

中山大学月球激光测距研究与实验*

高添泉^{1,2}, 张才士^{1,2}, 李明^{1,2}, 李语强³, 韩西达^{1,2}, 练军想^{1,2}, 刘胜前^{1,2}, 黎樽彪^{1,2}, 涂良成^{1,2}, 吴先霖^{1,2}, 杨山清^{1,2}, 叶贤基^{1,2}, 闫勇^{1,2}, 张蜡宝⁴, 张鸿博⁶, 张锦绣¹, 周立祥^{1,2}, 赵勇志⁵, 赵宏超^{1,2}

1. “天琴计划”教育部重点实验室, 中山大学天琴中心, 天琴前沿科学中心, 国家航天局引力波研究中心, 广东 珠海 519082
2. 中山大学物理与天文学院, 广东 珠海 519082
3. 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216
4. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093
5. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
6. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要: 地月激光测距是“天琴计划”0123技术路线图中的第“0”步, 为实现引力波探测卫星的高精度定轨及相关科学研究, 本文开展了月球激光测距分析与实验研究, 分析系统探测能力和测距精度。中山大学天琴计划激光测距台站(以下简称“天琴台站”)采用1.2 m口径激光测距望远镜, 激光波长1 064 nm, 激光能量320 mJ, 激光重复频率100 Hz, 激光脉宽80 ps, 首次采用2×2多元阵列超导探测器进行月球激光测距。天琴台站于2019年6月8日(农历初六)晚首次获得来自Apollo 15角反射器阵列有效回波信号4组, 随后于2019年11月7日(农历十一)晚成功接收到来自月面全部5个激光角反射器阵列的有效回波信号, 测距精度达到cm量级, 标志着天琴台站已经具备常规月球激光测距能力。

关键词: 月球激光测距; 超导阵列探测器; 激光角反射器

中图分类号: P129 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)01-0247-06

Research and experiment of lunar laser ranging in Sun Yat-sen University

GAO Tianquan^{1,2}, ZHANG Caishi^{1,2}, LI Ming^{1,2}, LI Yuqiang³, HAN Xida^{1,2}, LIAN Junxiang^{1,2}, LIU Shengqian^{1,2}, LI Zhunbiao^{1,2}, TU Liangcheng^{1,2}, WU Xianlin^{1,2}, YANG Shanqing^{1,2}, YE Xianji^{1,2}, YAN Yong^{1,2}, ZHANG Labao⁴, ZHANG Hongbo⁶, ZHANG Jinxiu¹, ZHOU Lixiang^{1,2}, ZHAO Yongzhi⁵, ZHAO Hongchao^{1,2}

1. MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics, Frontiers Science Center for TianQin, CNSA Research Center for Gravitational Waves, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China
2. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
3. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Science, Kunming 650216, China
4. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

* 收稿日期: 2020-11-11 录用日期: 2020-12-12 网络首发日期: 2021-01-13

基金项目: 广东省基础与应用基础重大项目(2019B030302001);国家自然科学基金(11655001)

作者简介: 高添泉(1990年生),男;研究方向:月球激光测距;E-mail: gaotq@mail2.sysu.edu.cn

张才士(1994年生),男;研究方向:卫星/月球激光测距精度分析;E-mail: hangesh5@mail2.sysu.edu.cn

(以上两位作者为共同第一作者)

通信作者: 赵宏超(1985年生),男;研究方向:望远镜机械结构、支撑设计;E-mail: zhaohongch@mail.sysu.edu.cn

5. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China*

6. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China*

Abstract: In order to serve the needs of precise orbit determination for the three satellites of the Tianqin Project, lunar laser ranging analysis and experimental research were carried out. The TianQin laser ranging station in Sun Yat-sen University uses a 1.2 m diameter laser ranging telescope with a laser wavelength of 1064 nm, a laser energy of 320 mJ, a laser repetition frequency of 100 Hz, and a laser pulse width of 80 ps. It also uses a 2×2 multi-element array superconducting detector for lunar laser ranging for the first time. After two years of lunar laser ranging experiments, on the evening of June 8, 2019 (the sixth day of the lunar calendar), four sets of effective echo signals from the Apollo 15 corner reflector array were obtained for the first time, and then on November 7, 2019 (the tenth day of the lunar calendar), successfully received effective echo signals from all 5 laser retro-reflector arrays on the lunar surface, with cm level precision, indicating that the TianQin laser ranging station has acquired regular lunar laser ranging capability.

Key words: lunar laser ranging; superconducting nanowire single photon detector array; corner reflector array

1 引言

月面上共有 5 个可供激光测距的角反射器阵列, 针对这 5 个激光角反射器开展了大量的激光测距理论分析和实验研究^[1-4]。目前, 国际上有近 50 个台站可以进行人造卫星激光测距, 高精度的卫星激光测距数据得到了广泛应用。然而, 能够开展常规月球激光测距 (Lunar Laser Ranging, LLR) 工作的仅有美国的 MLRS (McDonald laser ranging station)^[5-7] 观测站 (0.76 m 望远镜)、Apache point 观测站^[8-10] (3.5 m 望远镜)、法国的 Grasse^[11-13] 观测站 (1.5 m 望远镜)、意大利的 MLRO 观测站 (1.5 m 望远镜) 和德国的 Wettzell 观测站^[14] (0.75 m 望远镜)。因受激光测距望远镜口径和激光器等众多因素的限制, 国内开展 LLR 实验的台站较少。20 世纪末, 中国科学院云南天文台的 1.2 m 望远镜是当时国内口径最大的测距望远镜, 是最具潜力的激光测月望远镜之一。云南天文台从 20 世纪 80 年代末至今一直致力于 LLR 的研究。近年来, 国内其他测站亦陆续开始进行 LLR 技术研究, 如上海天文台、中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站和中山大学等。

来自月面 5 个激光反射器的观测数据量差异较大, 其中 Apollo 15 反射器由于其有效反射面积大, 获得的数据量最多。Lunakhod 1 反射器仅仅在放置初期曾由法国和苏联的观测站获得有效回波信号, 此后未收到过任何回波信号。直到 2010 年 4 月

Apache Point 天文台利用探月卫星图像重新计算 Lunakhod 1 反射器位置后, 采用 3.5 m 激光测月系统重新获得了该反射器回波信号。美国的 McDonald 和 Apache point 观测站, 法国的 Grasse 观测站, 中国的天琴台站都已经实现了月面 5 个角反射器的测量。但是, 即便重新找到了“丢失”已久的 Lunakhod 1 信号, 其回波数据量还是较少, 目前国内还没有满月段测距数据。

2 月球激光测距系统

2.1 月球激光测距望远镜系统

中山大学激光测距系统采用口径 1.2 m 的望远镜作为地面激光发射端和回波接收端, 如图 1 所示。望远镜跟踪机架主要包括水平轴、垂直轴、导电环、力矩电机、轴角编码器、机下单杆、驱动控制系统等, 具有数字引导 (包含利用中心机引导信息与利用轨道自引导) 跟踪功能。同时望远镜系统配置了可见光粗跟踪电视、近红外粗跟踪电视自动跟踪能力。主要技术指标为:

- (1) 转动范围: 方位 $\pm 270^\circ$, 俯仰 $0^\circ \sim 90^\circ$;
- (2) 最大速度: 方位 $15^\circ/\text{s}$, 俯仰 $6^\circ/\text{s}$;
- (3) 最大加速度: 方位 $4^\circ/\text{s}^2$, 俯仰 $2^\circ/\text{s}^2$;
- (4) 引导跟踪精度: $\leq 1''$ (RMS, 恒星);
- (5) 修正最小响应步长: $0.2''$;
- (6) 跟踪回路闭环跟踪精度: $\leq 2''$ (RMS)。

可见光粗跟踪电视子系统包括光学镜头、CCD

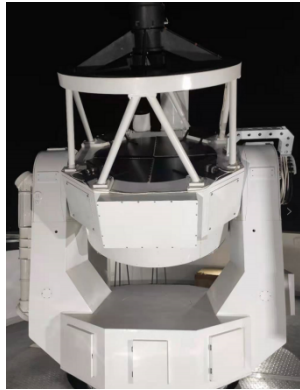


图 1 1.2 m 激光测距望远镜

Fig. 1 1.2 m telescope for laser ranging

探测器、图像传输接口、信息处理系统。主要用于在轨道数据引导下,对目标稳定跟踪。该系统设置独立的光学系统,并加挂主光学系统旁边,其光轴和主光学系统光轴平行,可以利用该电视子系统捕获与跟踪目标。光学镜头带有调光调焦机构。该粗跟踪电视加装有光谱调光系统,以适应不同的天光背景条件。主要技术指标为:

- (1) 通光口径: 300 mm;
- (2) 探测器单元数: 1 k×1 k (可见光波段);
- (3) 帧频: 15 Hz;
- (4) 像元尺寸: 8 μm×8 μm;
- (5) 通光波段: 450 ~800 nm;
- (6) 视场: 0.5°×0.5°;
- (7) 与主望远镜光轴不平行度: 10" (RMS, 修正后);
- (8) 探测能力: 10 Mv (在设备工作仰角大于 30°、天空背景暗于 18 Mv/arcsec²、大气水平能见度≥20 km 的条件下);
- (9) 测角精度: 8"。

Coude 光路暗弱相机系统为独立成像系统。在库德光路通过光谱分光,和激光测距系统同时工作。主要包括中继光学系统、高灵敏度 CCD 探测器和信息处理系统,以适应目标亮度低、运动速度慢的特点。主要技术指标为:

- (1) 通光口径: 约 1 200 mm;
- (2) 探测器单元数: 512×512;
- (3) 帧频: 2、1、0.5、0.25 和 0.125 Hz (可根据器件适当调整);
- (4) 像元尺寸: 10 μm×10 μm;
- (5) 通光波段: 450 ~ 900 nm;
- (6) 探测能力: 12 Mv (在设备工作仰角大于 30°、天空背景暗于 18 Mv/arcsec²、大气水平能见度≥20 km 条件下);

(7) 测角精度: 5" (轴系测量指向精度)。

2.2 月球激光测距超导探测器阵列及记时系统

探测器作为月球激光测距系统中的重要组成单元之一,其性能将直接影响月球激光探测能力。中山大学激光测距系统采用由南京大学自主研发的 4 像元超导纳米线单光子阵列探测器。该类型探测器具有探测效率高、暗计数低、死时间短等特点,其能够在一定距离门探测范围内进行多次光子探测,可有效提高探测概率和探测信噪比,从而提升系统的探测能力。每个像元占空比为 50%,使用芯径为 200 μm 的多模光纤对探测光敏面进行耦合,光纤出口后连接准直镜可以将出射光斑缩小且完整覆盖在阵列器件光敏面上,探测器阵列如图 2 所示。主要技术指标为:

- (1) 多通道探测器响应信号灵敏度达到单光子级别;
- (2) 通过光纤输入到探测器,所有 4 像元的探测效率需高于 30% (工作波长 1 064 nm,非偏振光);
- (3) 在没有光输入的时候,0.9 I_c 偏置电流下,单像元暗计数≤100 cps,其中 I_c 为临界电流;
- (4) 接收光敏面 (光纤芯径) 200 μm;
- (5) 有效值抖动 (标准差 J_{RMS}) 80 ps;
- (6) 输出信号使用 SMA 接头,上升沿时间小于 1 ns。

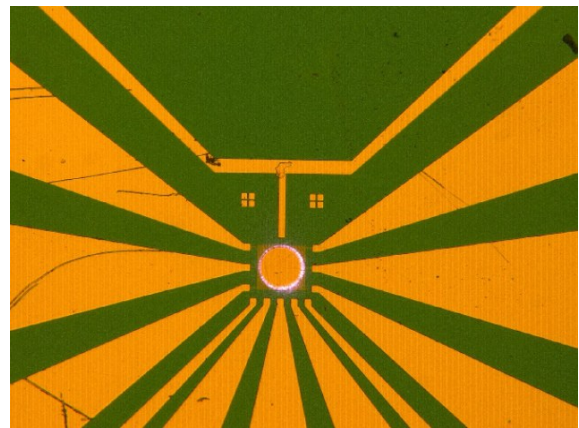


图 2 2×2 超导阵列探测器

Fig. 2 Superconducting nanowire single photon detector

事件计数器作为激光测距实验中主、回波光子到达时刻的记录器件,其性能将直接影响月球激光测距精度与探测能力。天琴台站月球激光测距系统采用 Guide Tech 系列事件计时器,记录主波发出时刻和回波到达时刻,其时间分辨率达到 0.9 ps,本实验也是首次将该类型的事件计数器应用于月球激光测距中。主要技术指标与要求为:

- (1) 单次时间分辨率: 0.9 ps;
 (2) 最大测量速率: 4 M次/s。

2.3 月球激光测距激光器系统

月球激光测距系统中激光采用重复频率 100 Hz、脉冲宽度 80 ps、单脉冲能量 320 mJ、波长

1064 nm 近红外波段、光束质量 $M^2 < 2.5$ 的皮秒激光输出。该高性能皮秒激光器用于地-月激光测距, 可以实现厘米级高精度距离探测。这也是国内首次在近红外波段进行月球激光测距实验, 其他月球激光测距台站激光器指标参数如表 1。

表 1 激光器性能
 Table 1 Laser index

站名	激光能量 (功率)	激光重频	激光脉宽	波长
云南天文台 ^[15]	3 J	10 Hz	10 ns	532 nm
天琴台站	300 mJ	100 Hz	80 ps	1064 nm
Grasse ^[12]	300 mJ	10 Hz	150 ps	532nm/1064 nm
APOLLO ^[16]	115 mJ	20 Hz	120 ps	532 nm
Matera ^[17]	100 mJ	10 Hz	40 ps	532 nm
Wettzell ^[18]	180 mJ	/	200 ps	532 nm/1064nm
McDonald ^[19]	1.2 J	20/min	3 ns	532 nm

3 月球激光测距实验

3.1 月球激光测距观测实验

针对月球激光测距, 含有角反射器的合作目标的回波光子数可以表示为^[15]

$$n_1 = \frac{\lambda}{hc} \cdot E_i \cdot T^2 \cdot K_t \cdot K_r \cdot \frac{D^2 \rho \sigma}{\pi \theta_{\text{com}}^2 R^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{R \theta_i}{2} \right)^2}$$

其中 λ 为激光波长, h 和 c 分别为普朗克常数和真空中光速, E_i 为激光单脉冲能量, T 为大气透过率, K_t 和 K_r 分别为发射系统和接收系统效率, σ 为目标等效截面积, ρ 为目标反射率, D 为望远镜接收口径, θ_{com} 为角反射器发散角, d 和 θ_i 分别为激光经望远镜发射时直径和发散角。

天琴台站月球激光测距系统参数如表 2 所示。不同角反射器阵列由于口径的不同, 造成了激光发散角的不同。针对 Apollo 系列角反射器 (口径: 3.8 cm), 采用 532 nm 和 1064 nm 波段, 发散角分别为 7" 和 14"; 针对 Lunakhod 系列角反射器 (口径: 11 cm), 采用 532 nm 和 1064 nm 波段, 发散角分别为 2.4" 和 4.8"。可以得到使用近红外 1064nm 波段进行月球激光测距时 Apollo 11、Apollo 14、Apollo 15、Lunakhod 1 和 Lunakhod 2 角反射器阵列的有效回波光子数分别为每秒 2.66、2.66、7.99、14.66 和 14.66 个。同时针对 532 nm 和 1064 nm 两种波长分析得到, 在相同激光功率的条件下,

1064 nm 波段的单脉冲光子数为 532 nm 波段的 2 倍。

表 2 天琴台站激光测距系统参数

参数	数值
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% @ 1064nm
接收系统光学效率	0.28
激光中心波长	1064 nm
激光发散角 (全角)	2"

采用 1.2 m 共光路激光测距系统, 首次实现了在近红外波段 (1064 nm)、高重频 (100 Hz) 技术条件下的月球激光测距。天琴台站激光测距系统在 2019 年 4 月完成安装和调试后, 于 2019 年 6 月 8 日 (农历初六), 首次成功接收到来自 Apollo 15 激光角反射器阵列的有效回波信号 4 组, 实现月球激光测距。于同年的 11 月 7 日 (农历十一) 成功得到月面全部 5 个激光角反射器阵列的有效回波信号, 其中共成功测量 Apollo 11 有效回波信号 1 组、Apollo 14 有效回波信号 1 组、Apollo 15 有效回波信号 3 组、Lunakhod 1 有效回波信号 2 组、Lunakhod 2 有效回波信号 5 组。标志着天琴台站激光测距系统已经具备常规月球激光测距能力。图 3 所示, 为

于 2019 年 11 月 07 日测得的 2 个月面激光角反射器阵列 (A15 和 L1) 残差数据情况, 横坐标为测量时刻 (UTC), 纵坐标为测量距离与预报距离之间的偏差 (ns), 红色点表示有效回波信号, 蓝色点

表示噪声信号。通过分析数据残差图后得到 A15 角反射器的测量内符合精度为 0.5 ns (7.5 cm), L1 角反射器的测量内符合精度为 0.7 ns (10.5 cm)。

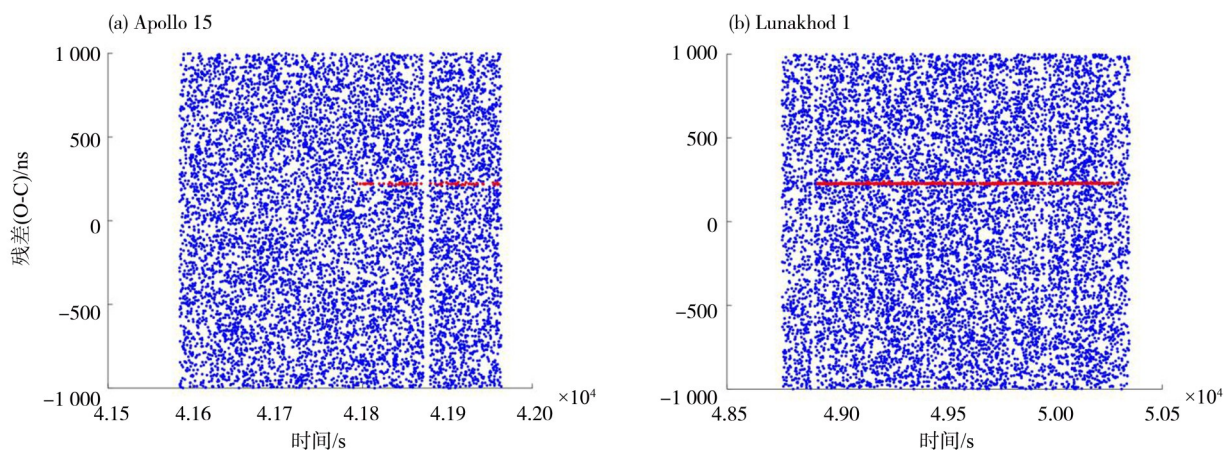


图 3 Apollo 15 和 Lunakhod 1 角反射器回波信号残差
Fig. 3 Apollo 15 and Lunakhod 1 corner reflector echo signal

3.2 国内外比较

为评估中山大学月球激光测距系统探测能力, 本文从系统指标参数 (激光能量、激光重频、激光波长、探测器类型) 分析并总结系统特点。表 2 总结了国内外月球激光测距系统激光器参数, 其中只有 Grasse 观测站、Wettzel 观测站和天琴台站在 1064 nm 近红外波段实现了月球激光测距, 但是天琴台站发射激光重复频率达到 100 Hz, 为 Grasse 观测站发射激光重复频率的 10 倍。表 3 总结了各个月球激光测距观测站所使用的探测器类型, 其中 Apache 观测站使用了由林肯实验室为其研制的 16 像元阵列 APD 探测器。中山大学首次将 4 像元超导纳米线单光子探测器阵列应用于月球激光测距实验中, 其暗计数约为 100 cps, 远远低于其他类型探测器暗计数, 同时该 4 像元探测器具有很高的探测效率 (60%@1064nm)。表 4 总结了各个月球激光测距观测站针对 5 个月面角反射器阵列的测距统计情况。其中, 只有美国的 McDonald 和 Apache 观测站、法国的 Grasse 观测站、中国的天琴台站成功接收到月面全部激光角反射器的有效回波信号。

4 总结

随着深空探测和月球科学研究热度的不断升温, 月球激光测距再次成为天文观测领域的研究

表 3 探测器类型

Table 3 Detector type

站名	探测器种类	探测器名称
APOLLO ^[16]	阵列型	APDs
McDonald ^[20]	单元型	APD
Grasse ^[12]	单元型	SPAD
Matera	单元型	MCP
云南天文台 ^[15]	单元型	C-SPAD
天琴台站	阵列型	SNSPD

表 4 各测月站得到角反射器回波情况

Table 4 Observation result

站名	A11	A14	A15	L17	L21
APOLLO (美)	√	√	√	√	√
McDonald (美)	√	√	√	√	√
Grasse (法)	√	√	√	√	√
Matera (意)	√	√	√	×	√
Wettzell (德)	×	×	√	√	×
天琴台站 (中)	√	√	√	√	√

1) √表示测到; ×表示未测到。

热点之一。通过分析和处理月球激光测距数据, 可以进行引力物理、地月系统物理的研究。天琴

台站,采用 1.2 m 口径地平式望远镜,1064 nm 近红外波段、100 Hz 高重复频率激光器实现了月球激光测距。目前,天琴台站已经成功接收到月面

全部 5 个激光角反射器阵列反射的有效回波信号,测量精度达厘米量级。

参考文献:

- [1] MÜLLER J, MURPHY T W, SCHREIBER U, et al. Lunar laser ranging: a tool for general relativity, lunar geophysics and earth science[J]. *Journal of Geodesy*, 2019 (24):2195–2210.
- [2] ILRS [EB/OL]. <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/science/scienceContributions/lunar.html>.
- [3] WILLIAMS J G, BOGGS D H, TURYSHEV S G, et al. Lunar laser ranging science[C]// *Proceedings of 14th International Laser Ranging Workshop*. San Fernando, Spain, 2004.
- [4] CHAPRONT J. Francou, Lunar Laser Ranging G.: measurements, analysis, and contribution to the reference systems[J]. *ITN*, 2006, 34:97–116.
- [5] FALLER J, WINER I, CARRION W, et al. Laser beam directed at the lunar retro-reflector array: observations of the first returns [J]. *Science*, 1969, 166 (3901):99–102.
- [6] ALLEY C O, CHANG R F, CURRIE D G, et al. Laser ranging retro-reflector: continuing measurements and expected results [J]. *Science*, 1970, 167 (3918): 458–460.
- [7] BENDER P L, CURRIE D G, POULTNEY S K, et al. The lunar laser ranging experiment [J]. *Science*, 1971, 182(4109):229–238.
- [8] MURPHY T, ADELBERGER E G, BATTAT J, et al. The apache point observatory lunar laser-ranging operation: instrument description and first detections [J]. *Publication of the Astronomical Society of the Pacific*, 2008, 120(863):29–40.
- [9] MURPHY T W J, MICHELSON E L, ORIN A E, et al. Apollo a new push in lunar laser ranging [M]. *From Quantum to Cosmos*, 2009.
- [10] MURPHY T W, MICHELSEN E L, ORIN A E, et al. Apollo: next generation lunar laser ranging [M]. *CPT and Lorentz Symmetry*, 2015.
- [11] ORSZAG A, ROESCH J. Calame O (1972) La station de télémétrie laser de l'observatoire du Pic-du-Midi et l'acquisition des cataphotes français de Luna 17 [C]// *Space Research Conference*, 2007(1):205–209.
- [12] COURDE C, TORRE J M, SAMAIN E, et al. Lunar laser ranging in infrared at the Grasse laser station [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017(602):12.
- [13] VEILLET C, CHABAUDIE J, FERAUDY D, et al. LLR at OCA: on the way to millimeter accuracy [C]// *Proceedings of 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, 1994.
- [14] SCHREIBER U, MUELLER J, DASSING R, et al. LLR: activities in wettzell [C]// *Proceedings of 18th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, 1993.
- [15] 李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 188–195.
LI Y Q, FU H L, LI R Y. Research and Experiment of Lunar Laser Ranging in Yunnan Observatories [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1):188–195.
- [16] MURPHY T W. The apache point observatory lunar laser-ranging operation (apollo) [EB/OL]. <https://tmurphy.physics.ucsd.edu/apollo/doc/matera.pdf>.
- [17] ILRS [EB/OL]. https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/network/stations/active/MATM_sitelog.html.
- [18] Geodätisches Observatorium Wettzell [EB/OL]. <http://www.fs.wettzell.de/>.
- [19] SILVERBERG E C. Operation and performance of a lunar laser ranging station [J]. *Applied Optics*, 1974, 13 (3):565.
- [20] SHELUS P J, RICKLEES R L, RIES J G, et al. McDonald observatory lunar laser ranging: beginning the second 25 years [C]// *Proceedings of the International Astronomical Union*, 1996:172.

(责任编辑 王海蓉)