser illuminating [J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(1); 60-65.  
许晓军, 陆启生, 舒伯宏, 等. 激光照明的大气后向散射理论的模拟和实验研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(1); 60-65.
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. Laser Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- Zhang Xuejun, Jiang Wenhan. Numerical calculation and results analysis for atmospheric refraction and atmospheric dispersion[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(2); 1-5.  
张学军, 姜文汉. 大气折射和色散的数值计算及结果分析[J]. 光电工程, 2002, 29(2); 1-5.

栏目编辑: 何卓铭